

# Desenvolvimento de Software Simulador para um Sistema de Interrogação Óptica

M. J. Sousa, A. D. F. Santos, C. S. Sales, R. C. Santos, H. P. C. Oliveira, A. Klautau e J. C. W. A. Costa

**Resumo**—O desenvolvimento de sensores de fibras ópticas baseados em grades de Bragg em fibra (FBG) é de crescente interesse devido às suas numerosas aplicações, como medidas de temperatura, deformação mecânica e redes distribuídas de sensores. O desenvolvimento de softwares de simulação de redes de sensores e do sistema de interrogação é importante para os avanços rápidos e de baixo custo nessa área. Neste trabalho é apresentado um software simulador de um sistema de interrogação óptico para redes baseadas em FBG. Ele é capaz de simular os principais sistemas comerciais que utilizam como princípio de interrogação a varredura espectral. O modelo apresentado incorpora ruídos da fonte e dos detectores, além da dependência em função do comprimento de onda dos principais componentes internos do interrogador. Adicionalmente, o próprio elemento sensor baseado em grades de Bragg é modelado computacionalmente e integrado ao sistema de interrogação. Para demonstrar o seu funcionamento, dois cenários são apresentados e discutidos, sendo os seus resultados validados com dados medidos obtidos de um equipamento comercial.

**Palavras-chave**—Sistema de interrogação, grades de Bragg em fibra, sensores ópticos, simulação.

## I. INTRODUÇÃO

Os sensores ópticos possuem aplicabilidade promissora na indústria, principalmente onde os objetos de interesse estão expostos à radiação, fortes campos elétricos e magnéticos. Por exemplo, na geração e distribuição de energia elétrica, o monitoramento online das condições dos condutores das linhas de transmissão ou da temperatura dos isoladores é muito mais natural para os sensores ópticos, pois os mesmos são geralmente dielétricos e passivos [1]–[6]. Sensores eletrônicos nestas mesmas condições estão sujeitos a EMI (*Electromagnetic Interference*) e também dependem de uma fonte de alimentação, cuja construção e isolamento constituiriam obstáculos consideráveis [7].

As redes de transmissão de energia elétrica também são cenários que revelam outra característica atrativa dos sensores ópticos, particularmente dos sensores em fibra óptica. Eles podem ser incorporados em redes ópticas de comprimento da ordem de quilômetros. Portanto, a rede de sensores pode ser instalada ao longo das linhas de transmissão, possivelmente aproveitando a infraestrutura dos cabos OPGW (*Optical fiber composite overhead Ground Wire*). Além disso, com os sensores inseridos na fibra óptica é possível construir uma rede

de sensores distribuída para monitorar a linha de transmissão ao longo de toda a sua extensão [8]–[10].

As grandezas de interesse monitoradas nas linhas de transmissão poderiam ser a temperatura dos condutores e dos isoladores, ângulo de catenária, vibrações, corrente elétrica, entre outras. Certamente cada uma destas grandezas depende de sensores ópticos apropriados baseados, por exemplo, em FBG, LPG (*Long Period Gratings*), rotacionadores de Faraday ou filtros Fabri Perot [11], [12]. Todos estes componentes podem ser de alguma forma integrados na mesma fibra óptica ou em fibras separadas de acordo com a compatibilidade de cada tecnologia. Devido a complexidade e diversidade de sistemas deste molde torna-se importante o uso de ferramentas de projeto e de simulação por computador [13]. Porém, os softwares disponíveis comercialmente são geralmente adaptados à simulação de redes ópticas de comunicação e não dispõem, por exemplo, de modelos de interrogadores comerciais ou de sensores ópticos. Além disso, é preciso considerar os custos destes softwares de simulação, que podem incluir funcionalidades desnecessárias.

Este trabalho tem como foco as redes de sensores ópticos baseados em FBG aplicadas no monitoramento da temperatura em redes de distribuição de energia elétrica. Para esta classe de sensores já é convencional o uso de instrumentos interrogadores baseados em varredura que estão disponíveis comercialmente e são largamente utilizados em monitoramento estrutural quasiestático. Sistemas como estes permitem redes de sensores com dezenas e até centenas de sensores ópticos e trechos de fibra óptica de comprimento da ordem de vários quilômetros. Neste trabalho serão apresentadas a formulação e a modelagem de um simulador para esse tipo de rede, incluindo a modelagem do sistema de interrogação.

