

Desenvolvimento de Tecnologia Óptica de Medição de Temperatura em Geradores de Potência

Marcelo M. Werneck¹, Regina C. S. B. Allil² e Carmem L. Barbosa³

¹Laboratório de Instrumentação e Fotônica/Programa de Engenharia Elétrica/COPPE/UFRJ

²Laboratório de Defesa Biológica/Divisão Química, Biológica e Nuclear/Centro Tecnológico do Exército/Ministério da Defesa

³Laboratório de Sensores a Fibra Óptica/Instituto de Estudos Avançados/Centro Técnico Aeroespacial/Ministério da Defesa

Resumo - Sensores a fibra óptica tem se mostrado uma ótima alternativa para o monitoramento de diversos parâmetros físicos encontrados no mundo industrial. Em razão disto, os sensores ópticos se tornaram altamente confiáveis. Aliando estas características às já conhecidas vantagens das fibras ópticas, tais como a possibilidade de multiplexação de diversos sensores em uma única fibra, imunidade à interferência eletromagnética, isolamento galvânico e passividade elétrica, estes sensores se tornaram atrativos também à área de energia elétrica. 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 e em potencial, através do sensoriamento remoto. Neste artigo descrevemos técnicas testadas em laboratório e em campo pelo Laboratório de Instrumentação e Fotônica para medida de temperatura de geradores em UHE.

Palavras-chave – Gerador hidroelétrico, Rede de Bragg, Sensor a fibra óptica, Temperatura de máquinas

I. 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 monitoramento com sensibilidade, repetibilidade, confiabilidade e largura de faixa, apropriados para cada caso. Entretanto, existem alguns casos, que os sensores convencionais eletro-eletrônicos não cobrem. São os casos de segurança intrínseca exigentes, largura de faixa excessivamente grande com necessidade de multiplexação de vários sensores, realização de sensoriamento remoto, ambientes com excessiva radiação eletromagnética e ambientes de alta tensão etc.

Para estas aplicações, 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 com baixo peso e pequenas dimensões e excelente largura de faixa.

Este artigo descreve o desenvolvimento de sensores a fibra óptica multiplexados baseados na técnica de Redes de Bragg (FBG-Fibre Bragg Grating), para medida de temperatura. Os sensores foram 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 em função das vantagens da tecnologia adotada.

O projeto titulado como “Desenvolvimento de Tecnologia Óptica de Medição de Temperatura Dentro de Geradores de Potência”, com o código ANEEL 0372-063/2004, ciclo 2003/2004, teve o Laboratório de Instrumentação e Fotônica/Programa de Engenharia Elétrica/COPPE/UFRJ como entidade executora e a ELETRONORTE como a empresa de suporte financeiro ao projeto.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. 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.

B. Fabricação de redes de Bragg em fibra óptica

Os sensores ópticos baseados em FBG são construídos pela alteração da estrutura interna da fibra óptica fazendo-se incidir sobre ela um feixe de laser que marca, periodicamente uma pequena parte do núcleo da fibra.

Inicialmente, a fibra óptica dopada que será submetida à gravação de uma FBG deve passar por um processo de

preparação chamado de hidrogenação. O processo de hidrogenação visa tornar a fibra óptica mais sensível através da fotosensibilização (hidrogenação) por incidência de um feixe ultravioleta (UV). Este processo consiste em expor a fibra óptica em um sistema composto por um cilindro de H₂ de alta pureza, com pressão típica de até 2000 Pa. Conectado ao cilindro há uma válvula de controle que regula a pressão dentro da câmara de hidrogenação com um tubo de aço inox de diâmetro interno igual a 4 cm e comprimento de 1 m, aproximadamente, onde as fibras a serem hidrogenadas são colocadas.

C. Montagem experimental para a gravação da FBG através da máscara de fase

A montagem experimental consiste em utilizar um laser de Argônio com um comprimento de onda de 248 nm com um dobrador de frequência intra-cavidade. Este sistema é equipado com um cristal não-linear de BBO (beta borato de bário: BaB₂O₄) para produzir a geração de segunda harmônica, gerando um feixe de saída no ultravioleta.

