

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/281066371>

# Medição de Temperatura Utilizando Sensoriamento Óptico Distribuído e Quase-Distribuído em Geradores Elétricos de Potência

Conference Paper · August 2015

DOI: 10.13140/RG.2.1.4589.2324

CITATIONS

0

READS

636

16 authors, including:



**Erlon Vagner Silva**

Federal University of Technology - Paraná/Brazil (UTFPR)

29 PUBLICATIONS 164 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Uilian José Dreyer**

Federal University of Technology - Paraná/Brazil (UTFPR)

54 PUBLICATIONS 220 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Kleiton Sousa**

Federal University of Technology - Paraná/Brazil (UTFPR)

42 PUBLICATIONS 400 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Guilherme Dutra**

Federal University of Technology - Paraná/Brazil (UTFPR)

30 PUBLICATIONS 109 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

# Medição de Temperatura Utilizando Sensoriamento Óptico Distribuído e Quase-Distribuído em Geradores Elétricos de Potência

Erlon da Vagner Silva, Marcéu Couto dos Santos, Paulo Ivã Gonçalves Dilli, Paulo Henrique Santos Feitosa, Uilian José Dreyer, Kleiton de Moraes Sousa, José Rodolfo Galvão, Guilherme Dutra, André Biffe Di Renzo, Felipe Mezzadri, João Paulo Bazzo, Daniel Rodrigues Pipa, Valmir de Oliveira, Hypolito José Kalinowski, Cicero Martelli, Jean Carlos Cardozo da Silva

**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. 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.

## I. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira apresenta uma dependência de fontes hídricas de geração de energia, a partir de usinas hidrelétricas (UHE), que responde por mais de 65% de toda a energia produzida no país. Isso representa um total de aproximadamente 85 GW de potência. Nos últimos trinta e cinco anos, a capacidade instalada para este tipo de energia aumentou em aproximadamente 600%, porém a demanda aumentou em igual ritmo devido ao crescimento econômico nacional. Estudos apontam que a demanda ultrapassará o regime de geração em 2025, exigindo desta forma grandes

investimentos para este setor [1]. Desta forma, o Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE, estima um montante de investimento na ordem de US\$ 168 bilhões até 2030, sendo destes a parcela referente à geração hidráulica na ordem de US\$ 117 bilhões (70%).

Sendo assim essas usinas devem gerar energia de forma ininterrupta por longos períodos antes de uma manutenção preventiva do sistema de geração. Das partes do sistema de geração presentes, o gerador de potência possui uma grande importância, já que é ele que realiza a conversão de energia mecânica proveniente da turbina hidráulica em energia elétrica. Todavia, 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. Como exemplo, pode-se citar alimentação de cargas desbalanceadas, curto circuito na linha de transmissão, condições de sub e sobre excitações. Essas situações fazem com que ocorra, principalmente, uma perda mais elevada nos enrolamentos do gerador (estator e rotor) e por consequência uma 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 [2].

Deve-se ainda garantir que sistemas de refrigeração do gerador operem de maneira satisfatória. Apesar da importância do sistema de refrigeração para o gerador, poucos recursos são alocados para o monitoramento do mesmo. É comum nas plantas de geração hidráulica a utilização de sensores de temperatura do tipo resistência elétrica (RTD – *Resistance Temperature Detector*) ou termopares, aplicados pontualmente, um à montante e outro à jusante, do trocador de calor, de forma a se verificar o gradiente térmico provido pelo equipamento, que de forma generalizada, representa sua capacidade calorífica.

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 gera-

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado na cidade de Costa de Saúpe/BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015.

Projeto desenvolvido no âmbito do Programa de P&D da Tractebel Energia regulamentado pela ANEEL (P&D 0403-0028/2012).

E. V. da Silva, M. C. dos Santos, P. I. G. Dilli e P. H. S. Feitosa trabalham na Tractebel Energia (erlon@tractebelenergia.com.br). U. J. Dreyer, K. M. Sousa, J. R. Galvão, G. Dutra, André B. Renzo, F. Mezzadri, J. P. Bazzo, D. R. Pipa, V. Oliveira, H. J. Kalinowski, C. Martelli e J. C. C. Silva trabalham na Universidade Tecnológica Federal do Paraná. E-mail para contato: J. C. C. Silva (jeancs@utfpr.edu.br) e C. Martelli (cmartelli@utfpr.edu.br).

dor 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 [3] onde foi utilizado um sensoriamento óptico distribuído (DTS) no estator de uma máquina com 200 MVA de potência nominal. Para o estator também foram utilizadas redes de Bragg em fibra óptica [4]. Em [5] a temperatura no trocador de calor em um gerador na UHE de Samuel que tem potência instalada de 217 MW e cinco unidades geradoras [6], foi monitorada com a utilização de um protótipo baseado em redes de Bragg em fibra óptica. A utilização de sensores ópticos baseados nas redes de Bragg em UHE foi relatada também em [7], [8] com um sensor fabricado, calibrado e testado especificamente para monitorar temperatura em mancais de hidro geradores.

As redes de Bragg em fibra óptica apresentam algumas características que tornam promissora sua aplicação em máquinas elétricas [9]. 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. Para desenvolvimento do encapsulamento foram necessários testes para determinação das características térmicas e de deformação mecânica das resinas empregadas. Para os testes das resinas foram desenvolvidos experimentos em laboratório a fim de verificar suas condições de operação.

O artigo está organizado da seguinte forma, na Seção II é apresentada a teoria das FBG's e da monitoração com DTS. A Seção III apresenta os resultados do encapsulamento desenvolvido com resina polimérica. Os resultados do mancal e do trocador de calor, além do desenvolvimento da ponta de prova e sua posterior calibração são apresentadas na Seção IV. O resultado da instalação do DTS em um gerador com o imageamento térmico é apresentado na Seção V. Na Seção VI são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## II. SENSORIAMENTO ÓPTICO QUASE-DISTRIBUÍDO E DISTRIBUÍDO

Nesta seção são abordadas as fundamentações teóricas do sistema de medição quase-distribuído, aplicado na monito-

ração de mancais e trocadores de calor, e distribuído que foi aplicado na monitoração de estatores dos geradores.

### A. 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  $n_{ef}$ . A alteração no índice é feita perpendicular ao longo do eixo longitudinal da fibra, com periodicidade  $\Lambda$  constante. Os planos paralelos de maior e menor índice de refração formam uma rede de difração [10]–[12], conforme apresentado na figura 1 o comprimento de onda próximo ao centro do espectro refletido  $\lambda_B$ , chamado de comprimento de onda de Bragg, é dado pela equação:

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

A figura 1 apresenta a ilustração de uma fibra óptica onde três FBG's são gravadas em seu núcleo. Cada uma das FBG's possui uma periodicidade  $\Lambda$  diferente, o que ocasiona um comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$  diferente para cada uma delas. Cada um dos planos irá espalhar a luz confinada no núcleo da fibra, se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente a intensidade de luz refletida é cancelada. Quando a condição de Bragg 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 [12]. Do ponto de vista do espectro refletido, a FBG tem um comportamento similar a um filtro passa faixa muito seletivo, já o espectro transmitido tem um comportamento similar a um filtro rejeita faixa, como ilustrado na figura 1.

