



**XXIII SNTPEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/18
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**MAPEAMENTO TÉRMICO TRIDIMENSIONAL DE GERADORES ELÉTRICOS DE ALTA POTÊNCIA
EMPREGANDO TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO ÓPTICO DISTRIBUÍDO E QUASE-DISTRIBUÍDO**

**Erlon Vagner da Silva(*), Marcéu Couto dos Santos,
Paulo Ivã Gonçalves Dilli, Paulo Henrique Santos
Feitosa**

TRACTEBEL ENERGIA

**Uilian José Dreyer, Kleiton de Moraes Sousa, José
Rodolfo Galvão, Guilherme Dutra, André Biffe Di
Renzo, Felipe Mezzadri, João Paulo Bazzo, Daniel
Rodrigues Pipa, Cicero Martelli, Jean Carlos
Cardozo da Silva
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ**

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos a partir do projeto desenvolvido pela UTFPR e Tractebel Energia. O objetivo deste é a instrumentação de geradores elétricos de potência empregando sensoriamento óptico distribuído e quase-distribuído. O artigo inicia com a apresentação de técnicas de encapsulamentos para redes de Bragg em fibra óptica que são os elementos sensores instalados nos trocadores de calor e mancais. Os encapsulamentos desenvolvidos para os sensores dos mancais e trocadores de calor foram testados em laboratório demonstrando grande potencial de instalação, considerando robustez mecânica, compatibilidade eletromagnética e características metrológicas. A monitoração do trocador de calor permitiu identificar perdas de eficiência do dispositivo a partir da visualização de um mapa térmico do equipamento gerado por um conjunto de quinze redes de Bragg multiplexadas em comprimento de onda. Na sequência é demonstrada a instrumentação do estator, empregando sistema de sensoriamento distribuído de temperatura (DTS). A principal vantagem dessa abordagem sobre os sensores convencionais é a possibilidade de identificar as variações de temperatura com alta resolução espacial.

PALAVRAS-CHAVE

Gerador elétrico de potência, Instrumentação óptica, Medição distribuída de temperatura, Redes de Bragg.

1.0 - INTRODUÇÃO

Os geradores de potência são suscetíveis a situações adversas que não estão restritas as condições de operação da UHE, fazendo com que sua vida útil seja reduzida. Essas situações fazem com que ocorra, principalmente, uma perda mais elevada nos enrolamentos do gerador (estator e rotor) e por consequência elevação de temperatura acima da prevista para sua operação. Temperatura acima da nominal faz com que os materiais isolantes presentes no gerador apresentem degradação precocemente, ocasionando redução da vida útil do gerador, além de problemas de isolamento que levam a curto circuito na máquina [1].

Dentro dessa perspectiva, o projeto P&D 0403-0028/2012 "Sistema de Monitoração de Temperatura em Geradores Elétricos de Alta Potência Empregando Técnicas de Sensoriamento Óptico Distribuído e Quase-Distribuído", em desenvolvimento por pesquisadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná e por colaboradores da Tractebel Energia, tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoração de temperatura distribuído e quase-distribuído para medição de temperatura nas partes do gerador que mais sofrem desgaste com a elevação de temperatura. Os principais dispositivos a serem monitorados são: trocadores de calor, mancais, rotor e estator. O monitoramento da temperatura em hidro geradores foi relatado em [2] onde foi utilizado um sensoriamento óptico distribuído (DTS) no estator de uma máquina com 200 MVA de potência nominal. Em [3] a temperatura no trocador

Tractebel Energia S.A., UHE Salto Santiago, BR 158 Km 441,5 – CEP 85568-000 – Saudade do Iguaçu, PR, – Brasil

Tel: (+55 46) 3246-8363 – Fax: (+55 46) 3246-8395 – Email: erlon@tractebelenergia.com.br

de calor em um gerador na UHE de Samuel que tem potência instalada de 217 MW e cinco unidades geradoras, foi monitorada com FBG's. A utilização de sensores ópticos baseados nas redes de Bragg em UHE foi relatada também em [6] com um sensor fabricado, calibrado e testado especificamente para monitorar temperatura em mancais de hidro geradores.

As FBG's apresentam algumas características que tornam promissora sua aplicação em máquinas elétricas [6]. Dentre essas características pode-se destacar: imunidade à interferência eletromagnética, os sensores são intrínsecos, são fabricados em sílica material que é inerte quimicamente e possui alta resistividade elétrica; tamanho e peso reduzido, podendo ser instalada em lugares de difícil acesso; rápido tempo de resposta, devido à sua pequena massa; e a multiplexação em comprimento de onda, o que permite a instrumentação de vários pontos ao longo da máquina em apenas uma fibra óptica.