Uma máscara de fase com grade de transmissão e período com comprimentos de onda adequados é colocada na saída do feixe da radiação UV. O feixe UV (HILL, K. O. et al, 1993) atravessa a máscara e se difrata em primeira ordem em duas direções simétricas com a mesma potência. Com dois espelhos paralelos, torna-se possível a recombinação destes dois feixes resultantes através de reflexão interna, segundo o ângulo determinado pela máscara de fase. Os dois feixes, após incidirem nos espelhos, sofrem interferência segundo o ângulo formado pelos espelhos. Estes espelhos são fixos em placas móveis e os posicionadores são controlados por um motor de passo, que permite o ajuste da velocidade do movimento angular dos mesmos.

A combinação dos feixes de radiação UV, após sofrerem reflexão nos espelhos, recombina no plano onde as fibras são cuidadosamente posicionadas. A superposição dos dois feixes gera um padrão de interferência periódica, o qual se reproduz no núcleo da fibra previamente preparada, ou seja, descascada e hidrogenada. O reflector de Bragg é o mais simples de ser fabricado através da técnica da máscara de fase.

A inscrição de grades de Bragg em fibra óptica é feita em tempo real e conseqüentemente, sua caracterização é imediata, podendo ser observada através de um analisador de espectro óptico de alta resolução. As Figuras 1A e 1B mostram o diagrama em blocos e a fotografia da montagem experimental para a gravação de uma FBG, respectivamente.

D. Sensores ópticos baseados em rede de Bragg

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, λ_B , da rede:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}} \Lambda$$

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 (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 determinados agentes, resultando em um deslocamento do comprimento de onda de Bragg, que pode ser então usado como parâmetro transdutor.

O deslocamento espectral $\Delta\lambda_B$, devido a efeitos de tensão longitudinal, ϵ_z , e temperatura, ΔT , pode ser descrito pela equação:

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

Onde p_e representa o coeficiente efetivo para o efeito foto elástico, α é o coeficiente de expansão térmica e η 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 μ -strain (isto é, 1 μ m por metro), enquanto que o deslocamento do comprimento de onda de Bragg por efeito de temperatura é na ordem de 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. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do método de fabricação das redes de Bragg.



Figura 1A. Esquema para a fabricação das FBGs.

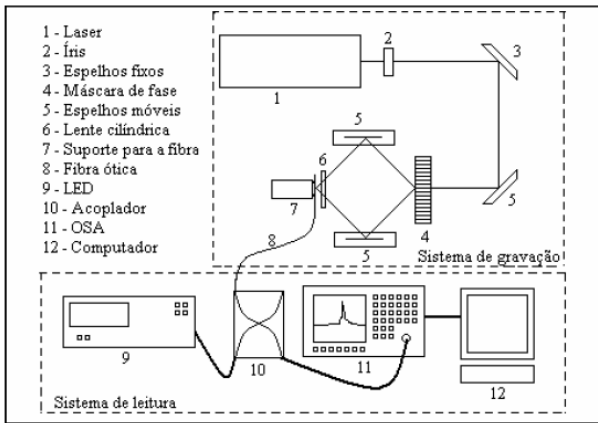


Figura 1B. Diagrama em blocos da montagem para gravar FBG.

E. Caracterização e calibração 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 2. O set up é composto de uma fonte óptica (ASE), um acoplador óptico e um analisador de espectro óptico (OSA).

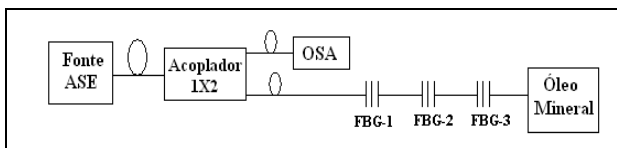


Figura 2. Set up óptico da caracterização espectral das FBGs.

Na Figura 3 podemos observar a caracterização das redes de Bragg, centradas em 1536,01 nm, 1547,35 nm e 1557,07 nm, mostradas na tela do OSA.

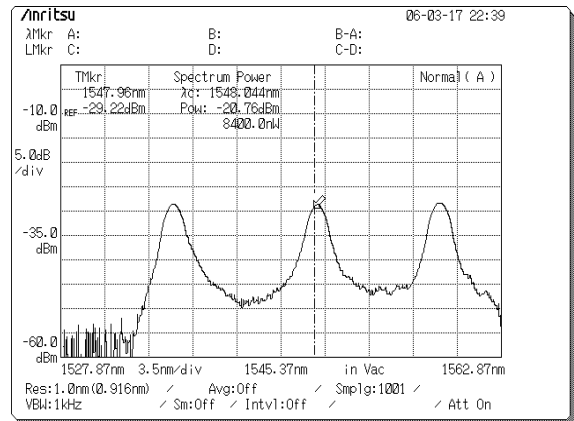


Figura 3. Caracterização espectral das três FBGs.