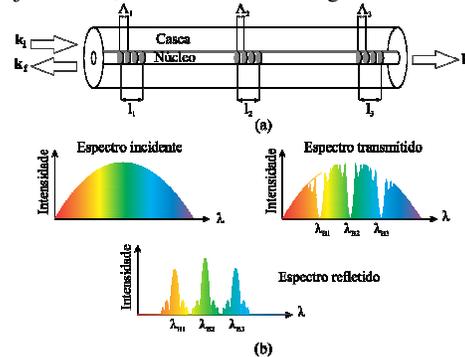


Figura 1. Representação de três FBG's no núcleo de uma fibra óptica (a) fibra óptica e (b) espectros associados.

O comprimento de onda de Bragg  $\lambda_B$  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  $\Delta\lambda_B(l, T) = (1)$  no valor de  $\lambda_B$ . 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  $\lambda_B$  devido à alteração do índice de refração, denominada de constante foto elástica, e do comprimento da FBG ocasionado por deformação mecânica. Para o segundo termo em

(2) o deslocamento de  $\lambda_B$  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. Sendo assim, quando a FBG está sujeita tanto a variações de temperatura quanto deformação mecânica não é possível dissociar qual a parcela de contribuição de cada uma dessas variáveis sobre o valor de  $\Delta\lambda_B$  quando é utilizada apenas uma FBG. Dessa forma, quando o interesse é medir apenas temperatura, por exemplo, 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 III e IV.

### B. 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 2. 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 [13]. A figura 2 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 ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{GeO}_2$ , etc.) tem a sua contribuição para o espectro, em termos de número e localizações dos picos, além da intensidade óptica [14]. Portanto, o espectro de Raman depende da composição física da fibra óptica utilizada como elemento sensor [15].

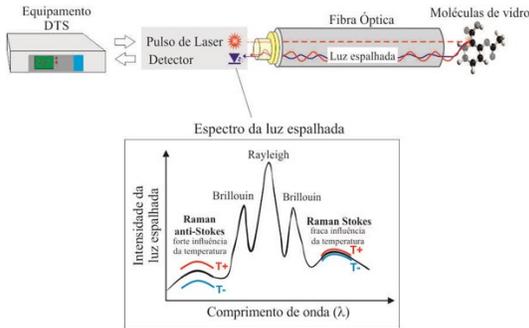


Figura 2. Esquema básico de um equipamento DTS baseado em espalhamento Raman.

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 [14], [15], ou apenas na banda anti-Stokes, que é mais sensível a variações térmicas. Segundo a técnica sugerida por Soárez *et al.*, as variações das bandas de Raman são convertidas em temperatura de acordo com (3) [16]:

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

na qual  $T(z)$  é a temperatura em (K) na posição  $z(\text{m})$  ao longo da fibra;  $\gamma = \Delta E / k(\text{K})$  sendo  $\Delta E$  (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  $z(\text{m})$ , respectivamente; por fim,  $\Delta\alpha = \alpha_s - \alpha_{as} (\text{m}^{-1})$  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  $\Delta z_{(\text{min})}$ . 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. Ou seja, quando as variações de temperatura ocorrem em um comprimento inferior à resolução espacial, a medida será menor que a temperatura real. Normalmente, a diferença entre a medida real e a mensurada pelo DTS será dada pela razão entre o comprimento onde ocorreu a variação e resolução espacial do equipamento. O comprimento da resolução pode ser estimado através de (4) [16]:

$$\Delta z_{\text{min}} = \frac{c_0 \tau}{2n_{gr}}, \quad (4)$$

na qual  $c_0$  é a velocidade da luz no vácuo,  $\tau$  é a duração do pulso de laser, e  $n_{gr}$  é o grupo de índices de refração do núcleo da fibra.

Uma forma de melhorar a resolução espacial seria reduzir a duração do pulso de laser. Por outro lado, isso implica mais complicações para o equipamento, especialmente devido à baixa intensidade de sinal espalhado. Geralmente, os sistemas Raman DTS comerciais, incluindo o equipamento utilizado para instrumentação do estator, tem uma resolução espacial de 1 m [13]. 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 [14]. 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 [17]–[19]. Nesta aplicação a fibra óptica utilizada como sensor é fixada na superfície do estator, proporcionando uma quantidade de pontos superior à instrumentação convencional do gerador que faz o uso de apenas alguns sensores do tipo RTD. 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 V.

### III. ENCAPSULAMENTO DE REDES DE BRAGG UTILIZANDO RESINAS POLIMÉRICAS

Por meio de estudos realizados em literatura pertinente [20], [21], foram encontradas alternativas para encapsular redes de Bragg utilizando um material compósito poliméri-

co. O compósito tem estabilidade térmica e mecânica adequadas para a aplicação e apresenta baixa condutividade elétrica. Portanto, o objetivo é encapsular as redes de Bragg em um compósito com matriz de resina epóxi e reforço de fibra de vidro. Posteriormente caracterizar o compósito através de ensaio de estabilidade térmica e mecânica para determinar qual compósito é promissor para ser utilizado como encapsulamento das FBG's.

#### A. Encapsulamento de sensores FBG's em resina Polimérica, caracterização térmica e mecânica

Os sensores a fibra óptica baseado em redes de Bragg foram gravados utilizando Laser Excimer ArF (Fluoreto de argônio), com comprimento de onda de operação de 193 nm, em operação no Laboratório de Fotônica da UTFPR - Curitiba. Depois de gravados, os sensores foram encapsulados com três resinas epóxi comerciais: i) Resina Epóxi Araldite LY1564 em combinação com o endurecedor Aradur 2963 (Bisfenol A com Aminas Cicloalifáticas); ii) Resina Epóxi Araldite LY1564 em combinação com o endurecedor XB3474 (Bisfenol A com Aminas Cicloalifáticas); iii) Resina Epóxi 331 em combinação com o endurecedor 043 (Bisfenol A com Epiclorohidrina).

As resinas foram impregnadas no tecido de fibra de vidro 180 g/m<sup>2</sup> através da técnica de Moldagem por Transferência de Resina (RTM). A técnica RTM tem como princípio básico o transporte de uma quantidade de resina infundida proveniente de um recipiente até os canais de entrada e saída do molde. Esse transporte ocorre devido à diferença de pressão promovida por uma bomba de vácuo [22]. O tecido de fibra de vidro tem como objetivo garantir a resistência mecânica da amostra. Foram utilizadas 8 camadas de tecido de fibra de vidro para cada amostra.

Durante a confecção das amostras, conforme mostra a figura 3, o sensor FBG2 foi mantido em um tubo capilar metálico, esse sensor tem a função de medir valores de temperatura sem sofrer variações devido à deformação mecânica. O segundo sensor FBG1 foi mantido diretamente em contato com a resina. Esse sensor foi utilizado para registrar deformações mecânicas (*strain*) em duas situações: primeiro para avaliar a presença de tensão mecânica após o processo de cura das amostras [23] e posteriormente para o ensaio de tração a quente. Os segmentos ópticos foram conectados ao interrogador IMON 512E da *Ibsen Photonics*<sup>®</sup>.