O artigo está organizado como segue: a Seção II modela o interrogador óptico de varredura; a seção III modela a rede de sensores ópticos; a Seção IV apresenta e discute resultados e simulações em cenários de redes de sensores; as considerações finais e os trabalhos futuros são apresentados na Seção V.

## II. INTERROGADOR ÓPTICO PARA SISTEMAS BASEADOS EM FBG

### A. Estrutura Geral

A natureza e topologia das redes de sensores varia muito de acordo com as tecnologias dos sensores ópticos. O tipo mais comum de rede de sensores é aquela que usa sensores baseados em FBG. Neste caso geralmente é empregado um laser sintonizável ou um filtro sintonizável que essencialmente estabelece o comprimento de onda para a leitura da potência óptica refletida pelas FBGs. Como os sensores ópticos

Marco J. Sousa, Adam D. F. Santos, Claudomiro S. Sales, Renan C. Santos, Hyago P. C. Oliveira, Aldebaro B. R. Klautau e João C. W. A. Costa, Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil. E-mails: {marcojsousa, cssj, jweyl, aldebaro}@ufpa.br, adam.santos@itec.ufpa.br e hyago.oliveira@icen.ufpa.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e pela Transmissoras Brasileiras de Energia (TBE).

baseados em FBG traduzem a variação da temperatura ou deformação mecânica (ou uma combinação de ambas) em um deslocamento do comprimento de onda de máxima reflexão, torna-se desnecessário a utilização de esquemas de controle ou de compensação de potência [11], [14]. Além disso, novos sensores podem ser emendados à fibra sem quaisquer modificações do esquema de excitação e detecção, desde que os espectros de reflexão das novas FBGs não violem o intervalo de varredura do laser ou do filtro.

O tipo mais difundido de interrogador óptico é aquele que utiliza um laser sintonizável como fonte de excitação. Esse tipo de instrumento pode incorporar divisores ópticos (*splitter*) em sua arquitetura permitindo uma topologia de rede em estrela, cuja estrutura básica é mostrada na Fig. 1. Vários fabricantes oferecem produtos com esse tipo de arquitetura, como a FiberSensing, a HBM, a Micron Optics e a National Instruments [15]–[18].

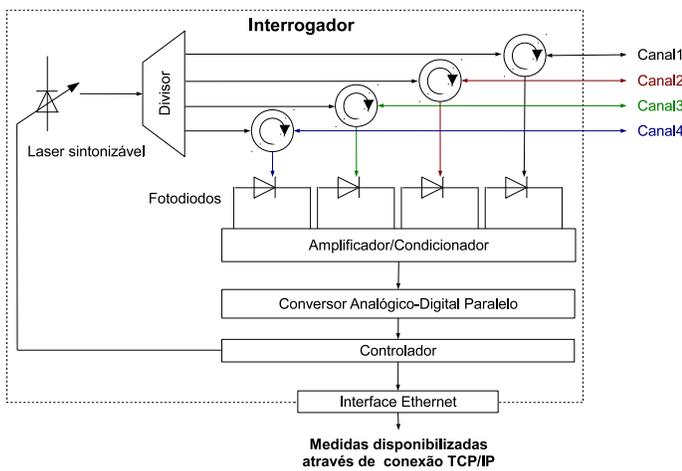


Fig. 1. Interrogador óptico de quatro canais utilizando laser sintonizável.

### B. Interface de medição e comunicação do interrogador

1) *Estados de operação do interrogador*: O protocolo do interrogador opera de acordo com certos estados lógicos e a mudança entre estes estados é definida por um autômato finito, como mostrado na Fig. 2. Mudanças de estado na unidade de medição podem ocorrer em função de comandos específicos enviados pelo software cliente e confirmados pelo interrogador.