Os resultados apresentados neste trabalho são provenientes da instrumentação do estator e do trocador de calor do gerador da Usina Hidrelétrica de Salto Osório. Os resultados da instrumentação do estator provêm da técnica de sensoriamento distribuído. Para isso é utilizada uma fibra óptica instalada nas orientações horizontal e vertical do estator. Para o trocador de calor é utilizado o sensoriamento quase-distribuído, onde 15 FBG's multiplexadas em comprimento de onda são fixadas na parte externa do trocador de calor. É apresentado ainda o projeto de um encapsulamento do sensor óptico que será instalado nos mancais do gerador. Por fim, o encapsulamento das FBG's que será utilizado para o sensoriamento quase-distribuído do estator é apresentado.

O artigo está organizado da seguinte forma, na Seção 2.0 é apresentada a teoria das FBG's e da monitoração com DTS. A Seção 3.0 apresenta os resultados do mancal e do trocador de calor, além do desenvolvimento da ponta de prova e sua posterior calibração. O resultado da instalação do DTS em um gerador com o imageamento térmico é apresentado na Seção 4.0. Na Seção 5.0 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

2.0 - SENSORIAMENTO ÓPTICO QUASE-DISTRIBUÍDO E DISTRIBUÍDO

2.1 Redes de Bragg em fibra óptica

A rede de Bragg em fibra óptica, ou simplesmente FBG (*Fiber Bragg Grating*), é constituída a partir da modulação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, com índice efetivo denominado n_{ef} [7]. Os planos paralelos com periodicidade Λ de maior e menor índice de refração formam uma rede de difração, conforme apresentado na Figura 1(b) o comprimento de onda próximo ao centro do espectro refletido λ_B , chamado de comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação:

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

A Figura 1(a) apresenta a ilustração de uma fibra óptica onde três FBG's são gravadas em seu núcleo. Cada uma das FBG's possui uma periodicidade Λ diferente, o que ocasiona um comprimento de onda de Bragg λ_B diferente para cada uma delas. Quando a condição de Bragg (1) é satisfeita, a contribuição da luz refletida por cada plano da rede contribui construtivamente na direção contra-propagante, formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede [8]. O comprimento de onda de Bragg λ_B apresenta dependência de dois parâmetros, índice de refração efetivo e periodicidade da rede. A mudança de um desses dois parâmetros provenientes de interferências externas faz com que haja deslocamento $\Delta\lambda_B(l, T) = (2)$ no valor de λ_B . As alterações mecânicas e térmicas do meio são relacionadas com o deslocamento $\Delta\lambda_B$ através da expressão:

$$\Delta\lambda_B(l, T) = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial l} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{ef}}{\partial T} + n_{ef} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T. \quad (2)$$

O primeiro termo em (2) está associado ao deslocamento de λ_B devido à alteração do índice de refração, e o segundo termo em (2) o deslocamento de λ_B está associado ao coeficiente de expansão térmica da fibra e ao coeficiente termo óptico, sendo que o coeficiente termo óptico é predominante sobre o coeficiente de expansão térmica da fibra. Assim, a FBG apresenta sensibilidade cruzada à deformação mecânica e à temperatura. Ou seja, quando a FBG está sujeita tanto a variações de temperatura quanto deformação mecânica deve-se utilizar alguma forma para que a FBG não sofra deformações mecânicas, sendo necessária a utilização de algum tipo de encapsulamento conforme apresentado nas Seções 3.0 e 4.0.

2.2 Princípio de funcionamento do DTS

O princípio de funcionamento de um equipamento DTS, baseado no espalhamento de Raman, pode ser compreendido pelo esquemático da Figura 1(c). O equipamento DTS emite um pulso de laser de curta duração (na ordem de nanossegundos) em uma fibra óptica e analisa o espectro da luz espalhada no sentido contra-propagante através de um fotodetector [9]. A Figura 1(c) também mostra os principais componentes do espectro da luz espalhada: Rayleigh, Brillouin e Raman. No entanto, apenas os componentes do espectro de Raman são considerados. O espalhamento Raman é gerado pela interação entre o feixe de luz e as vibrações das moléculas de vidro, onde cada elemento (SiO_2 , GeO_2 , etc.) tem a sua contribuição para o espectro, em termos de número e localizações dos picos, além da intensidade óptica. Portanto, o espectro de Raman depende da composição física da fibra óptica utilizada como elemento sensor.