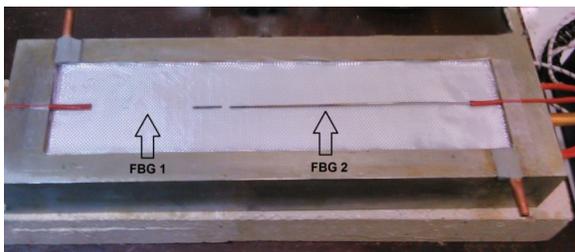


Figura 3. Preparo do molde apresentando dois segmentos de fibra óptica, sendo um segmento (FBG1) em contato direto com as camadas tecido de fibra de vidro e o outro segmento (FBG2) dentro de capilar metálico.

Depois de fabricadas, as amostras foram caracterizadas através de ensaios térmicos e mecânicos. A temperatura de transição vítrea das amostras foi avaliada pelo equipamento DSC 200 F3, através da técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC). A técnica de DSC mede a temperatura e

fluxo de calor associados a transições em materiais como uma função do tempo e temperatura em uma atmosfera controlada [23]. Através desta análise térmica é possível obter a temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) das amostras produzidas. No resfriamento, a transição vítrea do polímero epóxi representa a temperatura abaixo da qual o polímero se torna rígido (vitrificado). Quando um polímero sólido é aquecido a uma temperatura superior ao valor de  $T_g$ , o material se torna flexível. No ensaio, o equipamento foi ajustado para aquecer numa taxa de 10 °C/min, entre 20 °C até 200 °C [24].

O arranjo experimental utilizado para o ensaio de tração a quente da amostra é ilustrado na figura 4. No ensaio uma das extremidades da amostra foi fixada em um suporte horizontal. A amostra foi envolvida por uma resistência elétrica, acionada por um controlador de temperatura. Durante o ensaio, uma massa fixa de 2 kg foi acoplada na extremidade livre da amostra e a temperatura variada de 20 °C até 5 °C abaixo da temperatura de transição vítrea de cada compósito. No ensaio, foi monitorada a variação no comprimento de onda de Bragg em função da temperatura.

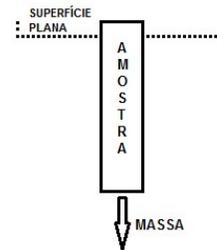


Figura 4. Arranjo experimental para ensaio de tração a quente da amostra, aplicando uma massa fixa e variando a temperatura de 20 °C até 5 °C abaixo do limite de  $T_g$  de cada compósito.

Posteriormente foram realizados ensaios de tração utilizando a máquina de ensaio universal EMIC DI-10000, com uma célula de carga de 5 kN e velocidade do ensaio de 5 mm/min, o ensaio permite avaliar a força e a tensão máxima de ruptura de cada compósito.

#### B. Resultados dos ensaios térmicos e mecânicos dos polímeros

A figura 5 apresenta o gráfico com os dados que foram coletados durante o processo de cura das amostras produzidas, e após 720 minutos do término do processo (temperatura ambiente controlada em 21 °C). Na figura 5, verifica-se que durante o aquecimento da amostra ocorre um deslocamento na posição do pico de Bragg. Os resultados mostram que, após o processo de cura todas as amostras apresentam valores de  $\Delta\lambda$  ligeiramente negativos, conforme mostra a Tabela I.

Tabela I. Resultado da tensão residual dos três compósitos após cura

Resina Epoxy	$\Delta\lambda_{\text{strain}}(\text{nm})$
LY1564/Aradur 2963	-0,85446
LY1564/XB3473	-1,41352
DER331	-0,74323

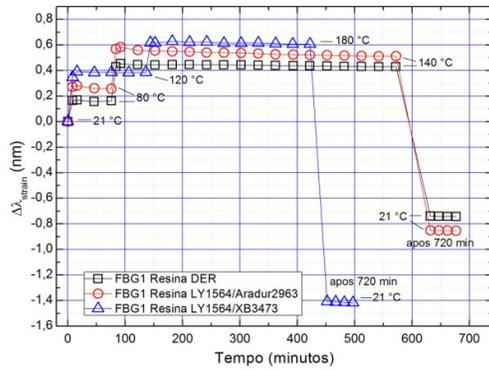


Figura 5. Resultado com a média de 10 amostras para cada composto. Gráfico normalizado com os dados que foram coletados durante a cinética de cura dos três compostos epóxi.

Portanto, pode-se concluir que após o processo de cura, ambas as amostras apresentam uma tensão residual ligeiramente compressiva. A figura 6 apresenta os resultados do ensaio DSC, fluxo de calor (mW/mg) em função da temperatura. A resina LY1564/XB3473 apresentou Tg de 127,1 °C, a resina LY1564/Aradur2963 apresentou Tg de 70,4 °C e a resina DER331 apresentou Tg de 87,5 °C.

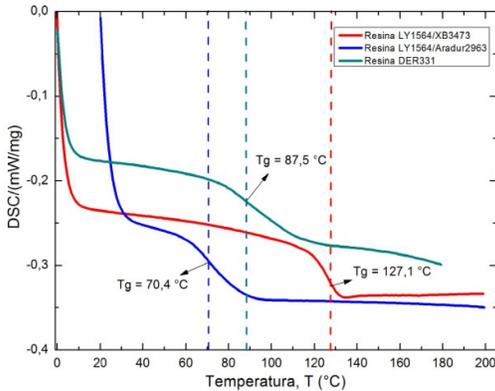


Figura 6. Ensaio DSC com os resultados da temperatura de Transição Vítrea (Tg) dos três tipos de compostos.

A figura 7 apresenta o resultado do ensaio de tração da resina DER331, o resultado mostra a média de 10 amostras, o ensaio foi repetido duas vezes para cada amostra, totalizando vinte ensaios, aplicando uma massa fixa de 2 kg e variando a temperatura de 20 °C até 80 °C abaixo da Tg, e seus coeficientes de ajuste linear. A figura 8 mostra o resultado do ensaio de tração da resina LY1564/Aradur2963. O resultado mostra a média de 10 amostras sendo que o ensaio foi repetido duas vezes para cada amostra, totalizando vinte ensaios, aplicando uma massa fixa de 2 kg e variando a temperatura de 20 °C até 65 °C abaixo da Tg e seus coeficientes de ajuste linear, e o mesmo procedimento foi repetido para a resina LY1564/XB3473, conforme mostra a figura 9.

É possível verificar que nas amostras LY1564/Aradur2963 e DER331 que a inclinação da curva  $\Delta\lambda \times T$  se altera antes de atingir a temperatura Tg. Portanto, o ensaio confirma que a resistência mecânica das amostras até o limite da temperatura de transição vítrea da resina não é constante, indicando um rearranjo molecular durante o aquecimento, ao contrario da amostra da Resina LY1564/XB3473, que apresentou resistência mecânica até o limite da temperatura de transição vítrea.