A partir do estado *Ready*, a unidade de medição poderá acessar três outros estados nos quais ocorrem as aquisições dos sinais ópticos [19]:

- *Free Acquisition*: habilita medições individuais em um canal óptico específico;
- *Continuous Acquisition*: aquisição contínua do traço OSA (*Optical Spectrum Analyser*) com taxa de 1 S/s em todos os canais ópticos do interrogador; e
- *Scheduled Acquisition*: aquisição de dados com um período pré-definido e um determinado número de amostras.

O comando `”:ACQU:STOP”` encerra o processo de aquisição fazendo com que o interrogador retorne para o estado *Ready* [19].

As mudanças de estado *Error* para *Ready* e *Warming-up* para *Ready* não necessitam de entradas porque representam estados específicos em que o hardware de aquisição está indisponível por conta de um defeito ou simplesmente porque ainda não atingiu o estado de operação de regime.

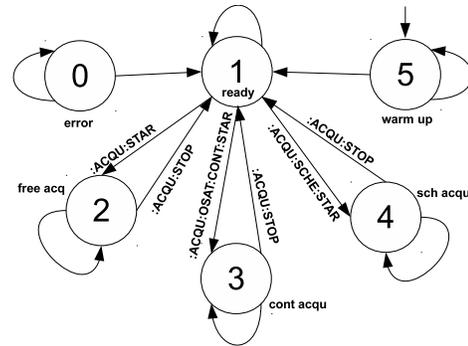


Fig. 2. Estados de operação da unidade de medição.

2) *Comunicação remota*: O controle da unidade de medição do interrogador óptico é realizado por intermédio de um protocolo de comunicação que segue o padrão de sintaxe de comandos *Standard Commands for Programmable Instruments* (SCPI), comumente utilizado para a padronização de comandos de dispositivos de medição. Cada comando é uma palavra em ASCII com argumentos separados por `”:` [19]. Os comandos podem ser classificados como: comandos comuns (`”:IDEN?”`, `”:STOR”` e `”:RECA”`), comandos de sistema (`”:SYST: ...”`), comando de status (`”:STAT?”`), comandos de aquisição (`”:ACQU: ...”`) e comandos de memória (`”:MEMO: ...”`). A Tabela I exemplifica alguns desses comandos e as respectivas respostas obedecendo o protocolo de comunicação. O software que faz uso do interrogador deve iniciar o diálogo com estes comandos SCPI enviando-os através de uma conexão TCP/IP. A seguir cada um desses comandos é detalhado:

- O primeiro comando solicita a identificação do interrogador, retornando uma lista com fabricante, número do modelo, número serial e revisão do *firmware*;
- O segundo comando visa identificar em qual estado a unidade de medição encontra-se, de acordo com a Fig. 2;
- O terceiro e o quarto comando requisitam data e hora, respectivamente;
- O quinto e o sexto comando realizam, respectivamente, o início e o término de uma aquisição de dados de sensores FBG em todos os canais do equipamento;
- O sétimo comando realiza uma aquisição de dados do traço do espectro óptico dos sensores FBG em um canal específico do interrogador (neste caso o canal 1), tendo como resposta todo traço do espectro dentro dos limites de comprimento de onda em que o equipamento opera; e
- O oitavo comando objetiva a aquisição contínua de traços do espectro óptico dos sensores FBG em todos os canais do interrogador. Esse comando é enviado através da porta 3500 e os dados correspondentes devem ser recebidos através da porta 3365. A resposta é um vetor de 20001 pontos vezes o número de canais com o traço OSA. Esses

pontos correspondem a valores de potência para todos os canais ópticos com pontos de 1500 nm a 1600 nm [19].

No software simulador foram implementados todos os comandos presentes na Tabela I, assim como os estados em que cada comando pode ser utilizado.

Tabela I  
EXEMPLOS DO PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO

Comando	Resposta
:IDEN?	ACK:FIBERSENSING, FS2X00 V3.0 ...
:STAT?	:ACK:3
:SYST:DATE?	:ACK:2012:12:04
:SYST:TIME?	:ACK:11:45:23
:ACQU:STAR	:ACK
:ACQU:STOP	:ACK
:ACQU:OSAT:CHAN:1?	:ACK:-43.045,-42.020,-41.944,...
:ACQU:OSAT:CONT:STAR	Porta 3500 ⇒ :ACK Porta 3365 ⇒ -43.045,-42.020,...

