



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

BR/GSE/09
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

SISTEMA DE TRANSMISSÃO E ISOLAMENTO DE SINAL DE FIBRA ÓPTICA PARA USO EM MONITORAÇÃO DE EQUIPAMENTOS NA ALTA TENSÃO

**Claudio Floridaia, João B. Rosolem, Livia R. Alves, Ariovaldo A. Leonardi,
Rafael P. Ordine, Antonio D. Coral, Claudio Antonio Hortencio
CPqD - Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações**

**Carlos A. M. Nascimento, Altair L. Melo, Romeu F. Fonseca, Rodrigo O. C. Moreira, Maurissone Ferreira,
Giovani C. L. Souza
CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais**

RESUMO

Neste trabalho apresentamos uma técnica inovadora para monitoração de temperatura de barramentos e de condutores de linhas de transmissão utilizando sensores de fibra óptica com grade de Bragg (FBG) sem acoplamento físico entre o potencial de terra e a alta tensão por meio da óptica de espaço livre (FSO) usando-se um par de colimadores ópticos. Foi mostrado, em laboratório e em ambiente externo, que o sistema desenvolvido permite operar com distâncias entre os colimadores de 50 cm a 200 cm, similar ao comprimento de uma cadeia de isoladores de até 230 kV.

PALAVRAS-CHAVE

Fibra de grade de Bragg (FBG), Óptica de espaço livre (FSO), Alta tensão, Sensor óptico, Isolador, subestação, Linhas de transmissão, Temperatura.

1.0 - INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica é o aquecimento dos seus diversos componentes devido ao efeito Joule, causado pela corrente elétrica circulante. Desse modo é de grande importância a monitoração da temperatura principalmente em linhas de transmissão e barramentos de subestação. Sensores do tipo fibra de Bragg (FBG) são uma das principais tecnologias ópticas para monitoração de temperatura ou deformação em linhas de alta tensão [1]-[4]. O principal problema enfrentado na área de aplicação óptica na alta tensão é a transição das fibras ópticas com a baixa tensão (potencial zero), uma vez que a fibra óptica mesmo sendo dielétrica pode ao longo do tempo conduzir tensão pelo acúmulo de sujeira ou poluição na capa do cabo óptico. A solução tradicionalmente adotada é de usar um isolador especialmente desenvolvido integrado com fibra óptica [5]. Esta solução é onerosa, e demanda para seu uso a mudança do isolador comum, o que requer manobras de instalação inclusive possibilidade de desligamento das linhas ou procedimento de trabalho em linhas vivas, o que também tem um custo elevado.

Neste trabalho é proposta uma nova abordagem inovadora para a captação dos sinais dos sensores ópticos instalados em alta tensão a partir do potencial terra. Nesta abordagem, foi utilizada a tecnologia de óptica de espaço livre (FSO), para transmitir e receber os sinais ópticos pelo ar, isto é, entre o potencial terra até os sensores FBG instalados na alta tensão. Para tanto se utiliza de um par de colimadores ópticos responsáveis por expandir o feixe de luz da fibra óptica para viabilizar o canal óptico sem interrupções nos sinais. O uso de um kit para fixar e ajustar os colimadores é uma alternativa viável em relação a instalação de um isolador especial com fibra óptica em seu interior.

A avaliação desta técnica foi realizada em um protótipo de laboratório onde foi possível estudar a sensibilidade dos colimadores devido ao desalinhamento óptico entre os mesmos. O ambiente externo foi simulado por meio de barramento de subestação e em uma cadeia real de isoladores não energizada, no campo de teste do CPqD por 12 kN de tracionamento. Para os estudos de desalinhamento vários tipos de colimadores e fibras ópticas foram usados.

(*) R. Dr. Ricardo Benetton Martins, s/n – Parque II do Polo de Alta Tecnologia, CEP 13086-902, Campinas, SP, Brasil, Tel: (+55 19) 3705.6796 – Email: rosolem@cpqd.com.br

Foi mostrado que o sistema FSO/FBG permite que os colimadores operem em distâncias entre 50 cm a 200 cm. Este intervalo de valores das distâncias é similar ao comprimento de uma cadeia de até 230 kV.

2.0 - SISTEMA DE SENSORIAMENTO FSO/FBG

As Figuras 1(a) e 1(b) mostram dois tipos de propostas de sistemas FSO/FBG para sensoriamento de temperatura. A Figura 1(a) mostra uma simulação de arranjo do sistema para monitoração de temperatura de barramento de subestações e a Figura 1(b) mostra a simulação do arranjo do sistema para monitorar a temperatura em linhas de transmissão aéreas. Basicamente o sistema é constituído de um interrogador de FBG operando na janela do espectro óptico de 1550 nm, uma fibra óptica padrão (monomodo) conectando o interrogador ao primeiro colimador instalado na base do isolador elétrico (potencial terra), um segundo colimador instalado na base do mesmo isolador elétrico, porém, na alta tensão e a rede de sensores FBG instalada ao longo do barramento ou ao longo do condutor da linha de transmissão aérea. O principal objetivo deste trabalho foi estudar a estabilidade do par de colimadores em função de efeitos ambientais como a deformação mecânica devido à variação da temperatura ou a atenuação óptica causada, por exemplo, por chuvas.