Em seguida os sensores ópticos foram submetidos à variação térmica na faixa de 25 °C a 95 °C. A Figura 4A mostra o diagrama em blocos do ensaio realizado na jiga de teste para a obtenção da variação térmica usando banho termostático e OSA. A Figura 4B mostra a fotografia do ensaio da jiga utilizando banho termostático e OSA e a Figura 4C mostra o banho termostático com o sensor no tubo de cobre, em destaque.

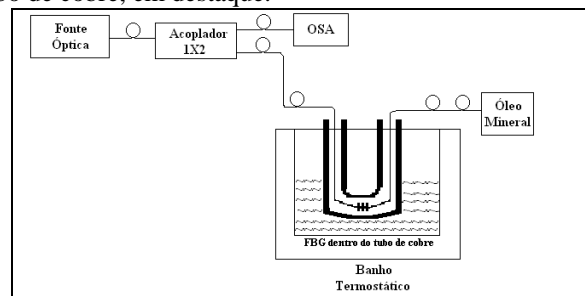


Figura 4A. Diagrama em blocos com banho termostático e OSA.

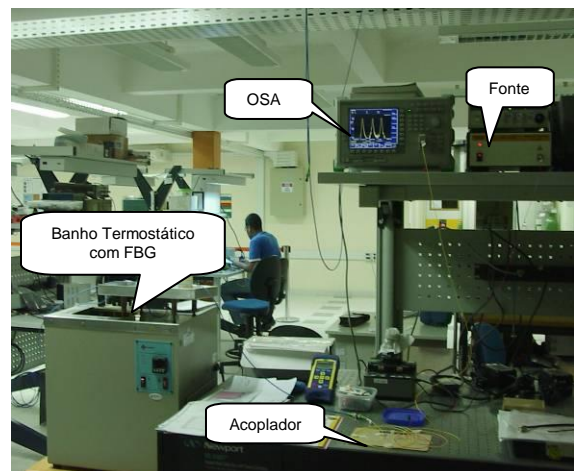


Figura 4B. Fotografia do ensaio na jiga de teste.

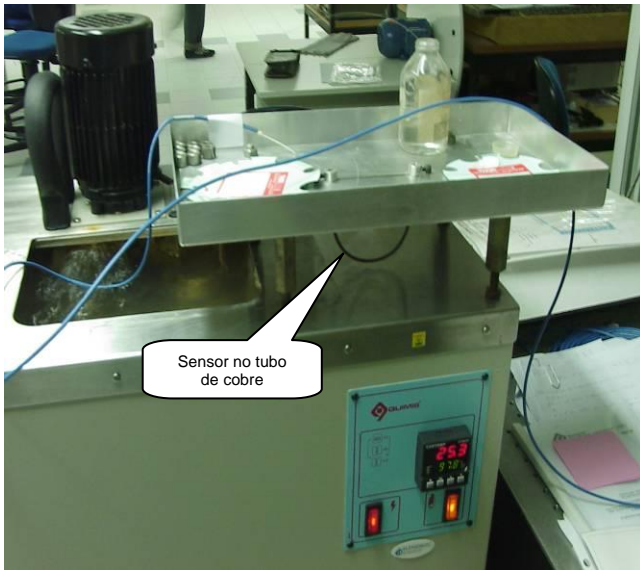


Figura 4C. Fotografia do banho termostático com sensor, em destaque.

A etapa seguinte consistiu em submeter os sensores ópticos a variação térmica usando um agitador térmico, um interrogador óptico portátil (SpectralEye 400-FOS&S) e um micro-industrial, visando otimizar o ensaio. A Figura 5A mostra o diagrama em blocos e a Figura 5B apresenta a fotografia do ensaio.