### III. SENSOR FBG

A FBG é considerada uma perturbação do índice de refração que pode ser descrita por

$$n(z) = n_{eff} + \delta n \left[ 1 + \nu \cos \left( \frac{2\pi z}{\Lambda} + \phi \right) \right], \quad (1)$$

onde  $n(z)$  é o índice de refração efetivo em função da dimensão axial  $z$ ;  $n_{eff}$  é o índice efetivo da fibra sem perturbação;  $\delta n$  é a variação média do índice efetivo em função de  $z$ ;  $\nu$  é o índice de modulação;  $\Lambda$  é o período nominal da grade e  $\phi$  é a fase da perturbação periódica.

Como mostrado em [20], a matriz de transferência de uma FBG uniforme pode ser calculada em função de  $n_{eff}$ ,  $\delta n$ ,  $\nu$ ,  $\Lambda$ ,  $\phi$ , além do comprimento da FBG dado por  $\Delta z$ . Quando os parâmetros  $\delta n$ ,  $\nu$ ,  $\Lambda$  ou  $\phi$  variam em função de  $z$  tem-se uma FBG apodizada.

Os interrogadores de varredura detectam o comprimento de onda  $\lambda_{max}$  do pico de máxima reflexão das FBGs. Portanto, os sensores ópticos traduzem a variação de temperatura ou deformação mecânica em perturbações de  $\lambda_{max}$ . Para simular o comportamento de um sensor óptico é necessário alterar os valores dos parâmetros de (1) de forma compatível com o deslocamento de  $\lambda_{max}$  esperado. Por simplicidade, assume-se que toda a perturbação de  $\lambda_{max}$  seja devido apenas a variações sofridas pelo parâmetro  $n_{eff}$ . Nesse caso é preciso encontrar uma relação entre a deformação mecânica e a variação de  $n_{eff}$ . Considere como ponto de partida a seguinte equação [21]:

$$\frac{\Delta \lambda_{max}}{\lambda_{max}} = \zeta_1 \varepsilon + \zeta_2 \Delta T \quad (2)$$

onde  $\Delta \lambda_{max}$  representa o deslocamento do pico de máxima refletividade;  $\zeta_1$  representa o coeficiente de tração;  $\varepsilon$  representa a deformação mecânica;  $\zeta_2$  é o resultado da combinação dos coeficientes de dilatação térmica, expansão mecânica, de tração e também do coeficiente termo-óptico;  $\Delta T$  representa variação da temperatura. De [20], para uma FBG uniforme:

$$\lambda_{max} = 2n_{eff}\Lambda \left( 1 + \frac{\delta n}{n_{eff}} \right). \quad (3)$$

Substituindo (3) em (2) e considerando uma dependência temporal de  $n_{eff}$ ,  $\varepsilon$  e  $\Delta T$ :

$$n_{eff}(t) = \frac{\zeta(t)\delta n + n_{eff0}}{1 - \zeta(t)}, \quad (4)$$

onde  $n_{eff0}$  representa o índice de refração efetivo do núcleo da fibra no estado inicial antes da aplicação da deformação ou alteração da temperatura. A função  $\zeta(t)$  é dada por:

$$\zeta(t) = \zeta_1 \varepsilon(t) + \zeta_2 \Delta T(t). \quad (5)$$

Neste trabalho a modelagem de FBG tem seu foco na análise de grades apodizadas divididas em seções de comprimento muito maior do que o período da corrugação. Cada seção pode ser aproximada como uma grade uniforme, uma vez que a variação do índice efetivo médio é muito pequena dentro de cada seção. Assim, uma grade apodizada pode ser aproximada por uma sequência de grades uniformes, cada uma delas representada por uma matriz de transferência. A matriz de transferência de toda a grade pode ser obtida através do produto de todas as matrizes das seções que a integram [20].