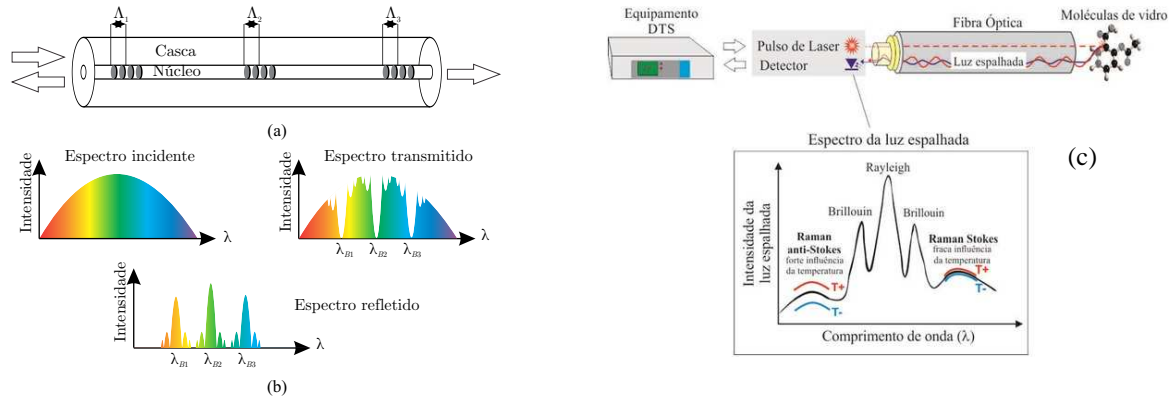


FIGURA 1 - Representação de três FBGs no núcleo de uma fibra óptica (a) fibra óptica e (b) espectros associados. (c) Esquema básico de um equipamento DTS baseado em espalhamento Raman.

De um modo geral, as técnicas utilizadas na calibração do DTS são baseadas na razão entre a potência de Stokes e anti-Stokes em um determinado ponto da fibra. Segundo a técnica sugerida por Soárez *et al.*, as variações das bandas de Raman são convertidas em temperatura de acordo com (3) [10]:

$$T(z) = \frac{\gamma}{\ln[C] - \ln\left[\frac{P_s(z)}{P_{as}(z)}\right] + \Delta\alpha}, \quad (3)$$

na qual $T(z)$ é a temperatura em (K) na posição $z(m)$ ao longo da fibra; $\gamma = \Delta E / k(K)$ sendo ΔE (J) a diferença de energia entre um fóton no comprimento de onda do laser incidente e um fóton do espalhamento do Raman, e k a constante de Boltzmann; C é um parâmetro de calibração dependente do comprimento do laser incidente, dos sinais de Raman, do fotodetector do instrumento, e das condições de operação do equipamento; $P_s(z)$ e $P_{as}(z)$ representam a potência das bandas Stokes e anti-Stokes na posição $z(m)$, respectivamente; por fim, $\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_{as}$ (m^{-1}) é a diferença de atenuação entre a potência dos sinais Stokes e anti-Stokes.

No entanto, para garantir a precisão das medidas o DTS depende de um parâmetro conhecido como resolução espacial. Este parâmetro é geralmente dado em metros, e define um comprimento mínimo que a fibra óptica precisa ser sensibilizada para garantir a precisão das medidas. Geralmente, os sistemas Raman DTS comerciais, incluindo o equipamento utilizado para instrumentação do estator, tem uma resolução espacial de 1 m [9]. Desse modo cada metro de fibra óptica pode ser considerado com um ponto ou zona de medição.

Equipamentos DTS tem grande potencial para o monitoramento de temperatura de grandes estruturas, pois fornece diversos pontos de medição com a instalação de apenas um sensor, neste caso uma fibra óptica. Além disso, estes sensores podem garantir medidas precisas, mesmo para grandes comprimentos de cabo óptico, na ordem de quilômetros. A imunidade eletromagnética também favorece aplicações nas áreas de geração e transmissão de energia elétrica. Tais características motivaram o emprego do DTS para monitorar a temperatura do estator do gerador hidrelétrico [11]. Nesta aplicação a fibra óptica utilizada como sensor é fixada na superfície do estator. Os diversos pontos de medição espalhados pela superfície do estator permitem gerar a imagem térmica da estrutura. Os detalhes da metodologia utilizada para o imageamento térmico do estator com o DTS são apresentados na Seção 5.0.

3.0 - MONITORAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR E MANCAIS

Nas subseções 3.1 e 3.2 serão apresentados os encapsulamentos e os resultados obtidos dos sensores ópticos projetados para o monitoramento de temperatura dos mancais e trocadores de calor que complementam o mapeamento térmico do gerador.

3.1 Encapsulamento e calibração dos sensores para os trocadores de calor e mancais

Para a instrumentação dos trocadores de calor e mancais foi utilizado basicamente o mesmo encapsulamento. As redes de Bragg foram encapsuladas com um tubo de aço inoxidável com 1/8" de diâmetro. A Figura 2(a) e (b) apresentam o encapsulamento do sensor projetado para o mancal e trocador de calor respectivamente. Os sensores ópticos, do mancal e trocador de calor, são construídos com o mesmo tipo de aço inoxidável para encapsular a fibra óptica. A diferença entre eles é que o encapsulamento do sensor para o mancal foi preenchido com óleo de silicone para melhorar a transferência de calor.

O sistema de calibração das redes é apresentado no diagrama da Figura 2(b). O sensor óptico (SO) e o PT100 modelo 5609 da FLUKE® estão colocados dentro de um tubo de cobre através do qual é bombeado fluido vindo do banho térmico (BT) da Lauda modelo ECO GOLD RE415G. Enquanto o fluxo é mantido, o multímetro digital Agilent 34420A (MD) e o interrogador óptico (IO) SI 101 da HBM estão monitorando o PT100 e as redes de Bragg respectivamente. Todos esses componentes são conectados a um computador (CP) e controlados por uma interface em LabVIEW®. A partir desse sistema é realizada a calibração e os testes em laboratório já efetuando o

cálculo das incertezas relacionadas a cada FBG [25].