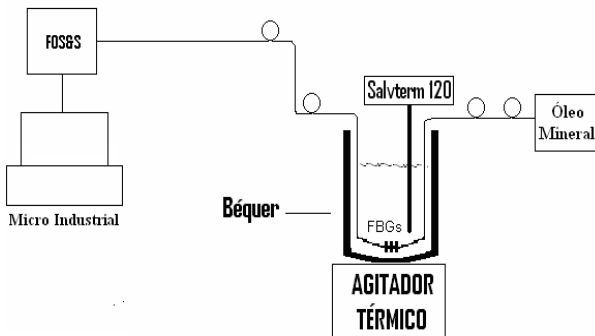


Figura 5A. Diagrama em blocos do ensaio usando agitador térmico, interrogador óptico portátil e micro.



Figura 5B. Fotografia do ensaio mostrando o agitador térmico em destaque, interrogador óptico e micro.

F. Tabela de calibração dos sensores

A partir da caracterização em função da variação térmica, calibramos seis sensores para a temperatura de 25°C, para obter suas respectivas derivadas. Com a variação térmica, ocorre uma variação do comprimento de onda de Bragg, conforme mostrado na Figura 6.

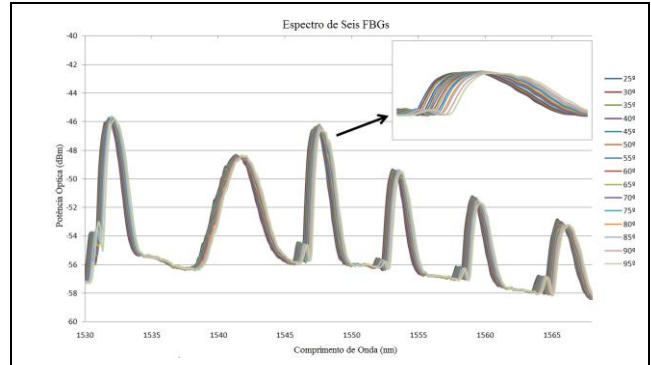


Figura 6. Deslocamento de Bragg em função da temperatura.

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

Tabela 1. Tabela de Calibração dos Sensores

Temperatura	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
25,3	1530,534	1540,667	1547,027	1553,035	1559,063	1565,090
30,00	1530,605	1540,736	1547,085	1553,090	1559,121	1565,145
40,00	1530,724	1540,865	1547,161	1553,200	1559,219	1565,236
50,00	1530,849	1541,019	1547,302	1553,300	1559,341	1565,360
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	1547,584	1553,605	1559,644	1565,643
90,00	1531,190	1541,360	1547,688	1553,715	1559,730	1565,723
Função	$y = 0,0103x + 1530,3$	$y = 0,0116x + 1540,4$	$y = 0,0102x + 1546,8$	$y = 0,0105x + 1552,8$	$y = 0,0108x + 1558,8$	$y = 0,0098x + 1564,8$
Derivada nm °C	0,0103	0,0116	0,0102	0,0105	0,0108	0,0098
Derivada pm °C	10,3	11,6	10,2	10,5	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	1547,0853	1553,0899	1559,1205	1565,1448
40,0 °C	1530,7240	1540,8654	1547,1605	1553,1998	1559,2191	1565,2359
50,0 °C	1530,8452	1541,0190	1547,3016	1553,3002	1559,3407	1565,3495
60,0 °C	1530,9475	1541,1350	1547,3905	1553,3990	1559,4260	1565,4568
70,0 °C	1531,0403	1541,3070	1547,5111	1553,5326	1559,5961	1565,5494
80,0 °C	1531,1408	1541,3373	1547,6837	1553,6046	1559,6442	1565,6428
90,0 °C	1531,1900	1541,3597	1547,6882	1553,7148	1559,7299	1565,7231

III. 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, que faz retornar 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 7A e 7B 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, conforme mostram as fotografias das Figuras 8A e 8B. 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.

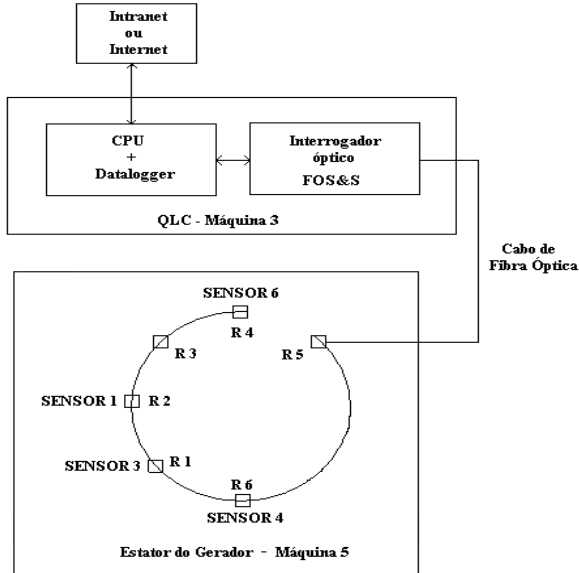


Figura 7A. Diagrama de blocos do sistema.