Para simular uma rede óptica conectada a algum canal do interrogador é necessário também considerar que as FBGs são na verdade ligadas uma após a outra, separadas por trechos de fibra óptica. Tais trechos também precisam ser representados por matrizes de transferência compatíveis com o modelo matricial utilizado em [20]. A matriz de transferência para um trecho de fibra de comprimento  $L$  e atenuação  $a$  (em dB) pode ser calculada através de:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \Phi & 0 \\ 0 & 1/\Phi \end{bmatrix}, \quad (6)$$

onde:

$$\Phi = 10^{a/20} \exp \left( -\frac{2\pi n_{eff} L}{\lambda} \right). \quad (7)$$

A matriz de transferência total para toda a rede óptica conectada a um canal qualquer do interrogador é calculada fazendo-se o produto entre todas as matrizes de transferência, tanto das FBGs como dos trechos de fibra. A partir da matriz de transferência total é possível calcular  $R(\lambda, t)$ , a refletividade da rede óptica em função do comprimento de onda  $\lambda$  e também do tempo  $t$ .

## IV. RESULTADOS E SIMULAÇÕES

### A. Modelagem do interrogador

Para o interrogador como aquele mostrado na Fig. 1, considere que a potência da luz gerada pelo laser seja dada pelo processo aleatório  $L(\lambda, t)$ . A potência óptica na saída do canal  $k$  do interrogador será multiplicada pelo fator  $\alpha_k$ , que representa as perdas devido ao divisor óptico interno, ao circulador e aos conectores. A luz é refletida pela rede de sensores e retorna para o interrogador, sendo detectada pelos fotodiodos, os quais adicionam ruído eletrônico (ruído

de escuro) descrito pelo processo aleatório  $D(\lambda, t)$ . A potência óptica detectada no canal  $k$  pode ser expressa como se segue:

$$P_{Rk}(\lambda, t) = \alpha_k L(\lambda, t) R_k(\lambda, t) + D(\lambda, t), \quad (8)$$

onde  $R_k(\lambda, t)$  representa a refletividade da rede de sensores conectada ao canal  $k$  em função do comprimento de onda e do tempo.

Obviamente os detectores possuem uma curva de sensibilidade em função de  $\lambda$ . Considera-se que o efeito desta sensibilidade em (8) esteja incorporado na função  $L(\lambda, t)$ . Portanto  $L(\lambda, t)$  modela a variabilidade da potência óptica do laser em função de  $\lambda$ , a variabilidade da sensibilidade dos detectores, o ruído eletrônico do circuito de excitação do laser e o ruído ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Observa-se também que  $\alpha_k$  representa na verdade todas as perdas do divisor, dos conectores e do circulador óptico acumuladas em todo percurso, desde a saída do laser até a entrada dos detectores.

Devido a quantidade de variáveis e componentes envolvidos é praticamente impossível criar um modelo teórico universalmente aplicável para  $L(\lambda, t)$ . Assim, neste trabalho optou-se por criar um modelo empírico a partir de medidas de um interrogador comercial. O equipamento utilizado para realizar as medidas foi o FS2200 da FiberSensing. Apesar de estar associado a esse equipamento, o modelo proposto pode ser estendido para outros sistemas de interrogação de fabricantes diferentes, desde que os processos  $L(\lambda, t)$  e  $D(\lambda, t)$  possam ser caracterizados apropriadamente seguindo procedimentos similares aos descritos a seguir.

As primeiras medidas foram coletadas ligando-se o canal 1 ao canal 2 do mesmo interrogador FS2200. Foi utilizado um *pathcord* de 2 metros de comprimento. Dessa forma, a luz gerada pelo laser passa pelo divisor, circulador, conector de um canal e pelo *pathcord* para depois ser submetida ao conector, circulador e detector do outro canal. Essencialmente, a luz percorreu os mesmos tipos de dispositivos e sofreu os mesmos efeitos como se um espelho fosse colocado imediatamente na saída de cada um dos dois primeiros canais do interrogador (desprezando-se as perdas adicionais provocadas pelo *pathcord*). Embora a luz não retorne pelo mesmo circulador pelo qual saiu, os fenômenos envolvidos são os mesmos; o padrão de ruído observado e o comportamento em função de  $\lambda$  são idênticos.