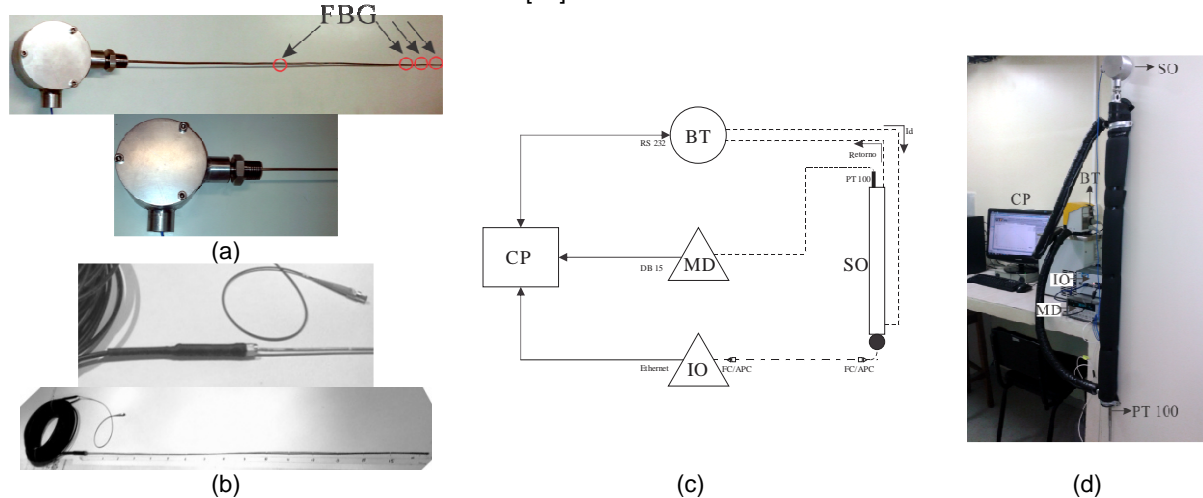


FIGURA 2 – Fotografias dos encapsulamentos utilizados para o sensor (a) do mancal e (b) trocador de calor. Diagrama funcional do sistema de calibração (c) e fotografia do sistema instalado em laboratório (d).

O processo de calibração consiste de quatro repetições de 10 °C até 80 °C, com degraus de 10 °C e tempo o de estabilização de 15 min conforme apresentado em [5]. Os coeficientes das funções ajustadas apresentados na Tabela I são aproximadamente iguais para todas as redes multiplexadas em cada sensor óptico. Depois do processo de calibração o sensor do mancal foi submetido a testes em laboratório, um deles com duração de 12 h com ciclos térmicos de três patamares. O sensor do trocador de calor foi para a UHE Salto Osório para monitorar a temperatura em um trocador de calor.

Tabela I. Dados da calibração dos sensores ópticos

Sensor	Coefficientes da função ajustada	Incerteza
Mancal	$\alpha = 1.1 \times 10^{-5} \text{ pm}^2 / ^\circ\text{C}^2$ $\beta = 8,9 \text{ pm} / ^\circ\text{C}$	0,47 °C
Trocador de calor	$\beta = 9,9 \text{ pm} / ^\circ\text{C}$	0,68 °C

3.2 Resultados obtidos com os sensores dos trocadores de calor e mancais

O mesmo sistema de calibração foi utilizado para os testes em laboratório com a intenção de aplicar degraus de temperatura e comparar as medições realizadas pelas FBG's com o PT100. Os ciclos térmicos foram de 15 °C até 75 °C durante 24 horas. Cada patamar de temperatura visa representar uma situação de operação no gerador: 15 °C desligado, 35 °C compensador síncrono, 55 °C operação normal e 75 °C sobrecarga, uma vez que o gerador é desligado quando a temperatura do óleo no mancal guia da turbina alcança 70 °C, por exemplo. Na Figura 3(a) o detalhe A apresenta um período de tempo no qual a temperatura ficou estável e pode-se comparar a medição da rede de Bragg com o PT100, aparecendo uma diferença entre eles menor que a incerteza calculada para as redes de Bragg apresentada na Tabela I.