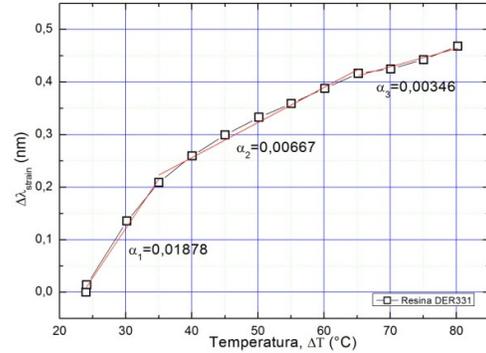


Figura 7. Média de 20 ensaios com 10 amostras da resina DER331 e seus ajustes lineares.

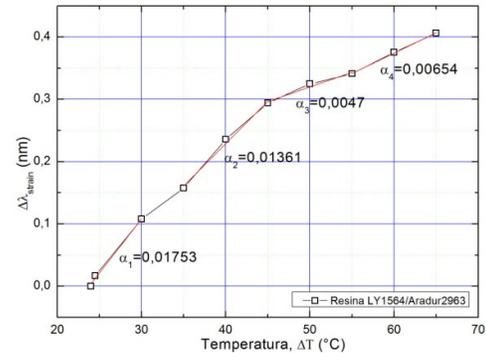


Figura 8. Média de 20 ensaios com 10 amostras da resina LY1564/Aradur2963 e seus ajustes lineares.

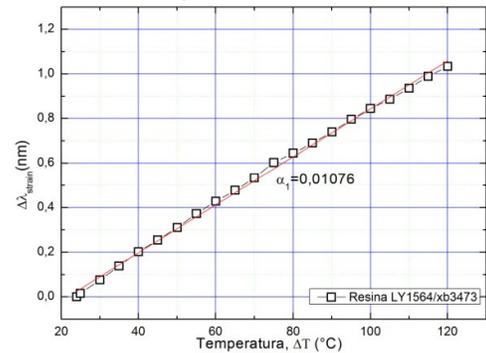


Figura 9. Média de 20 ensaios com 10 amostras da resina LY1564/XB3472 e seus ajustes lineares.

A figura 10 apresenta o resultado do ensaio de tração até a ruptura utilizando a máquina de ensaio universal EMIC DL10000. Nota-se que a resina DER331 apresenta maior tensão de Ruptura.

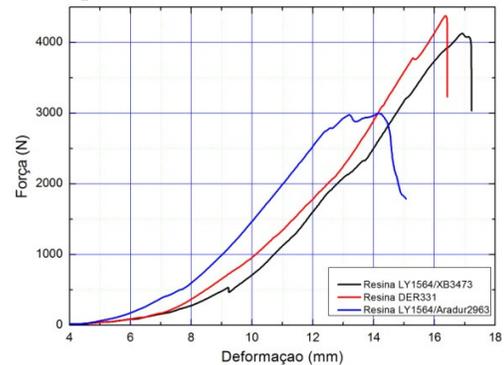


Figura 10. Ensaio de tração dos compostos LY1564/XB3473, DER331 e LY1564/Aradur2963.

A Tabela II apresenta a relação com os resultados de temperatura de transição vítrea e a tensão máxima de ruptura de cada compósito.

Tabela II. Resultado da Tg e ensaio de tração de cada compósito

Compósito	Tg (°C)	Força Máxima (N)	TMR* (MPa)
LY1564/ Aradur 2963	70,4	2995,14	49,91
DER331	87,5	4378,88	72,98
LY1564/ XB3473	127,1	4129,40	68,00

\*TMR – Tensão Máxima de Ruptura

A resina LY1564/XB3473 tem boa estabilidade térmica, e a resina DER331 apresentou melhor resistência mecânica. Entre as três resinas comerciais avaliadas, a que se destacou para o projeto foi a resina LY1564/XB3473. Na Seção VI será apresentada outra forma de encapsular as redes de Bragg e o resultado do desenvolvimento e aplicação dos sensores ópticos encapsulados para mancais e trocadores de calor de geradores.

#### IV. MONITORAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR E MANCAIS

Outros pontos importantes do hidro gerador abrangidos neste projeto de pesquisa são os mancais e trocadores de calor que receberão instrumentação óptica específica individuais. Nas subseções A e B 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.

##### A. Encapsulamento e calibração dos sensores para os trocadores de calor e mancal

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 11 a e b apresentam o encapsulamento do sensor projetado para o mancal e trocador de calor respectivamente.

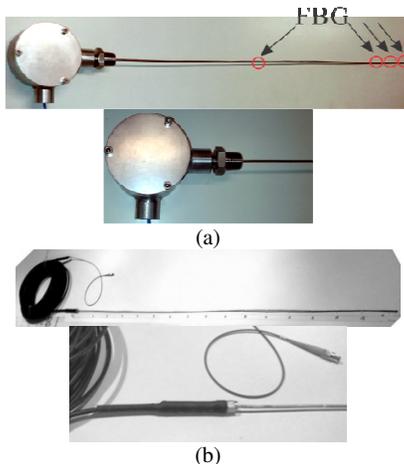


Figura 11. Encapsulamentos utilizados para o sensor (a) do mancal e (b) trocador de calor.

Na figura 11 a é apresentada a câmara de emendas que tem a finalidade de manter as emendas protegidas e sobra de fibra óptica para eventuais manutenções e novas emendas. Quando a junção é rosqueada, entre o poço termométrico e a câmara de emendas, aplica-se uma força na pinça que acaba pressionando o tubo de aço inoxidável. No sensor para o trocador de calor (figura 11 b) o cabo óptico é preso diretamente à fibra óptica que contém quinze redes de Bragg espaçadas igualmente. 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 12. 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], [26].

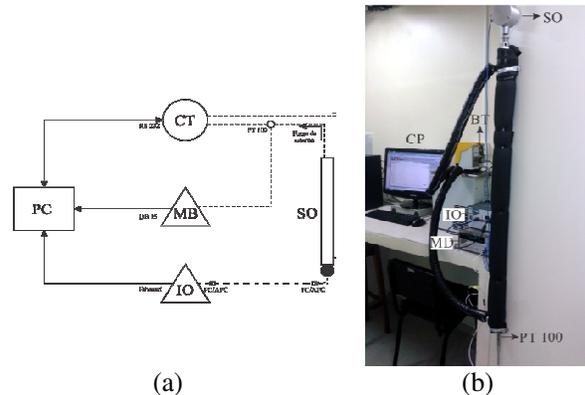


Figura 12. Diagrama funcional do sistema de calibração (a) e fotografia do sistema instalado em laboratório (b).

O processo de calibração consiste de quatro repetições de 10 °C até 80 °C, com degraus de 10 °C e tempo de estabilização de 15 min. O maior valor de incerteza combinada expandida calculado para cada sensor é apresentado na tabela III juntamente com os coeficientes das funções ajustadas dos pontos determinados durante a calibração. Para determinar a temperatura ( $T$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) para o sensor do mancal os pontos da calibração foram correlacionados com uma equação polinomial (5) sendo  $\alpha$  o coeficiente quadrático,  $\beta$  coeficiente angular e  $\gamma$  o coeficiente linear característico para cada rede de Bragg individual que não foi apresentado na Tabela III. Para o sensor do trocador de calor foi realizado um ajuste linear (6) dos pontos de calibração e o coeficiente  $\beta$  apresentado na tabela III.