As curvas M1 e M2 na Fig. 3 representam as potências ópticas médias em miliwatts registradas pelo próprio FS2200 respectivamente para os canais 1 e 2. O FS2200 opera com uma taxa de varredura do laser de 1 janela por segundo. A resolução espectral é de 20001 pontos, o que representa 5 pm de separação entre amostras consecutivas em termos de comprimento de onda. Em modo de operação contínuo, o FS2200 processa exatamente 80004 pontos, 20001 para cada um dos seus 4 canais. O conjunto de 80004 pontos flutuantes é chamado de *frame*. Para as curvas M1 e M2 foram utilizados 1000 *frames* para o cálculo da média, o que representa 1000 segundos de coleta de dados. A curva M1 representa a potência média transmitida pelo canal 2 e recebida pelo canal 1, enquanto que a curva M2 é a potência média

transmitida pelo canal 1 e recebida pelo canal 2. Os valores de potência lidos são estimativas, pois o interrogador não foi projetado para operar como um *powermeter*.

Uma vez que os canais 1 e 2 estão conectados é razoável considerar  $R_k(\lambda, t) \approx 1$  e  $\alpha_k L(\lambda, t) \gg D(\lambda, t)$ . Portanto, as curvas M1 e M2 representariam as médias no tempo para  $\alpha_1 L(\lambda, t)$  e  $\alpha_2 L(\lambda, t)$ , respectivamente.

Algo bastante característico de M1 e M2 é o ponto de quebra localizado em torno de 1540 nm, onde ocorre uma óbvia mudança de inclinação das curvas. Utilizando uma aproximação segmentada linear sobre a curva média entre M1 e M2, tendo como ponto de quebra o comprimento de onda  $\lambda_Q = 1,540 \mu\text{m}$ , estima-se o valor médio de  $L(\lambda, t)$  como sendo:

$$L_M(\lambda) = \begin{cases} -6,255\lambda + 10,774 & \text{se } \lambda \leq \lambda_Q; \\ -2,502\lambda + 4,994 & \text{se } \lambda > \lambda_Q. \end{cases}, \quad (9)$$

onde  $\lambda$  é dado em  $\mu\text{m}$ .

Para M1,  $\alpha_1 = 0,973$ , para M2,  $\alpha_2 = 1,029$ . A Fig. 3, além de M1 e M2, também exibe as curvas  $L_{M1}$  e  $L_{M2}$  que são respectivamente aproximações  $\alpha_1 L_M(\lambda)$  e  $\alpha_2 L_M(\lambda)$ .

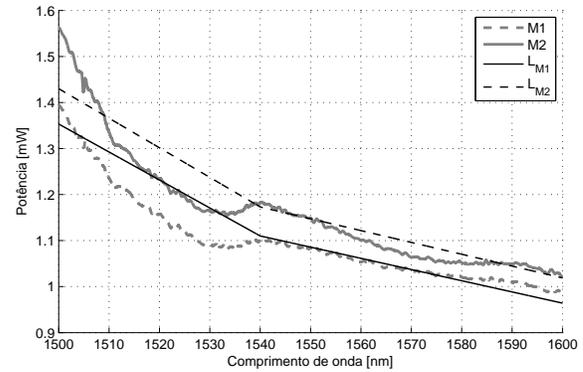


Fig. 3. Comparação entre M1, M2 e suas respectivas aproximações.

Um tratamento similar ao dispensado para a modelagem do valor médio de  $L(\lambda, t)$  também pode ser aplicado na modelagem do desvio padrão  $L_D$ . Entretanto, diferentemente do valor médio, observou-se que o desvio padrão da potência recebida nos canais 1 e 2 do interrogador resultaram independentes de  $\lambda$ . O valor médio de desvio padrão foi de  $L_{D1} = 1,226 \mu\text{W}$  e  $L_{D2} = 1,348 \mu\text{W}$  respectivamente para os canais 1 e 2. Fazendo  $L_D = 1,287 \mu\text{W}$ , então  $L_{Dk} \approx \alpha_k L_D$ .