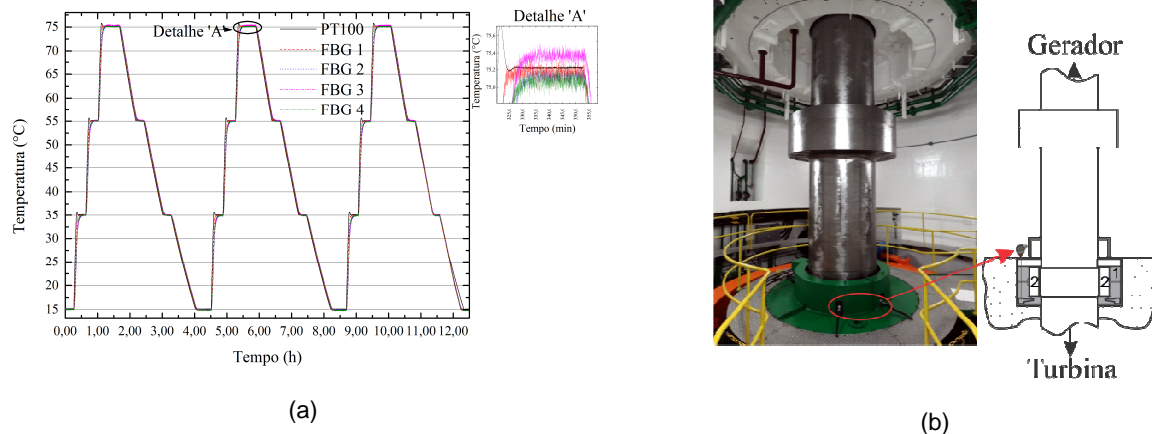


FIGURA 3 – Resultado dos ciclos térmicos obtidos em laboratório para o sensor do mancal (a). Local da instalação comparado com o desenho esquemático do mancal guia da turbina (b).

O mancal que será monitorado na UHE é apresentado na Figura 3(b) e os detalhes 1 e 2 representam o óleo lubrificante e o metal da sapata respectivamente. O óleo lubrificante tem o papel de diminuir o atrito entre sapata e eixo sendo sua temperatura e do metal da sapata bons indicadores do funcionamento da máquina. Já o sensor óptico instalado no trocador de calor (Figura 4(a)) foi colocado do lado de fora do estator para monitorar a temperatura do ar impulsionado pelo rotor e que passa através do trocador de calor.

Para entender melhor a distribuição de temperatura do trocador de calor a Figura 4(b) apresenta uma comparação entre as quinze redes de Bragg. Desta forma foi possível analisar a diferença de temperatura com relação ao valor médio absoluto de cada FBG e informar se há uma diferença abrupta que possa levar à conclusão que o trocador de calor não está funcionando adequadamente. Na Figura 4(c) pode ser visto que a décima quinta rede, que corresponde à rede localizada na porção mais inferior do trocador de calor, está sempre operando em uma temperatura 3 °C acima da média. Isso pode ser uma indicação que existam depósitos de materiais que estão impedindo o fluxo adequado de água, concentrando o calor naquela região. As FBG's que estão operando em uma região mais fria não excedem 2 °C abaixo da média no sensor, pois nesse lugar existe um grande fluxo de água.

Dados de diferenças do valor médio das medidas foram utilizados para produzir o mapa térmico da Figura 17, onde quinze redes compõem o eixo das abscissas, e o tempo de duração dessa medição compõe o eixo das ordenadas. Desta forma foi possível entender visualmente a distribuição de temperatura local no trocador de calor e a posição de possíveis falhas no equipamento.

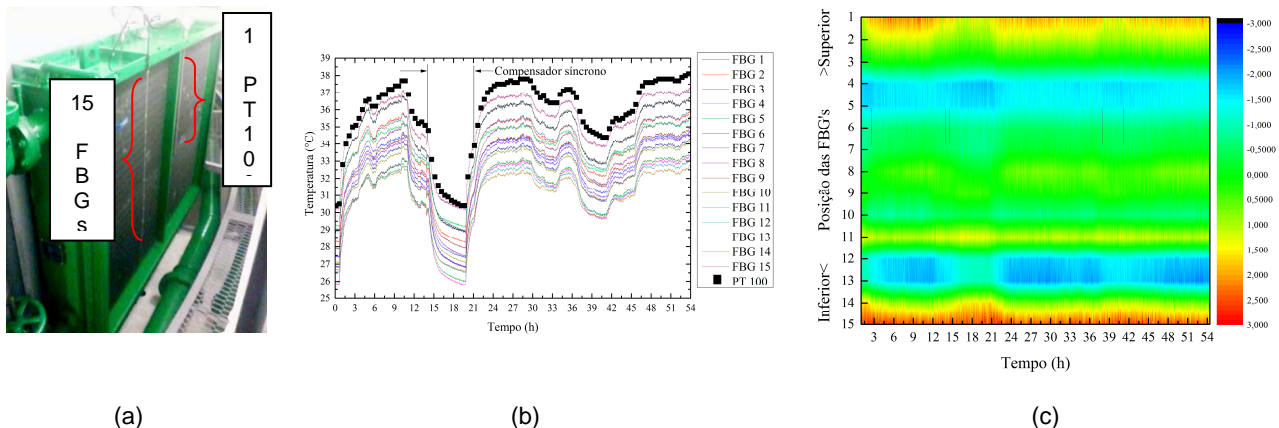


FIGURA 4 – (a) Disposição do sensor óptico instalado no trocador de calor e o sensor PT100 com um ponto sensor. (b) Gráfico da temperatura absoluta medida pelas FBG's instaladas no trocador de calor comparadas com o PT100 instalado. (c) Mapa térmico demonstrando a distribuição de temperatura no trocador de calor no período de 54 h. As regiões vermelhas evidenciam o mau funcionamento do equipamento causado possivelmente por incrustações que modificam a circulação de água pela tubulação.