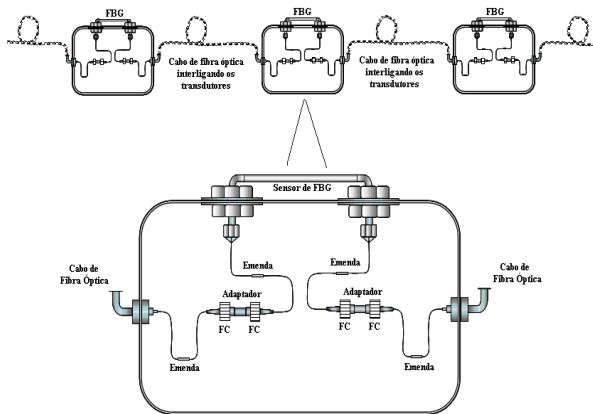


Figura 7B. Diagrama de blocos do encapsulamento dos sensores.



Figura 8A. Encapsulamento do sensor.



Figura 8B. Encapsulamento em destaque.

A. 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.

B. Princípio de operação do interrogador óptico

O diagrama em blocos do circuito óptico do sistema de interrogação é mostrado na Figura 9. 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.

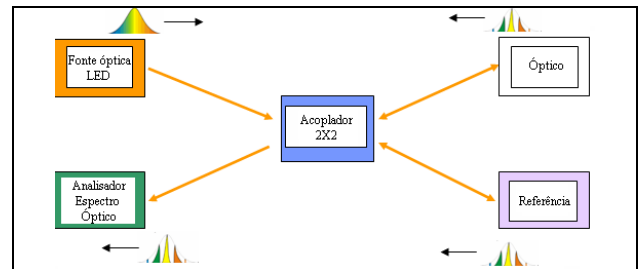


Figura 9. Diagrama em blocos do interrogador óptico.

O hardware do sistema de interrogação é mostrado nas Figuras 10A e 10B através das fotografias frontal e traseira do interrogador óptico.



Figura 10A. Interrogador Óptico (Fotografia frontal).

Figura 10B. Interrogador Óptico (Fotografia traseira).

As Figuras 11, 12, 13 e 14 mostram as janelas do software SpectralEye 400: “Wavelengths”, “Spectrum”, “Temperature” e “Configuration”, respectivamente.

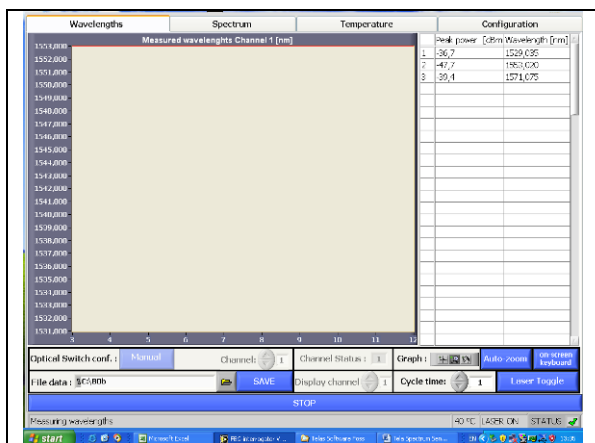


Figura 11. Janela “Wavelengths” apresenta a potência óptica e o comprimento de onda de cada sensor.