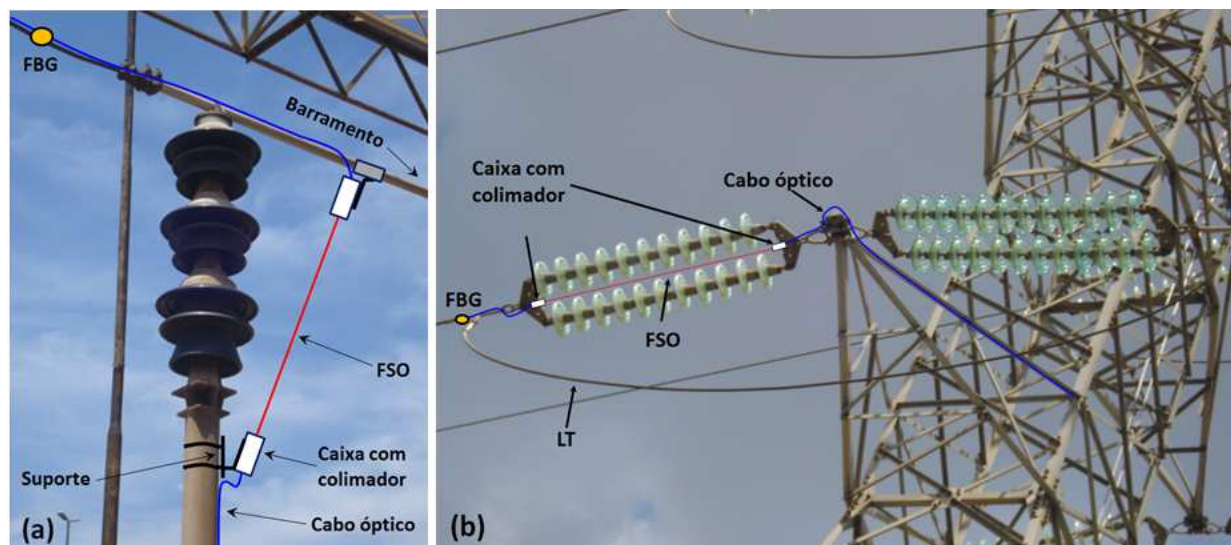


FIGURA 1– Simulações de arranjos dos sistemas FSO/FBG para monitoração da temperatura: (a) monitoração de barramentos de subestações e (b) monitoração de condutores em linhas de transmissão aéreas.

Muitos trabalhos sobre a eficiência de acoplamento de colimadores ópticos foram reportados na literatura [5] e [6] com relação a distância entre os colimadores, deslocamento lateral e desvio angular. Em [6] a análise das perdas de potência resultantes dos desalinhamentos lateral e angular e da distância entre colimadores é feita por meio da técnica de análise de raios. Na referência [7], é apresentada a análise de perda de acoplamento é obtida para o caso em que simultaneamente existe separação, deslocamento lateral e desvio lateral usando a teoria mais realista dos feixes gaussianos. Entretanto, ambos os artigos se referem a colimadores baseados nas lentes gradiente de índice de refração (GRIN), que não são do mesmo tipo das lentes usadas nos experimentos que seguem. Como as os modelos de cálculo mencionados nestas referências não se aplicam diretamente aos colimadores estudados neste projeto optou-se por obter experimentalmente a perda por desalinhamento lateral dos colimadores utilizados.

3.0 - TESTES LABORATORIAIS

Para testar a ideia proposta de monitoração de temperatura por sensores FBG baseado na técnica de FSO para eliminar o problema da condução elétrica da fibra em ambientes de alta tensão, foram usado dois pares de colimadores ópticos comerciais: F810APC-1550 e F260APC-1550 da Thorlabs. O primeiro tem dimensões de 46.9 x 24.0 mm (comprimento x diâmetro externo) e o segundo, 24.0 x 11 mm. Todos os colimadores são compatíveis com conectores FC-APC de fibras ópticas. As principais características destes colimadores são mostradas na Tabela 10.

Uma montagem óptica especial foi utilizada para testar as propriedades de colimação óptica em laboratório. Esta montagem consiste em um trilho de 2 metros que permite a variação da distância de operação entre os colimadores (distância Z). Ajustes transversais em X e Y são obtidos por montagens ópticas dispostas sobre o trilho. Os suportes dos colimadores permitem ainda o ajuste angular dos colimadores.

TABELA 1 - Características dois colimadores testados no sistema proposto.

F810APC-1550	F260APC-1550
<ul style="list-style-type: none"> • Foco fixo, $f = 37,13$ mm • Comprimento de onda: 1550 nm • NA (abertura numérica): 0.24 • Camada anti-reflexiva (AR): 1050-1620 nm • Diâmetro do feixe colimado: 7 mm • Ângulo de divergência: 0.016° (0.28 mrad) 	<ul style="list-style-type: none"> • Foco fixo, $f = 15,58$ mm • Comprimento de onda: 1550 nm • NA (abertura numérica): 0.16 • Camada anti-reflexiva (AR): 1050-1620 nm • Diâmetro do feixe colimado: 3 mm • Ângulo de divergência: 0.038° (0.66 mrad)

Foram realizados testes laboratoriais para verificar a sensibilidade do sistema FSO ao desalinhamento lateral. Estas medições foram realizadas conforme o esquema da Figura 2. Para cada tipo de colimador, os testes foram realizados em duas condições, a saber: (i) acoplamento por uma fibra multimodo (MM) com diâmetro do núcleo de $62,5\ \mu\text{m}$ e (ii) acoplamento em fibra óptica monomodo (SM) cujo diâmetro do núcleo é de $9\ \mu\text{m}$. Foram capturados a potência óptica e os dados espectrais variando a distância lateral (transversa) X para várias distâncias entre os colimadores (Z).