Tabela III. Dados da calibração dos sensores ópticos

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

$$T(\lambda) = \alpha\lambda^2 + \beta\lambda + \gamma, \quad (5)$$

$$T(\lambda) = \beta\lambda + \gamma. \quad (6)$$

Os coeficientes das funções ajustadas apresentados na tabela III 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.

### B. 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 13 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 III.

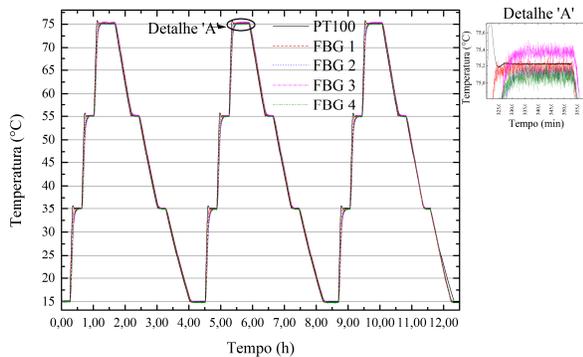


Figura 13. Resultado dos ciclos térmicos obtidos em laboratório para o sensor do mancal.

O mancal que será monitorado na UHE é apresentado na figura 14 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 15) 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.

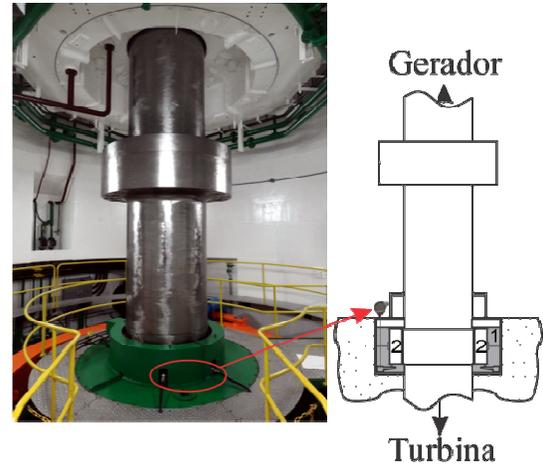


Figura 14. Local da instalação comparado com o desenho esquemático do mancal guia da turbina.

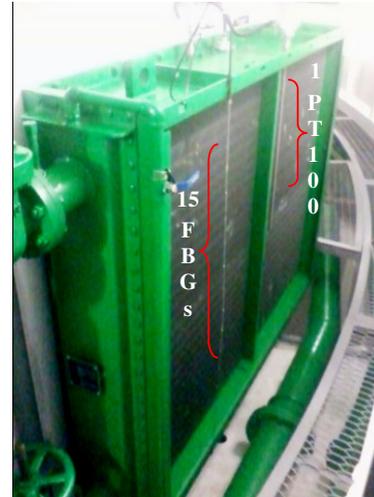


Figura 15. Disposição do sensor óptico com quinze redes de Bragg instalado no trocador de calor e o sensor PT100 com um ponto sensor.

Para entender melhor a distribuição de temperatura do trocador de calor a figura 16 mostra uma comparação entre as quinze redes de Bragg. Desta forma foi possível analisar a diferença de temperatura com relação ao valor médio e informar se há uma diferença abrupta que possa levar a conclusão que o trocador de calor não está funcionando adequadamente. Na figura 17 pode ser visto que a décima quinta rede, que corresponde a 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 redes de Bragg 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 medições 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.

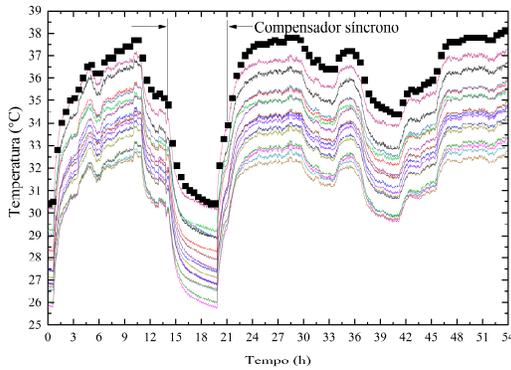


Figura 16. Gráfico da evolução no tempo da temperatura absoluta medida pelas quinze redes de Bragg instaladas no trocador de calor e comparadas com o PT100 instalado.

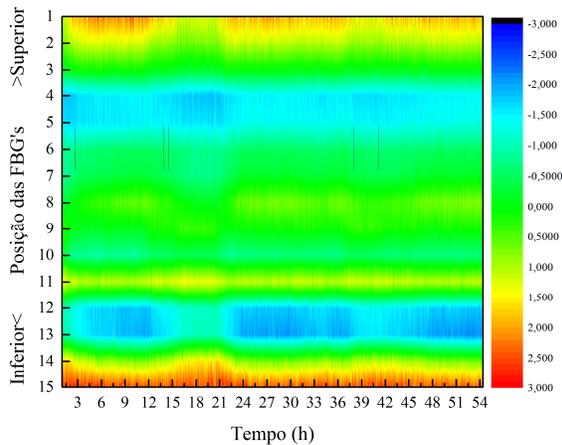


Figura 17. Mapa térmico demonstrando a distribuição de temperatura em um trocador de calor no período de 54 h. As regiões vermelhas evidenciam o mau funcionamento do equipamento causado possivelmente por incrustações que modificam a circulação de água pela tubulação.

## V. IMAGEAMENTO TÉRMICO DO ESTATOR EMPREGANDO O DTS

A necessidade de sistema de geração confiável, robusto e estável justifica a busca por tecnologias de monitoração modernas, confiáveis e que diminuam intervenções nas máquinas geradoras de energia. Um sistema de medição que contempla essas características é o DTS conforme a metodologia empregada e os resultados que serão apresentados nas subseções A e B.

### A. Metodologia utilizada para instrumentação com 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. Trata-se de um gerador síncrono trifásico, com tensão nominal de 13,8 kV entre fases, e corrente nominal de 7,1 kA. O estator do gerador tem dimensões aproximadas de 12 m de diâmetro e 2,5 m de altura, e sua estrutura pesa mais de 200 toneladas. O enrolamento do estator é do tipo estrela (Y) aterrado, formado por 450 ranhuras.

Na figura 18 é apresentada uma visão geral do local da instalação sendo que a figura 18 (a) mostra um esquemático dos principais componentes da instrumentação. Já a figura 18 (b) apresenta uma foto da instalação com visão da parte externa da cabine do gerador. Para realizar a instalação foi necessário retirar o rotor do gerador, deixando livre acesso

para fixar a fibra óptica na superfície do estator. Para fixar a fibra foi utilizada uma resina polimérica eletroisolante, que não interfere na operação do gerador [17]. 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. Esse equipamento fornece um perfil de temperatura ao longo da fibra óptica com resolução espacial de 1 m, e precisão de 0,1 °C. As informações de temperatura são processadas por um software desenvolvido em LabVIEW® para gerar a imagem térmica do estator. O *software* de imageamento utiliza como base o modelo 3D do estator e a posição em que o sensor foi fixado na estrutura.