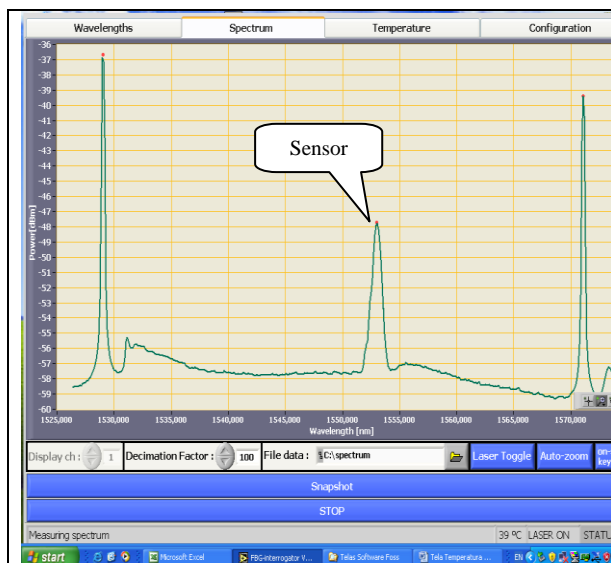


Figura 12. Janela “Spectrum” apresenta o pico de identificação do sensor.

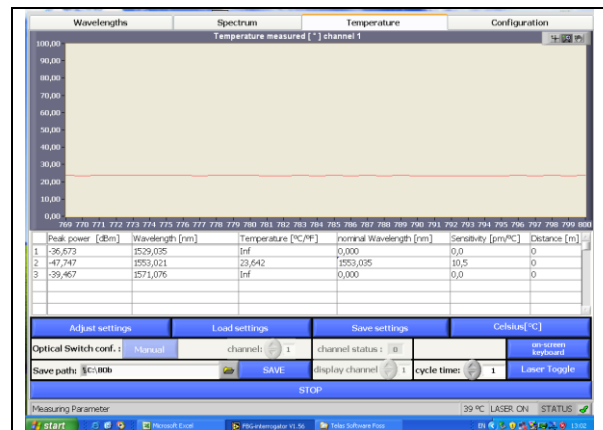


Figura 13. Janela “Temperature” é responsável pela aquisição de dados

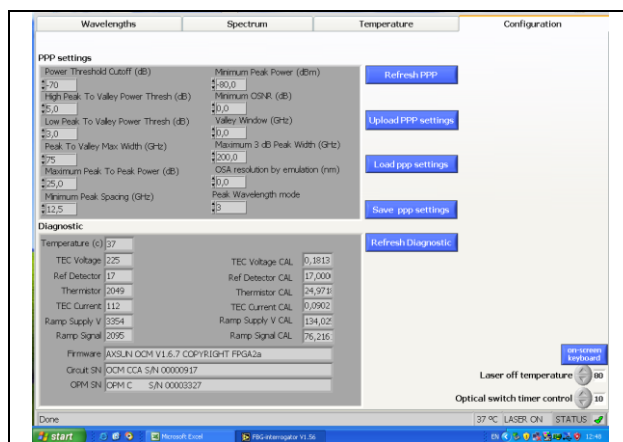


Figura 14. Janela “Configuration” altera os valores de referência dos picos.

C. Roteiro de utilização do interrogador óptico

O seguinte procedimento deve ser adotado para utilização do interrogador óptico: primeiramente, ligar o micro-industrial e o interrogador. Posteriormente, acessar o software do programa e localizar a porta serial. Selecionar a janela “Spectrum” para verificar se todos os sensores estão sendo identificados pelo sistema. Em seguida, calibrar, através da janela “Temperature”, selecionando “Load Settings” para chamar a respectiva tabela de calibração no endereço estabelecido. Por fim, salvar a aquisição de dados, digitando o endereço em “Save path”, finalizando através da tecla “SAVE”. A janela “Configuration” possibilita o reconhecimento de um pico não identificado, através do ajuste de determinados valores de pico.

IV. RESULTADOS

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. Atualmente, a máquina se encontra em operação e o sistema 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 15

mostra o sistema de monitoramento remoto instalado no rack da Máquina 3. Este rack foi escolhido porque a Máquina 3 fica no meio da usina, equidistante das Máquinas 1 e 2 de um lado e das Máquinas 4 e 5 do outro. Assim, quando o sistema for instalado nas outras máquinas haverá uma economia no comprimento dos cabos ópticos que levam os sinais ópticos dos sensores para o demodulador óptico. O sistema consiste de micro-industrial conectado ao sistema de interrogação, que está interligado aos sensores de FBG. Na tela do micro podemos observar quatro sensores ópticos identificados.



Figura 15. Sistema de monitoramento remoto instalado no rack do QLC da Máquina 3.

A Figura 16 mostra o sensor óptico instalado no gerador da Máquina 5.



Figura 16. Sensor óptico instalado no gerador.