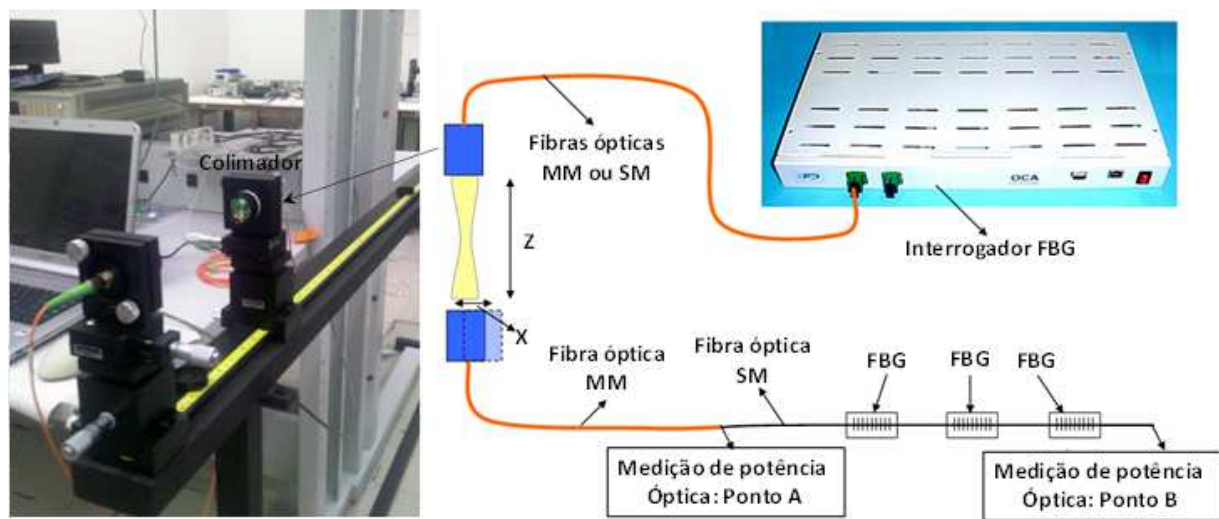


FIGURA 2 – Arranjo experimental usado para medições de eficiência de acoplamento.

Inicialmente o deslocamento lateral X é mantido na melhor condição possível para cada separação Z . Então o colimador é movido na direção X (por simetria, apenas uma direção é necessária). Notamos que no caso do uso de fibras SM, não há necessidade de medição da potência no ponto A (ver Figura 2) antes dos sensores FBG, já que as leituras de potência óptica nos pontos A e B coincidem.

O experimento consiste em mandar um sinal óptico por meio de uma fonte de luz de banda espectral larga (> 30 nm) existente no interior do interrogador FBG e medir a potência no ponto A, antes dos sensores FBG, a potência no ponto B, depois dos sensores FBG e os valores dos picos espectrais relativos aos sensores capturados pelo interrogador (retorno do sinal luminoso).

A seguir são apresentados os resultados de potência óptica (medidos nos pontos A e B, para fibras MM e apenas no ponto B, para fibras SM). Os experimentos envolvendo as medições de potência óptica foram realizados para 4 distâncias entre colimadores, Z , (50 cm, 100 cm, 150 cm e 200 cm) em função dos deslocamentos laterais. Os resultados são mostrados na Figura 3.

Inicialmente nota-se que para os colimadores F260APC-1550 ocorre uma maior transferência de potência entre os colimadores (comparar a Figura 3(a) e a Figura 3(b) com as Figuras 3(c) e 3(d)). Nota-se também de forma geral que a variação na distância Z produz uma transferência de potência semelhante.

Com relação ao uso das fibras MM, como é mostrado na Figura 3(b) e Figura 3(d), observa-se uma maior tolerância ao deslocamento lateral dado que a potência óptica medida no ponto A permanece constante até certo ponto, por exemplo, para o colimador F810APC-1550 (Figura 3(d)) a potência óptica é praticamente constante até cerca de 5 mm. Isso nos levaria a acreditar na maior insensibilidade ao deslocamento lateral. Entretanto, depois que o sinal óptico passa para a fibra SM, a potência cai rapidamente. Em outras palavras, o acoplamento existe, mas não é transferido ao núcleo da fibra SM onde as grades dos sensores FBG são inscritas, sendo então transferidas para a casca da fibra e perdidas.