4.0 - IMAGEAMENTO TÉRMICO DO ESTATOR EMPREGANDO O DTS

O método para imageamento térmico do estator empregando o DTS foi testado em um gerador de 200 MVA da usina hidrelétrica de Salto Osório. A Figura 5(a) mostra um esquemático dos principais componentes da instrumentação. Para fixar a fibra foi utilizada uma resina polimérica eletroisolante, que não interfere na operação

do gerador [11]. Um cordão óptico com acesso externo à cabine foi utilizado para realizar a comunicação entre o sensor e equipamento DTS. Para essa aplicação foi utilizado um DTS baseado em espalhamento Raman, modelo AP Sensing® N4385B. As informações de temperatura são processadas por um software desenvolvido em LabVIEW® para gerar a imagem térmica do estator. O princípio de funcionamento do software de imageamento é apresentado na Figura 5(b), o qual utiliza como base o modelo 3D do estator e a posição em que o sensor foi fixado na estrutura. Os resultados foram obtidos durante um teste com duração de 22 horas, começando às 16 horas do primeiro dia, e terminando às 14 horas do dia seguinte. Durante esse período, o gerador foi acionado duas vezes em modo de compensação. O desempenho do sistema também foi avaliado para dois tipos de instalação. Em uma das instalações a fibra óptica foi fixada na superfície do estator com orientação horizontal perpendicular às ranhuras, como mostra a Figura 5(c). Na outra instalação a fibra foi fixada com orientação vertical, no sentido paralelo às ranhuras, como mostra a Figura 5(d). A razão principal de utilizar dois tipos de instalação é avaliar qual das orientações oferece maior vantagem em relação à resolução da imagem e praticidade de manutenção.

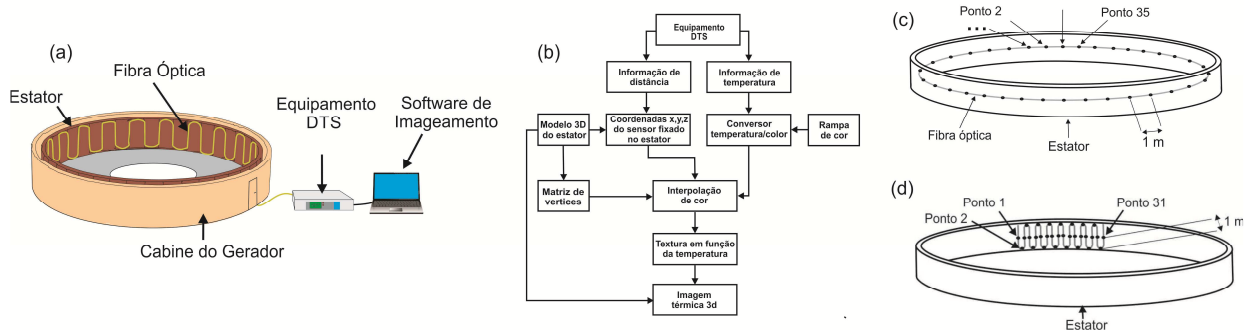


FIGURA 5 – (a) Esquemático da instalação do sistema de imageamento do estator empregando DTS. (b) Diagrama de blocos do princípio de funcionamento do software de imageamento. (c) Esquemático da instalação horizontal. (d) Esquemático da instalação vertical.

As imagens térmicas do estator para as instalações horizontal geradas durante o ensaio de 22 horas são apresentadas pela Figura 6. O *software* mostrou bom desempenho e não exigiu grandes recursos computacionais para gerar as imagens de acordo com informações de temperatura fornecidas pelo DTS. As Figuras 6(a) e (b) apresentam as imagens térmicas do estator às 18 horas do primeiro dia, quando o gerador estava operando com 178 MW. Nessa condição a temperatura média foi de 54 °C. Já as Figuras 6(c) e (d) apresentam as imagens térmicas obtidas às 20 horas. Nesse horário o gerador completava 1 hora de operação em modo compensação, e a temperatura caiu para 45 °C. As Figuras 6 (f) e (g) apresentam as imagens geradas às 7 horas do dia seguinte. Nesse momento o gerador estava operando pela segunda vez em modo de compensação, completando 8 horas de operação sem gerar potência ativa e a temperatura atingiu valor mínimo de 41 °C.