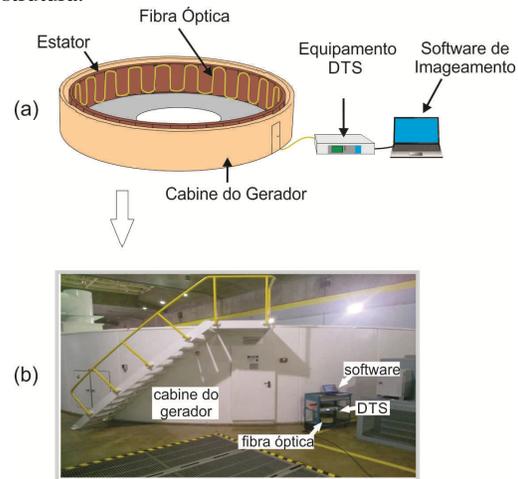


Figura 18. Instalação do DTS no estator do gerador. (a) Esquema básico da instalação com os principais componentes envolvidos. (b) Foto da instalação com visão da cabine do gerador.

O princípio de operação do *software* pode ser compreendido através do diagrama de blocos da figura 19. Neste sistema, o equipamento DTS fornece as informações de distância e temperatura ao longo da fibra óptica utilizada como sensor distribuído. Como a resolução espacial e o intervalo de amostragem são de 1 m, o equipamento informa um valor de temperatura para cada metro de fibra. Em outras palavras, cada metro de fibra define um ponto de medição, conforme explicado na Seção II. Os valores de temperatura são convertidos em cores com base em uma rampa de cor predefinida. Um modelo 3D do estator é utilizado para definir a posição em que a fibra foi fixada na estrutura e as coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) dos pontos de medição do sensor. O modelo foi desenvolvido em COMSOL® com as dimensões reais do estator, considerando as chapas do núcleo e as ranhuras. Através do modelo 3D também é obtida uma matriz contendo todos os vértices da geometria do modelo. Os vértices são pontos de intersecção entre três ou mais arestas, definidos também em coordenadas cartesianas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Esses pontos são utilizados para calcular a distribuição de temperatura em toda estrutura através de um processo de interpolação linear de cores. Este processo calcula a temperatura de cada vértice com base na distância geométrica de cada ponto de medição. Como resultado, uma nova textura é formada em função da temperatura medida pelo DTS. Por fim, a nova textura é aplicada ao modelo 3D do estator para gerar a imagem térmica da estrutura.

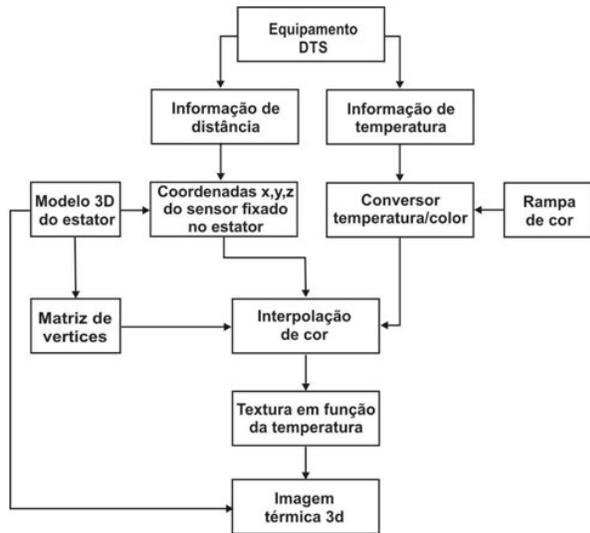


Figura 19. Diagrama de blocos do princípio de funcionamento do software de imageamento térmico do estator do gerador.

A imagem térmica é atualizada a cada aquisição do sensor, proporcionando o monitoramento em tempo real da distribuição de temperatura do estator. O *software* também conta com recursos de redução, ampliação e rotação 360° da imagem, que facilitam a visualização de pontos quentes que podem indicar falhas em qualquer parte da estrutura. Neste caso o sistema poderia ajudar a equipe de manutenção a identificar a falha na camada isolante previamente, tornando a manutenção mais simples, evitando maiores danos à estrutura. Para validar o sistema desenvolvido, foram realizados ensaios experimentais em um dos geradores da usina de Salto Osório. Os resultados destes ensaios são apresentados na subseção B.

### B. Resultados do Sistema de Imageamento Térmico do Estator

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. Neste modo o gerador não gera potência ativa, passando a consumir energia (cerca da 3 MW). Este recurso é utilizado para equilibrar a produção de energia quando não há demanda no sistema. 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 as ranhuras. Na outra instalação a fibra foi fixada com orientação vertical paralela às ranhuras. 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.

O esquema utilizado na instalação com orientação horizontal é apresentado pela figura 20. Nesta instalação a fibra óptica é fixada ao longo da superfície do estator formando uma volta completa no estator, com perímetro de aproximadamente 35 m. Como o intervalo de amostragem e a resolução espacial do sensor são de 1 m, essa instalação resulta em 35 pontos de medição (vide Seção II).

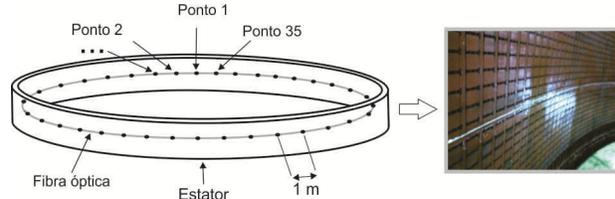


Figura 20. Esquemático e foto da instalação com orientação horizontal.

A figura 21 apresenta o gráfico da variação de temperatura em função da potência do gerador para instalação horizontal durante o teste de 22 horas. O gráfico apresenta as medidas de temperatura em cada um dos trinta e cinco pontos de medição espalhados pelo estator, além da temperatura média da estrutura. Como pode-se observar, nas primeiras horas do teste o gerador estava operando com potência 178 MW, e a temperatura média do estator foi aproximadamente 54 °C. Quando o gerador entrou em modo de compensação pela primeira vez, às 19 horas, o gerador operou sem carga por 1 hora, e a temperatura média caiu para 45 °C. Às 20 horas, o gerador entrou em operação normal novamente e a temperatura subiu para 52 °C. A diferença de 2 °C em relação a temperatura inicial pode estar associada a temperatura água que passa pelos trocadores de calor, pois no período da noite a temperatura água diminui, influenciando no sistema de resfriamento do gerador. A segunda manobra de compensação ocorreu no período entre às 00 horas e 07:30, e ao final deste período a temperatura média do estator foi de 41 °C. Uma importante observação é que foram registradas diferenças de até 3 °C entre a temperatura média e as diferentes partes do estator. Estas diferenças podem ser associadas com a distribuição de barras do estator, que são a principal fonte de calor, devido ao efeito Joule [20], [21], [27]. Assim, considerando as várias fontes de calor e o grande tamanho da estrutura, variações de temperatura relativamente pequenas podem ocorrer [17].

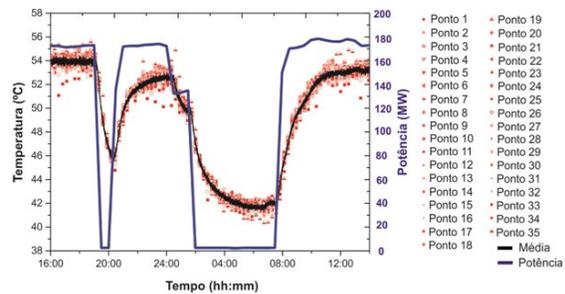


Figura 21. Variação da temperatura em função da potência do gerador para instalação horizontal durante o teste de 22 horas. A linha preta representa a temperatura média, a linha azul é a potência do gerador, e os símbolos vermelhos são a temperatura de cada amostra.