Com relação as Figura 3(a) e Figura 3(c) que mostram o comportamento do sistema de alinhamento usando fibras SM ao longo do arranjo experimental, pode ser observado um comportamento similar. O colimador F260APC-1550, suporta deslocamentos pouco acima de 3 mm (para -10 dBm) e o colimador F810APC-1550 suporta

aproximadamente 1 mm a mais. Neste caso é importante notar que o resultado da Figura 3(d) mostra que o colimador permite deslocamentos laterais maiores usando fibras MM, especialmente no caso em que a distância dos colimadores é 150 cm. Nota-se, porém que o estudo em termos de potência óptica por si só não é conclusivo. O mais importante é a resposta espectral do sistema que será discutida a seguir.

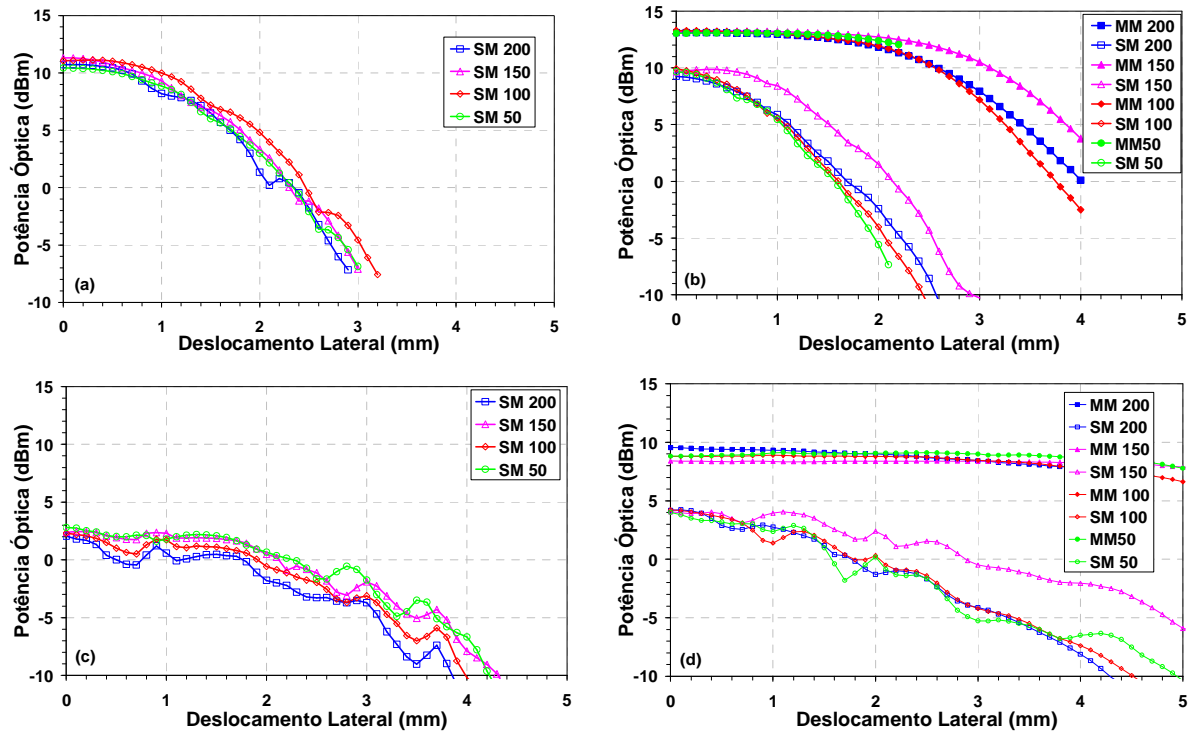


FIGURA 3 – Resposta em potência dos colimadores: (a) F260APC-1550 fibras SM, (b) F260APC-1550 fibras MM, (c) F810APC-1550 fibras SM e (d) F810APC-1550 fibras MM.

Nos sistemas baseados em FBG os comprimentos de onda estão relacionados ao parâmetro físico de interesse. No caso do sistema proposto, tal parâmetro é a temperatura. Para apropriadamente avaliar o desempenho do sistema proposto em função do deslocamento lateral foram medidos no espectro óptico (ver detalhe da Figura 4(a)) os picos de intensidade de 4 sensores FBG em função do deslocamento lateral para as distâncias Z (50, 100 e 200 cm), para cada par de colimadores e para os dois tipos de fibra (SM e MM).

Em geral, observamos que o colimador de maior diâmetro de feixe (F810APC-155) suporta um deslocamento lateral maior que o colimador de diâmetro menor (F260APC-1550). De fato, enquanto o deslocamento lateral para -10 dB de amplitude de pico foi da ordem de 2 a 3 mm para o colimador F260APC-1550, este deslocamento lateral para o colimador F810APC-1550 aumenta para 4 a 5 mm. Especificamente para o colimador F260APC-1550, o deslocamento lateral suportado é maior no caso do uso de fibras SM que para fibras MM. Para os picos espectrais caírem a níveis de -10 dB, cerca de 3 mm de deslocamento lateral é necessário comparado com aproximadamente 2 mm para o caso de fibra MM. Entretanto para o colimador F810APC-1550 existe um ganho de desempenho para deslocamento lateral de 4 a 4.5 mm para 5 mm.