A Figura 17 mostra o resultado das medidas com a máquina parada. A Figura 18 apresenta o acompanhamento da temperatura durante a partida da Máquina 5, onde podemos observar a sensibilidade dos sensores. A Figura 19 demonstra a evolução da temperatura da máquina em operação, onde os sensores também apresentaram excelente desempenho em todo período monitorado. A diferença de temperatura apresentada pelos sensores instalados em diferentes seções do gerador, se justifica pelo fato do estator não ter sido construído através de um único tipo de material, além do local também possuir elevado campo magnético nos

distintos pontos que circundam o estator. Portanto, cada seção do estator apresenta temperatura diferenciada, levando ao comportamento observado na Figura 19.

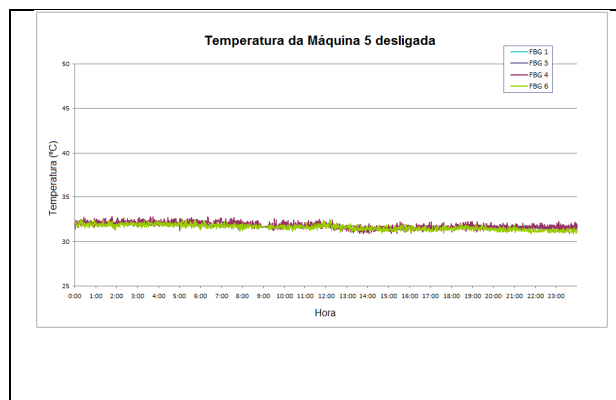


Figura 17. Resultados das medidas dos sensores com a máquina parada.

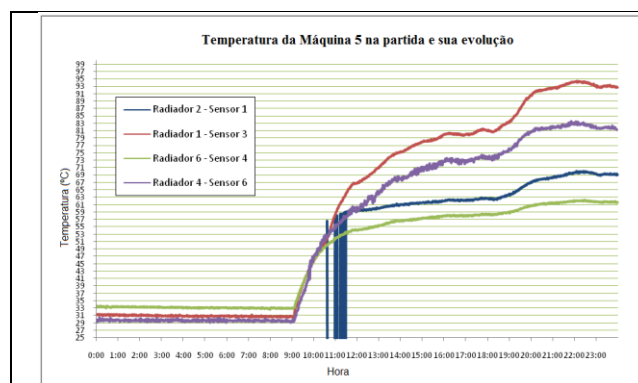


Figura 18. Evolução da temperatura durante a partida da Máquina 5.

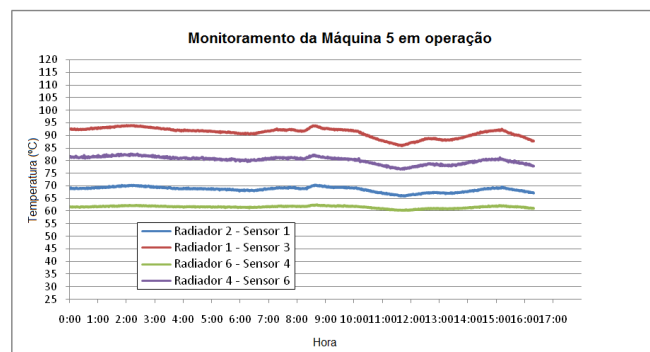


Figura 19. Evolução da temperatura da máquina durante a operação.

Foi realizada uma recalibração em Agosto de 2010, que consistiu na colocação de sensores calibrados (Termopar), bem próximos aos sensores ópticos já instalados. A recalibração teve o objetivo de avaliar o desempenho dos sensores ópticos, visando a validação do sistema.

A Figura 20 mostra a comparação do resultado obtido do monitoramento de temperatura entre o sensor de FBG (Sensor 4) e o sensor calibrado (T2). Podemos observar que os resultados apresentaram um comportamento muito semelhante.

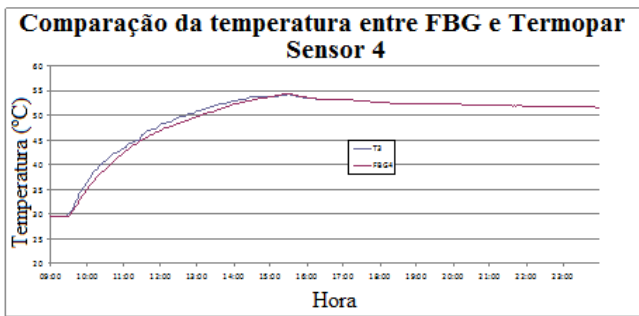


Figura 20. Comparação da temperatura entre FBG (sensor 4) e Termopar (T2).