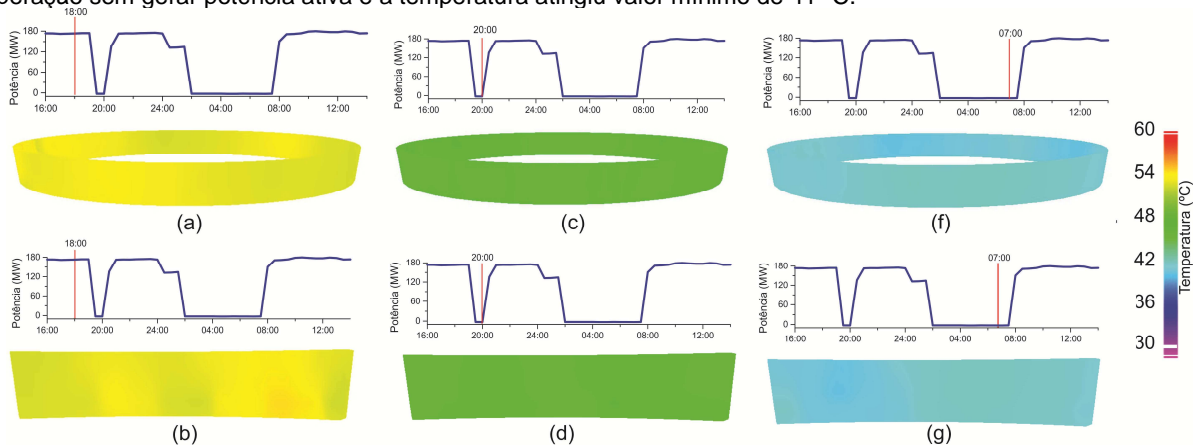


FIGURA 6 – Imagens térmicas geradas durante o teste de 22 horas (a) Instalação horizontal às 18 horas. (b) Instalação vertical às 18 horas. (c) Instalação horizontal às 20 horas. (d) Instalação vertical às 20 horas. (f) Instalação horizontal às 07 horas do dia seguinte. (g) Instalação vertical às 7 horas do dia seguinte.

Os resultados da instalação horizontal mostraram que mesmo utilizando apenas 35 m de fibra óptica, que resultaram em 35 pontos de medição, foi possível gerar imagens que permitem monitorar a temperatura média do estator durante diferentes condições de operação do gerador. No entanto, o número de pontos não é suficiente para identificar falhas em qualquer parte da estrutura. Os resultados da instalação vertical indicam que mesmo aumentando o número de pontos de medição em uma parte da estrutura, as imagens obtidas foram semelhantes às geradas pela instalação horizontal. Isso porque as diferenças de até 3 °C entre os diferentes pontos de medição não são facilmente observadas. No entanto, o maior número de pontos de medição pode facilitar a identificação de

pontos quentes gerados pelo desgaste do material de isolamento elétrica. Outro fato é que a instalação óptica vertical segue a mesma orientação das barras presentes em cada ranhura, que são a principal fonte de geração de calor devido ao efeito Joule nos condutores [11].

5.0 - CONCLUSÃO

O projeto P&D está em sua fase final com metas importantes alcançadas, dentre elas o mapeamento térmico do estator e trocador de calor e o desenvolvimento de novos encapsulamentos para redes de Bragg. O potencial de integração de sensores baseados em redes de Bragg em fibra óptica com novos encapsulamentos e a monitoração com uma técnica de monitoração distribuída foi investigada experimentalmente tanto em laboratório quanto na unidade geradora da UHE.

Na monitoração do trocador de calor foi constatado que a temperatura das partes monitoradas é completamente relacionada com a etapa de funcionamento do gerador. As análises apresentadas podem indicar a condição de operação dos equipamentos e os resultados demonstraram que a técnica de monitoração empregada com 15 redes de Bragg é uma potencial ferramenta para a manutenção preditiva com alta eficiência para monitorar continuamente as instalações em uma UHE. O novo encapsulamento apresentado para a monitoração de temperatura dos mancais foi testada em laboratório durante 12 horas com valores de temperatura que representam diferentes condições de trabalho do gerador. O resultado do monitoramento em laboratório aponta para um sensor com qualidade metrológica dentro dos padrões almejados para o monitoramento de temperatura em mancais.

Os resultados obtidos através da monitoração de temperatura com o aparelho DTS, em um gerador de 200 MVA em operação, demonstraram a viabilidade do sistema de imageamento térmico para monitorar a distribuição de temperatura na superfície do estator. Na comparação entre os resultados obtidos a partir das duas formas de instalar a fibra óptica no estator, nota-se que ambas mostraram eficiência para detectar a variação da temperatura em função da potência do gerador. No entanto, a instalação com orientação vertical proporciona maior resolução para monitorar os enrolamentos do estator, pois concentra um maior número de pontos de medição quando comparado com a instalação horizontal.