É importante notar que mesmo com este potencial ganho, o uso de fibras multimodo apresenta um problema. Devido à propagação modal na fibra, grandes variações de pico espectral são observadas para cada comprimento de onda. Observando a Figura 4(c) e a Figura 4(d) relacionadas com os colimadores F810APC-1550, uma variação de picos de potência de até 8 dB é observada (ver a região de 3 mm na Figura 4(d)). Esta variação foi inexistente para o caso do uso de fibras SM. De fato a variação entre picos mantém-se constante não importa o deslocamento lateral e provém das variações intrínsecas das características de reflexão das grades FBG empregadas. Acredita-se que as variações de amplitude entre os picos para diferentes comprimentos de onda devem-se a não uniformidade das grades de Bragg que estão residualmente inscritas na casca da fibra.

De fato as fibras de Bragg são uniformes apenas no núcleo da fibra, fora dessa região é suposto existir variações do perfil de índice de refração. No caso de fibras MM a propagação pode ocorrer na região de casca a qual origina a variação espectral mencionada. As FBGs usadas são inscritas em fibras SM e a junção entre fibras MM e SM como mostrado na Figura 2 (ponto A) é a origem do fenômeno.

O uso de fibras MM dá origem a variações de picos de amplitude, entretanto acredita-se que, por testes práticos que as fibras MM resultaram em perdas de acoplamento menores por variação de ângulo. Em [6] é reportado que as perdas podem ser substanciais mesmo para pequenos erros angulares. Como diâmetro do núcleo é cerca de 7

vezes maior em fibras MM, é naturalmente esperado que o sistema seja muito menos suscetível a desalinhamento usando este tipo de fibra.

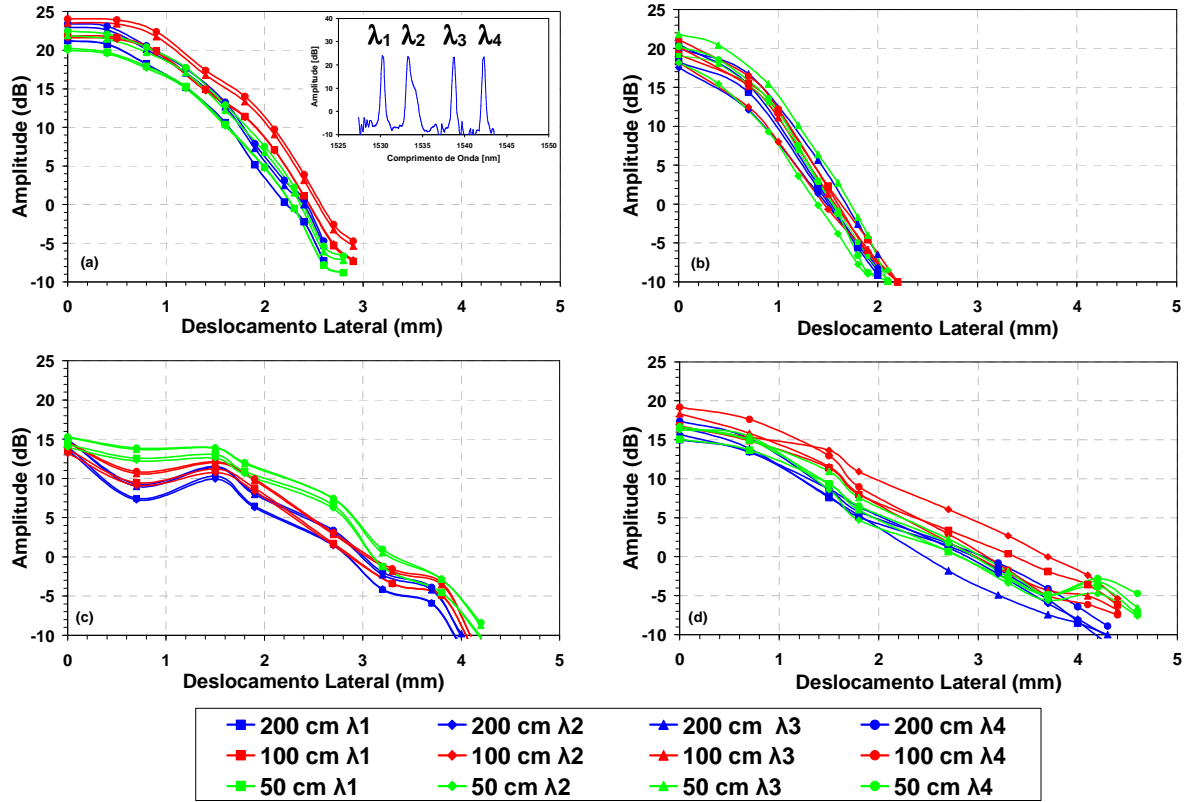


FIGURA 4 – Resposta espectral do sistema para os colimadores: (a) F260APC -1550 fibra SM, (b) F260APC-1550 fibra MM, (c) F810APC-1550 fibra SM e (d) F810APC-1550 fibra MM.