V. BENEFÍCIOS DO PROJETO

Conforme já mencionado, normalmente utilizam-se hoje, sensores convencionais em todos equipamentos de subestações ou usinas. Estes sensores necessitam de uma caixa próxima que recebe algum tipo de alimentação elétrica (AC ou DC) e contém uma eletrônica que recolhe os sinais, amplifica-os e os envia através de comunicação 4 a 20 mA para cada sensor. Assim, temos dois fios para alimentação e mais dois para o 4 a 20 mA, perfazendo quatro fios por ponto de medida.

Os sensores desenvolvidos neste projeto não necessitam de energia elétrica local e são multiplexados. Portanto, somente um único cabo de fibra óptica interliga todos os sensores com o ponto de monitoramento realizado remotamente. Desta forma, não necessitando da existência de vários sensores distintos, utilizados na UHE de Samuel, para a medida de temperatura de ar quente e ar frio, como podemos observar nas Figuras 21 e 22, respectivamente.



Figura 21. Sensores para medida de ar quente.



Figura 22. Sensores para medida de ar frio.

VI. DIFICULDADES ENCONTRADAS

Quando se trabalha com máquinas em funcionamento no sistema elétrico brasileiro temos que estar atentos ao agendamento das paradas para manutenção dos equipamentos. Normalmente, não se param máquinas apenas para instalações de sistemas voltados para a pesquisa, devido a muitas referente a regras da “Parcela Variável”. Por esta razão, temos que nos ater somente àquelas paradas, que nem sempre são suficientes e apropriadas para as atividades de pesquisa.

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi mostrado um sistema óptico baseado na técnica de 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.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Culshaw, “Fiber Optics in Sensing and Measurement”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n°. 6, pp. 1014-1021, november/december 2000.
- [2] K.O. Hill, G. Meltz, “Fiber Bragg Gratings Technology: Fundamentals and Overview”. *J. Lightwave Technol.*, v. 15. pp. 1263-1276, 1997.
- [3] K. O. Hill, “Photosensitivity in fiber wave-guides: application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, 32, pp. 647-649, 1978.
- [4] H. J. Kalinowski, José Luís Fabris, Márcia Müller, “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] R. Kashyap, *Fiber Bragg Grating*, Academic Press, 1999.
- [6] A. Kersey et al., “Fiber Grating Sensors”. *J. Lightwave Technol.*, v.15, n°.8, pp.1442-1463, 1997.
- [7] D. K. W. Lam and B. K. Garside, “Characterization of single mode optical fiber filters”, *Applied Optics*, 20, pp. 440-445, 1981.
- [8] G. Meltz, W. W. Moorey, W. H. Glenn. “Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method”, *Optics Letters*, v. 14, p. 823-825, 1989.
- [9] A. Othonos, K. Kalli, “Fiber Bragg Gratings - Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”, *Artech House*, 1999.
- [10] C. L. Barbosa et al, “Fabricação e Caracterização de Grades de Bragg através do Uso da Técnica da Máscara de Fase”, *Revista Científica Periódica – Telecomunicações*
- [11] K. O. Hill 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] P. J. Lemaire et al, “High pressure H2 loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO2 doped optical fibres”, *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 1191-1, 1993.
- [13] R. Kashyap, R. Wyatt et al. “Wideband gain attenuated erbium fibre amplifier using a photosensitive fibre blazed grating”, *Electron. Lett.*, vol. 29, pp. 154-6, 1993.
- [14] A. Othonos, and K. Kalli, “Inscribing Bragg Gratings in Optical Fiber”, In “Fiber Bragg Gratings”. *Artech House. Boston.*, USA. Cap. 4, pp. 149-170, 1999.
- [15] Emanuel Carneiro e Frederico Girão, Centro de Massa e Aplicações à Geometria, apresentado na VII Semana Olímpica, Janeiro/2004/UFMG.
- [16] A. S. Paterno, L. V. R. Arruda and H. J. Kalinowski , “Approximation Methods of Optical Spectra: An Analysis of the Application of Constructive RBF Network in Fiber Optic Sensing”, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (periódico da área de redes neurais).