As imagens térmicas do estator também foram geradas durante o ensaio. O *software* mostrou bom desempenho e não exigiu grandes recursos computacionais para gerar as imagens de acordo com informações de temperatura fornecidas pelo DTS. A figura 22 apresenta a imagem térmica 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 a figura 23 apresenta a imagem térmica obtida às 20 horas. Nesse horário o gerador completava 1 hora de operação em modo compensação, e a temperatura caiu para 45 °C. A figura 24 apresenta a imagem gerada 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.

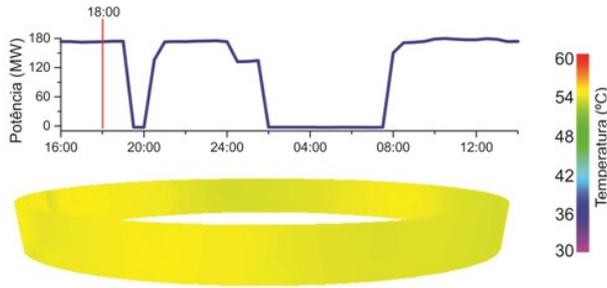


Figura 22. Imagem térmica do estator para instalação horizontal obtida às 18 horas, onde a temperatura média foi de 54 °C.

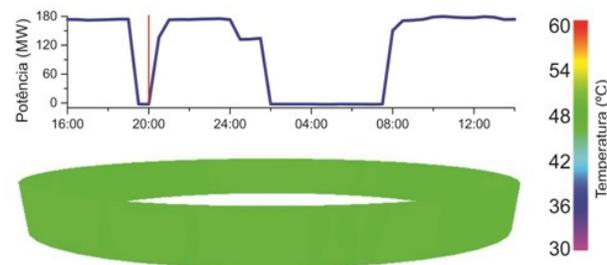


Figura 23. Imagem térmica do estator para instalação horizontal obtida às 20 horas, onde a temperatura média foi de 45 °C.

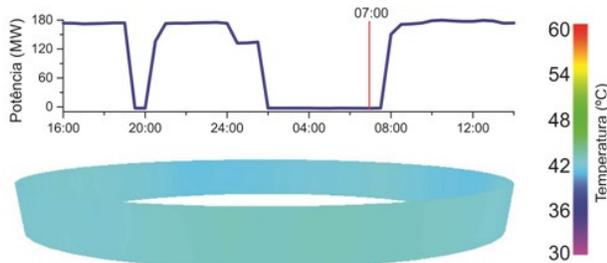


Figura 24. Imagem térmica do estator para instalação horizontal obtida às 7 horas, onde a temperatura média foi de 41 °C.

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. Sendo assim as imagens geradas por esta instalação podem ser consideradas de baixa resolução. Um número maior de voltas ao invés de apenas uma volta completa pode ser utilizado, ampliando assim a resolução da imagem. Porém, uma eventual necessidade de substituição das barras de uma das ranhuras, comprometeria vários trechos de fibra.

Para verificar o desempenho do sistema com outro formato de instalação, uma parte do estator foi instrumentada com a fibra óptica fixada paralelamente às ranhuras. Esse formato foi nomeado de instalação com orientação vertical e pode ser representado pelo esquema da figura 25. A região instrumentada envolve 42 das 450 ranhuras do estator. A opção por instrumentar apenas uma parte da estrutura foi devido ao

pouco tempo disponível para realizar a instalação, pois o gerador já estava parado a vários dias e precisava ser acionado novamente. Nesta instalação foram utilizados 31 m de fibra óptica, que representam 31 pontos de medição.

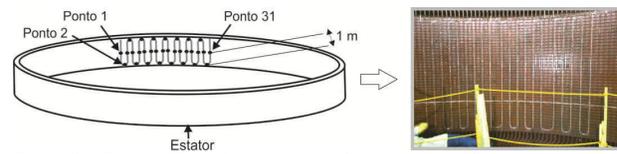


Figura 25. Esquemático e foto da instalação com orientação vertical.

Os resultados das medidas de temperatura dos 31 pontos de medição durante o teste de 22 horas são apresentados pelo gráfico da figura 26. Como se pode observar, os valores de temperatura são similares aos resultados da instalação horizontal, mostrados pela figura 21. Outra importante observação é que mesmo para os pontos de medição próximos um do outro, também ocorreram variações de até 3 °C. Conforme já comentando nos resultados da instalação horizontal, esta diferença pode estar relacionada com as várias fontes de calor e o grande tamanho da estrutura.

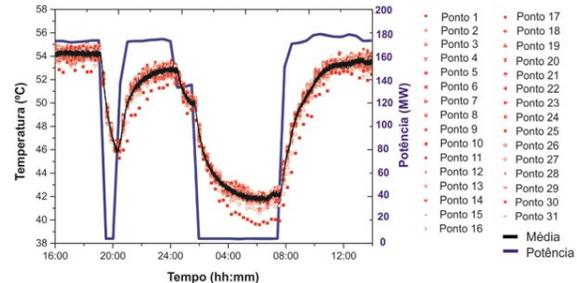


Figura 26. Variação da temperatura em função da potência do gerador para instalação vertical durante o teste de 22 horas. A linha preta representa a temperatura média, a linha azul é a potência do gerador, e os símbolos vermelhos são a temperatura de cada amostra.

As imagens térmicas da parte do estator instrumentada também foram geradas durante o teste de 22 horas. Para estes resultados, foi desenvolvido um modelo 3D do estator reduzido, considerando apenas as 42 ranhuras que compõem a região onde a fibra foi fixada. A figura 27 apresenta a imagem térmica gerada às 18 horas, quando gerador estava operando em sua condição normal, com potência de aproximadamente 178 MW. A temperatura média calculada foi de 54 °C. Já a figura 28 apresenta a imagem térmica obtida às 20 horas, onde após 1 hora operando em modo de compensação, a temperatura média caiu para 45 °C. A figura 29 apresenta a imagem térmica gerada às 7 horas do dia seguinte, onde após o gerador operar por 8 horas em modo de compensação a temperatura média caiu para 41 °C.

Esses resultados 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 na escala de cor estabelecida. 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 [27].

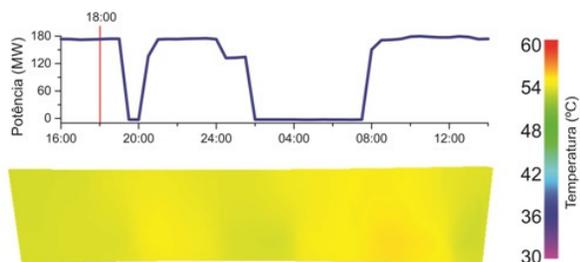


Figura 27. Imagem térmica do estator para instalação vertical obtida às 18 horas, onde temperatura média foi de 54 °C.