4.0 - TESTES EM AMBIENTE EXTERNO

Nesta seção são apresentados os testes em campo do sistema de monitoração FSO/FBG. Os testes consistem em monitorar a temperatura do ambiente usando os dois sistemas propostos e mostrados nas Figuras 1(a) e 1(b). Os testes foram realizados em ambiente simulado de subestação e linha de transmissão no CPqD. O interrogador mostrado na Figura 2 foi conectado à rede de dados local via porta Ethernet. Os sistemas serão também testados em um ambiente elétrico real posteriormente e os resultados serão divulgados durante a realização do XXII SNPTTE.

4.1 Emulação do Sistema de Monitoração FSO/FBG para Barramentos de Subestações

A Figura 5(a) mostra alguns detalhes do sistema de monitoração FSO/FBG emulado, instalado em ambiente externo. Na Figura 5(b) observa-se os detalhes do empacotamento dos colimadores. Nesta, é possível ver detalhes do setup de ajuste dos colimadores, o colimador propriamente dito e a janela de vidro para proteção e vedação do sistema. Quatro sensores FBG, não mostrados na Figura 5(a), foram instalados externamente, mas protegidos de chuva e incidência solar excessiva por capa protetora não absorvente.

Como é de conhecimento, a resposta dos sensores FBG é linearmente dependente do comprimento de onda (λ) conforme a Eq. 1, onde λ_0 é o comprimento de onda da FBG na temperatura ambiente T_0 . As amplitudes dos picos espectrais não carregam informação, entretanto, neste tipo de sistema é importante devido ao problema do desalinhamento óptico dos colimadores

$$T = T_0 + \frac{1}{S_T}(\lambda - \lambda_0), \quad S_T = 0.033 \text{ nm}/^\circ\text{C} \quad (1)$$

Na Figura 6(a) observa-se o comportamento ao longo do tempo (apenas um comprimento de onda mostrado) do sistema de monitoração FSO/FBG com o empacotamento adequado para refletir o excesso de calor, e com sistema de exaustão natural (fluxo de ar espontâneo) para reduzir o efeito tipo estufa de superaquecimento no interior do empacotamento que afeta o alinhamento dos colimadores. Como pode ser visto o sistema pôde medir a temperatura dos sensores FBG por aproximadamente 21 dias. As oscilações correspondem à variação de temperatura dia-noite. O sistema foi capaz de registrar uma variação correspondente a 15°C até 43°C.



FIGURA 5 – (a) Sistema de monitoração FSO/FBG emulado para medição de temperatura em barramento de subestação e (b) detalhe dos dispositivos colimadores e seu empacotamento.

Observa-se também que o sistema sofreu desalinhamentos em alguns períodos do dia onde a temperatura foi a maior ou a menor (por volta do meio dia ou madrugada). Na Figura 6(b), é mostrado a amplitude (apenas o sinal de um sensor FBG é mostrado) do pico espectral capturado. Como explicado anteriormente, os picos não carregam informações, mas mostram que o desalinhamento ocorre em temperaturas extremas, quando os picos desaparecem do espectro. Na Figura 6(b) pode-se observar claramente o comportamento periódico dos picos espectrais devido à variação de temperatura dia/noite. A excursão de amplitude variou de 4,0 dB a -7,4 dB (escala de potência interna do interrogador) o que corresponde a 11,4 dB de excursão.

Para melhorar o sistema é necessário reduzir esta excursão no nível dos picos de sinal dos sensores com a temperatura ambiente o que garantiria a estabilidade do sistema. Para obter este resultado, o sistema de ajuste e empacotamento de colimação deve ser melhorado para garantir maior isolamento térmico e dissipação de calor natural sem, entretanto, aumentar o custo do sistema proposto com materiais de custo elevado. Não obstante, os resultados obtidos são bastante bons.

Considerando o tempo total de monitoração, obteve-se um tempo de indisponibilidade do sistema de aproximadamente 23%. O maior tempo de interrupção foi de aproximadamente 15 horas, mas a maioria dos intervalos de interrupção foi menor que 8 minutos, conforme mostra a 9(a).

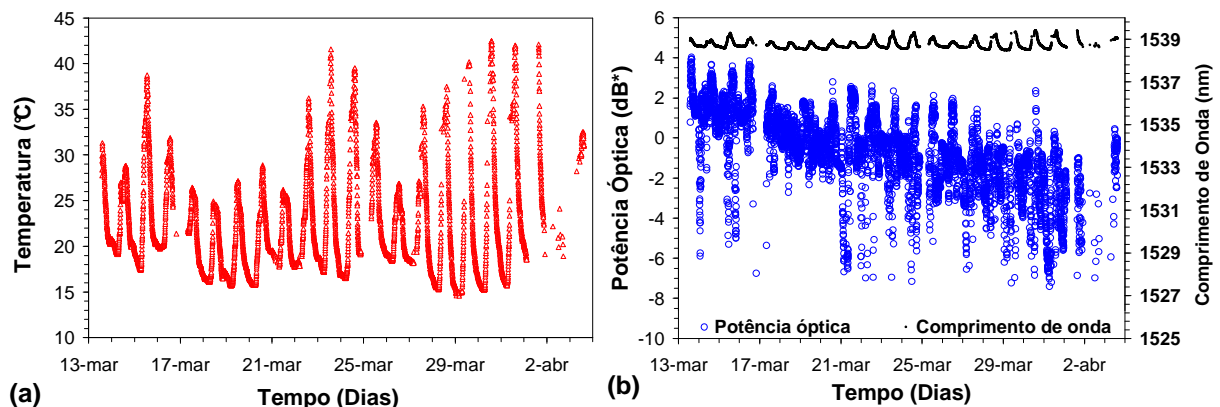


FIGURA 6 - Resultados dos testes ambientais nos sistemas de monitoração de temperatura FSO/FBG para barramentos de subestação emulados: (a) temperatura e (b) potência óptica do pico espectral e comprimento de onda.