O monitoramento constante de toda a estrutura do gerador pode ser uma ferramenta fundamental de manutenção preditiva para garantir o desempenho e a disponibilidade operacional do gerador. Como trabalhos futuros pretende-se realizar a instalação completa com a orientação vertical da fibra óptica no estator do gerador, e novos testes com a duração mínima de 60 dias. Mancais e trocadores de calor também serão monitorados durante período indeterminado de forma complementar ao sistema de medição de temperatura convencional utilizado atualmente na UHE. Os resultados apresentados neste artigo provêm de três inventos registrados junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI): sensor óptico para mancais BR1020140030697 [14], método para o monitoramento de temperatura aplicando sensores distribuídos no estator BR1020150020619 [15] e método de imageamento térmico aplicando sensores distribuídos BR1020150020627 [16].

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, no. 5, pp. 15–20, 1998.
- [2] F. Mezzadri, C. Martelli, E. V. Silva, J. P. Bazzo, and J. C. C. Silva, "175MW Hydroelectric Generator Stator Surface Temperature Monitoring using a DTS System," *IEEE Sens. J.*, pp. 2–3, 2014.
- [3] M. M. Werneck, R. C. S. B. Allil, and B. a. Ribeiro, "Fiber Bragg grating temperature sensing system for large air cooled hydrogenerators," *2011 Fifth Int. Conf. Sens. Technol.*, pp. 329–334, Nov. 2011.
- [4] U. J. Dreyer, E. V. Silva, A. Biffe de Renzo, V. Oliveira, D. R. Pipa, H. J. Kalinowski, C. Martelli, and J. C. Cardozo da Silva, "Quasi-Distributed Temperature Measurement for Hydroelectric Generators Bearings via use of Fiber Bragg Gratings," in *Latin America Optics and Photonics Conference*, 2014, p. LF2B.4.
- [5] U. J. Dreyer, A. B. Di Renzo, V. de Oliveira, H. J. Kalinowski, C. Martelli, I. de L. Jr., J. C. C. da Silva, and E. Vagner, "Sensor de Fibra Ótica para Monitoração de Mancais de Gerador Elétrico de 180 MW," in *MOMAG 2014 - Curitiba*, 2014, pp. 1054–1057.
- [6] K. D. M. Sousa, A. A. Hafner, H. J. Kalinowski, and J. C. C. Silva, "Determination of Temperature Dynamics and Mechanical and Stator Losses Relationships in a Three-Phase Induction Motor Using Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 10, pp. 3054–3061, 2012.
- [7] A. D. Kersey, M. a. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. a. Putnam, and E. J. Friebele, "Fiber grating sensors," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [8] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341, 1997.
- [9] A. Ukil, H. Braendle, and P. Krippner, "Distributed temperature sensing: Review of technology and applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 885–892, 2012.
- [10] G. Yilmaz and S. E. Karlik, "A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 125, no. 2, pp. 148–155, Jan. 2006.
- [11] J. P. Bazzo, F. Mezzadri, C. Martelli, E. W. Silva, D. R. Pipa, and J. C. Cardozo da Silva, "Temperature Sensing of High Power Generator Stator using DTS," in *Advanced Photonics*, 2014, p. JTU3A.68.
- [12] A. A. G. Jr and A. R. de Sousa, *Fundamentos de metrologia científica e industrial*, 1st ed. Barueri SP: Manole, 2008, p. 403.
- [13] Immetro, *GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição*. 2008, p. 141.

- [14] J. C. C. da Silva, U. J. Dreyer, E. V. da Silva, J. P. Bazzo, V. de Oliveira, H. J. Kalinovski, and C. Martelli, "Transdutor a Fibra Ótica Baseado em Redes de Bragg Estáveis em Alta Temperatura para o Monitoramento Térmico de Mancais e Radiadores em Geradores de Energia Elétrica," BR10201400306972014.
- [15] J. C. C. da Silva, C. Martelli, J. P. Bazzo, F. Mezzadri, E. V. da Silva, M. C. dos Santos, P. H. S. Feitosa, and P. I. G. Dilli, "Método para monitoramento de temperatura com sensores distribuídos em estatores de geradores," BR10201500206192015.
- [16] J. C. C. da Silva, C. Martelli, J. P. Bazzo, F. Mezzadri, E. V. da Silva, M. C. dos Santos, P. H. S. Feitosa, and P. I. G. Dilli, "Método para imageamento térmico do estator de um gerador empregando sensores distribuídos," BR10201500206272015.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Tractebel Energia: Erlon Vagner da Silva, Marcéu Couto dos Santos, Paulo Ivã Gonçalves Dilli, Paulo Henrique Santos Feitosa;

UTFPR – Grupo de Pesquisa “Tecnologia de Sensores e Medição”: Uilian José Dreyer (Doutorando), Kleiton de Moraes Sousa (Doutorando), José Rodolfo Galvão (Mestrando), Guilherme Dutra (Doutorando), André Biffe Di Renzo (Graduando), Felipe Mezzadri (Doutorando), João Paulo Bazzo (Doutorando), Daniel Rodrigues Pipa (Professor - UTFPR), Cicero Martelli (Professor - UTFPR), Jean Carlos Cardozo da Silva (Professor - UTFPR).