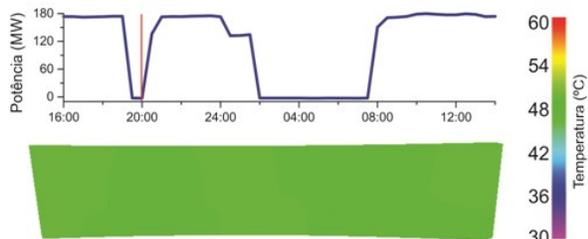


Figura 28. Imagem térmica do estator para instalação vertical obtida às 20 horas, onde a temperatura média foi de 45 °C.

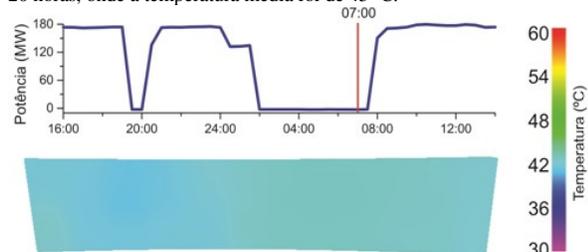


Figura 29. Imagem térmica do estator para instalação vertical obtida às 7 horas, onde a temperatura média foi de 41 °C.

## VI. CONCLUSÕES

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.

Foram apresentadas técnicas de encapsulamento para as redes de Bragg em fibras ópticas que utilizam resina epóxi e técnica RTM. Os encapsulamentos foram caracterizados através de ensaios de tração que apresentaram as seguintes características: i) Durante o processo de cura, todas as amostras apresentam uma tensão residual ligeiramente compressiva; ii) As amostras do compósito LY1564/XB3473 apresentam resistência mecânica para temperaturas abaixo da temperatura de transição vítrea da resina. Combinando os ensaios de resistência mecânica a quente, DSC e tração na máquina de ensaios, conclui-se que a resina LY1564/XB3473 apresentou melhor estabilidade térmica e mecânica em relação às outras duas resinas. Até o momento, entre as três resinas comerciais avaliadas, a melhor escolha para utilizar no compósito é a resina LY1564/XB3473.

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. A diferença de 3 °C observada em ambas as instalações pode ser associada com a distribuição de barras do estator, que são a principal fonte de calor, devido ao efeito Joule.

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. Este tipo de medição também pode auxiliar os projetistas de máquinas elétricas para melhorar o desempenho da máquina, bem como determinar com segurança os limites de operação da máquina.

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 um período não determinado de forma complementar ao sistema de medição de temperatura convencional utilizado atualmente na UHE.

A equipe que atua neste projeto é formada por quatro colaboradores do departamento de engenharia da Tractebel Energia, sendo um mestrando com tema de dissertação vinculado ao projeto. Pela UTFPR atuam cinco pesquisadores, três doutorandos e dois mestrandos, com temas de dissertações e teses vinculados ao projeto. Até maio deste ano os resultados do projeto foram publicados em importantes eventos técnicos científicos, sendo dois artigos completos publicados em periódicos e onze trabalhos completos publicados em anais de congressos nacionais e internacionais. Ressalta-se que os resultados apresentados neste artigo provêm de três inventos registrados junto ao Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI): sensor óptico para mancais BR1020140030697 [28], método para o monitoramento de temperatura aplicando sensores distribuídos no estator BR1020150020619 [29] e método de imageamento térmico aplicando sensores distribuídos BR1020150020627 [30].

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. L. B. and A. I. Neto, "Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030," in XXVIII Encontro Nacional de Engenharia de *Produção*, 2008, pp. 1–15.
- [2] G. Stone and J. Kapler, "Stator winding monitoring," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 4, no. 5, pp. 15–20, 1998.
- [3] 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.
- [4] N. M. Theune, M. Willsch, T. Bosselmann, M. Kauliann, P. Krämmcr, J. Kaiser, S. C. Technology, and Z. T. En, "Multiplexed Temperature Measurement for Power Generators," vol. 4074, 2000.
- [5] 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.
- [6] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL, "Contrato de Concessão de Geração N°005/2011 - ANEEL," 2011.
- [7] 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.
- [8] 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*, 2014, pp. 1054–1057.
- [9] 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.
- [10] T. Erdogan, "Fiber grating spectra," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1277–1294, 1997.
- [11] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview," *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [12] A. Othonos, "Fiber Bragg gratings," *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341, 1997.
- [13] A. Ukil, H. Braendle, and P. Krippner, "Distributed temperature sensing: Review of technology and applications," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, pp. 885–892, 2012.
- [14] G. Bolognini and A. Hartog, "Raman-based fibre sensors: Trends and applications," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 19, no. 6, pp. 678–688, Dec. 2013.
- [15] M. B. Hausner, F. Suárez, K. E. Glander, N. van de Giesen, J. S. Selker, and S. W. Tyler, "Calibrating single-ended fiber-optic raman spectra distributed temperature sensing data," *Sensors*, vol. 11, pp. 10859–10879, 2011.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] C. Hu, J. Wang, Z. Zhang, S. Jin, and Y. Jin, "Application research of distributed optical fiber temperature sensor in power system," 2011, p. 83112E.
- [19] C. Hudon, M. Lévesque, L. Zou, and J. Picard, "Determination of Stator Temperature Profile using Distributed Sensing," in *Electrical Insulation Conference*, 2013, pp. 191–195.
- [20] V. Antonucci, A. Cusano, M. Giordano, J. Nasser, and L. Nicolais, "Cure-induced residual strain build-up in a thermoset resin," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 37, pp. 592–601, 2006.
- [21] D. Karalekas, J. Cugnoni, and J. Botsis, "Monitoring of process induced strains in a single fibre composite using FBG sensor: A methodological study," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 39, pp. 1118–1127, 2008.
- [22] W. Xue, "Application and molding technique research of Aramid fiber composites in radar components," in *Proceedings of 2011 IEEE CIE International Conference on Radar, RADAR 2011*, 2011, vol. 2, pp. 1402–1405.
- [23] H. B. Wang and K. S. Siow, "Effects of interfacial residual stress on Tg of epoxy resin," *Proc. 1997 1st Electron. Packag. Technol. Conf. (Cat. No.97TH8307)*, 1997.
- [24] P. Wang, D. Li, Q. Shang, Z. Chen, and H. Wang, "Cure monitoring of epoxy resin via use of FBG," in *8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings*, 2013, vol. 2, pp. 60–63.
- [25] A. A. G. Jr and A. R. de Sousa, *Fundamentos de metrologia científica e industrial*, 1st ed. Barueri SP: Manole, 2008, p. 403.
- [26] Inmetro, *GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição*, 2008, p. 141.
- [27] M. Chaaban, J. Leduc, C. Hudon, A. Merkouf, F. Torriano, and J. F. Morissette, "Thermal Analysis of Large Hydro-Generator Based on a Multi-physic Approach," 2011.
- [28] J. C. C. da Silva, U. J. Dreyer, E. V. da Silva, J. P. Bazzo, V. de Oliveira, H. J. Kalinowski, 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," Registro INPI: BR1020140030697, 2014.
- [29] 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," Registro INPL: BR1020150020619, 2015.
- [30] 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," Registro INPI: BR1020150020627, 2015.