4.2 Emulação do Sistema de Monitoração FSO/FBG para Cadeias de Isoladores de LTs

A Figura 7(a) mostra os detalhes da emulação do sistema de monitoração FSO/FBG para cadeias de isoladores de LTs, onde as mesmas são submetidas a tração da ordem de 12 kN. A Figura 7(b) mostra os detalhes do encapsulamento dos colimadores empregados neste teste. O valor de tração é a tipicamente encontrada em cadeias de isoladores de linhas aéreas de transmissão. Neste experimento foi usado um segundo interrogador com apenas um sensor FBG (não mostrado) também não exposto diretamente à ação da irradiação solar e chuva.



FIGURA 7 - (a) Emulação de linha de tensão aérea para teste do sistema FSO/DBG. A cadeia de isoladores é submetida à tração de 12000 N e (b) detalhe do encapsulamento do colimador.

Na Figura 8(a) observa-se o desempenho do sistema de monitoração FSO/DBG ao longo do tempo usando um encapsulamento branco e fluxo natural de ar no seu interior, como anteriormente detalhado para o caso de emulação de barramento de subestação. Como pode ser visto o sistema permitiu a medição da temperatura do sensor FBG por aproximadamente 16 dias detectando variações de temperatura de 23°C a 28°C. Também observamos que o sistema sofreu desalinhamentos em períodos de temperatura extrema correspondente (meio dia e madrugada). Na Figura 8(b), mostramos a amplitude do pico espectral. Como se pode notar os desalinhamentos ocorreram com maior frequência que o caso do sistema de monitoração de barramentos de subestação. A excursão dos picos espectrais variou de 2,2 dB A 22,3, o que corresponde a 20.1 dB de excursão.

Calculando-se o tempo de indisponibilidade do sistema, obtemos o valor de 80.3%. A maior interrupção foi de cerca 20 horas, mas a maioria dos intervalos de interrupção foi menor que 150 minutos, conforme a Figura 9(b). Como pode ser entendido destes resultados experimentais, o sistema deve ser notadamente melhorado para poder ser utilizado na configuração atual. Uma das possíveis melhorias a ser testada em condições reais é o uso do sistema sobre um elemento para-raios, que tem estrutura rígida e também acessa a alta tensão. É esperado, neste caso, resultado mais próximo do caso de monitoração de barramento de subestações.

As Figuras 9(a) e 9(b) mostram as estatísticas de tempo de interrupção dos sistemas para o caso de emulação do sistema para barramento de subestações e para o caso de cadeias de isoladores em LTs. Nota-se que os tempos mais frequentes de interrupção são cerca de 20 vezes maiores neste último caso o que implica que este último sistema requer melhorias para uma aplicação prática.

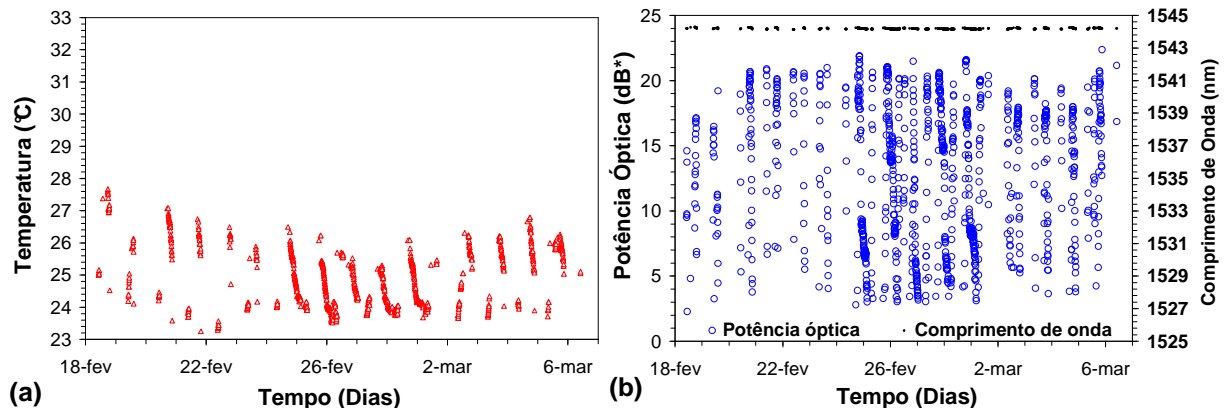


FIGURA 8 - Resultados dos testes ambientais nos sistemas de monitoração de temperatura FSO/DBG para linhas de transmissão aéreas (LTs) emulados: (a) temperatura e (b) potência óptica do pico espectral e comprimento de onda.

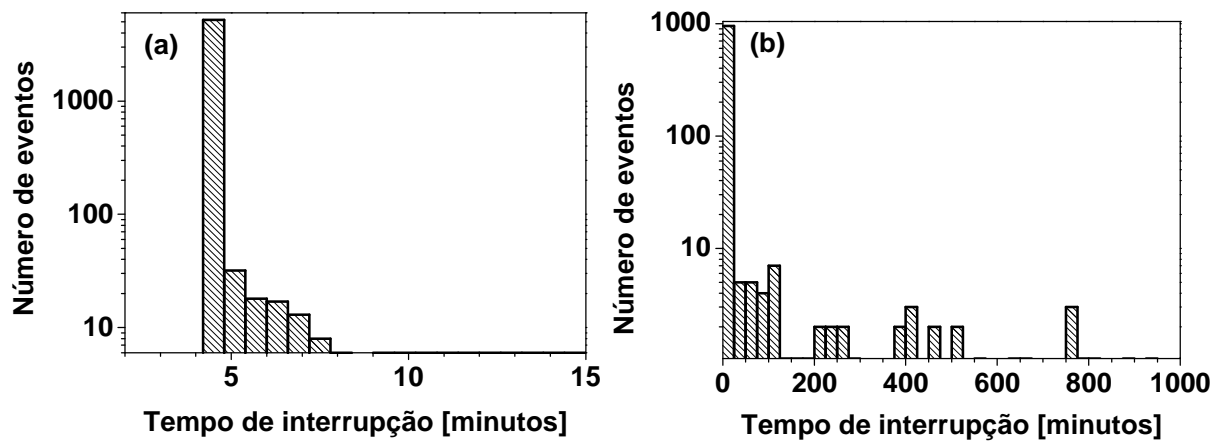


FIGURA 9 - Estatísticas de tempo de interrupção para os testes ambientais dos sistemas de monitoração de (a) barramentos de subestações; (b) linhas de transmissão aéreas.

5.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foi proposto o uso da óptica de espaço livre - FS, para transmitir e receber sinais ópticos de fibras dispostas no potencial terra para sensores de fibra de grades de Bragg, instalados na alta tensão usando colimadores ópticos. A avaliação da técnica foi realizada em um protótipo para estudo da sensibilidade do sistema ao alinhamento óptico e em ambiente externo por meio de sistemas emulando barramento de subestações e cadeias de isoladores de linhas de transmissão aéreas. Foi mostrado que o sistema FSO testado permite aos colimadores operar em distâncias de 50 cm a 200 cm. O intervalo maior de distância entre os colimadores é similar ao comprimento de uma cadeia de isoladores de até 230 kV. Foi também mostrado que o sistema proposto pode ser usado em ambiente externo real para monitoração de temperatura de barramento de subestações, onde, mesmo com indisponibilidade do sistema de 23%, o maior tempo de interrupção do sistema foi de 15 horas, mas a maioria dos tempos de interrupção foi menor que 8 minutos. Por outro lado, o sistema requer melhorias para ser utilizado em linhas de transmissão aéreas, onde o sistema apresentou indisponibilidade de 80.3% com número significativo de eventos de interrupção de aquisição superior a 150 minutos. Acredita-se que para o uso em LTs o sistema deve ser instalado em equipamento tipo pára-raios ou isoladores do tipo line post, com sua cadeia de isoladores rígida e com resultados esperados similares aos dos obtidos para monitoração de barramentos de subestações. Testes de campo envolvendo a tecnologia desenvolvida do sistema de monitoração FSO/FBG estão em curso na subestação de Bonsucesso da CEMIG em um sistema de 138 kV e os resultados serão divulgados posteriormente.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gangopadhyay, T. K., Paul, M. C. and Bjerkan, L., "Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage (400KV) power transmission lines", Proc. SPIE 7503, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, 75034M, (2009).
- [2] Huang, Q., Zhang, C., Liu, Q., Ning, Y. and Cao, Y., "New type of fiber optic sensor network for smart grid interface of transmission system," Proc. Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE , 1-5 (2010).
- [3] Bjerkan, L., "Application of Fiber-Optic Bragg Grating Sensors in Monitoring Environmental Loads of Overhead Power Transmission Lines," Appl. Opt., 39(4), 554-560 (2000).
- [4] Nascimento, C. A. M., Hortêncio, C. A., Ayres Neto, J. B. M., Aguiar, J. G. D., Leite, R. L., Costa, E. F., Dini, D. C., Borin, F., Longui, E. C., Curado, P. J. P., "SOMLT – Sistema Óptico para Monitoração em Tempo Real de Linhas Aéreas de Transmissão", XIX SNPTEE, Rio de Janeiro, 2007.
- [5] Clift, S., "Composite fibre optic insulators and their application to high voltage sensor systems," Proc. IEE Colloquium on Structural Use of Composites in High Voltage Switchgear/Transmission Networks, 7/1-7/6 (1992).
- [6] Palais, J. C., "Fiber coupling using graded-index rod lenses," Appl. Opt. 19(12), 2011-2018 (1980).
- [7] Yuan, S. and Riza, N. A., "General Formula for Coupling-Loss Characterization of Single-Mode Fiber Collimators by use of Gradient-Index Rod Lenses," Appl. Opt. 38(15), 3214-3222 (1999).