De posse da média e do desvio padrão de  $L(\lambda, t)$  é possível obter uma aproximação razoável para  $L(\lambda, t)$  assumindo que a função densidade de probabilidade seja descrita por uma gaussiana. Isto é de fato confirmado pela Fig. 4, que exibe os histogramas médios H1 e H2 da potência óptica normalizada dos canais 1 e 2, respectivamente.

Para estimar a média e o desvio padrão de  $D(\lambda, t)$  foi utilizado um outro experimento no qual um *pathcord* foi conectado ao interrogador e a sua outra extremidade foi deixada livre e aberta. Nestas condições a potência óptica detectada pelo interrogador é devida apenas ao ruído eletrônico

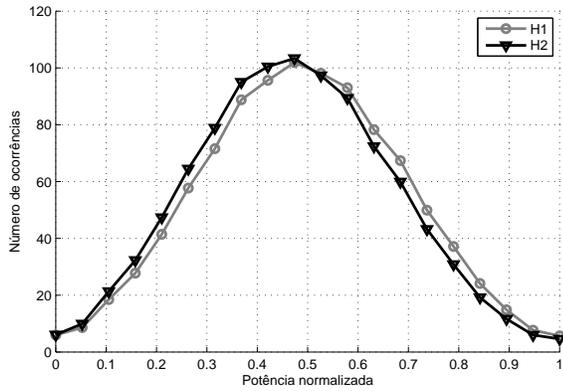


Fig. 4. Histogramas da potência óptica normalizada para os canais 1 (H1) e 2 (H2).

dos detectores de acordo com (8), pois  $R_k(\lambda, t) \approx 0$ . Observou-se um ruído gaussiano aparentemente independente de  $\lambda$ . Em média, foi registrado  $D_M = 7,56 \mu\text{W}$  e  $D_D = 0,378 \mu\text{W}$  respectivamente para a média e o desvio padrão de  $D(\lambda, t)$ . Os valores associados a cada canal individualmente são bastante próximos uns dos outros, com um erro máximo em relação a  $D_M$  e  $D_D$  inferior a 20%.

De posse das médias e dos desvios padrão de  $L(\lambda, t)$  e  $D(\lambda, t)$  e conhecendo suas respectivas distribuições, é possível reescrever (8) como:

$$P_{Rk}(\lambda, t) = \alpha_k [L_D N(t) + L_M(\lambda)] R_k(\lambda, t) + D_D N(t) + D_M, \quad (10)$$

onde  $N(t)$  é processo aleatório com distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão unitário.

### B. Simulações de cenários

Para o primeiro cenário, uma única FBG uniforme foi simulada tendo como base um sensor óptico de temperatura FiberSensing FS6300 [22]. Os parâmetros da FBG uniforme foram: comprimento de 1,1 cm,  $n_{eff} = 1,45$ ,  $\delta n = 8 \times 10^{-5}$ ,  $\nu = 1$ ,  $\Lambda \approx 522,789 \text{ nm}$  e  $\phi = 0$ . A refletividade obtida com estes parâmetros é de 90%, dentro da faixa de refletividade esperada para o FS6300. A largura de meio máximo do pico de refletividade também resultou compatível com as especificações do fabricante: em torno de 0,12 nm.

O sensor FS6300 real foi conectado ao canal 3 do FS2200 e os dados de potência neste canal foram registrados. A potência máxima obtida para o pico de refletividade foi de aproximadamente 0,687 mW. Com base neste parâmetro, foi estimado  $\alpha_3 \approx 0,591$ . A Fig. 5 compara o resultado da simulação utilizando (10) e o espectro de refletividade medido para o sensor real. A Fig. 6 exibe as mesmas curvas da Fig. 5, mas em escala logarítmica no intervalo de 1500 nm a 1550 nm.

Para o segundo cenário, três sensores virtuais (FBG1, FBG2 e FBG3) foram colocados na mesma fibra óptica. As três FBGs possuem  $\delta n = 10^{-4}$ ,  $\nu = 1$ ,  $n_{eff} = 1,45$  e comprimento de 1 cm. Porém, a FBG1 foi colocada a 5 km de distância do

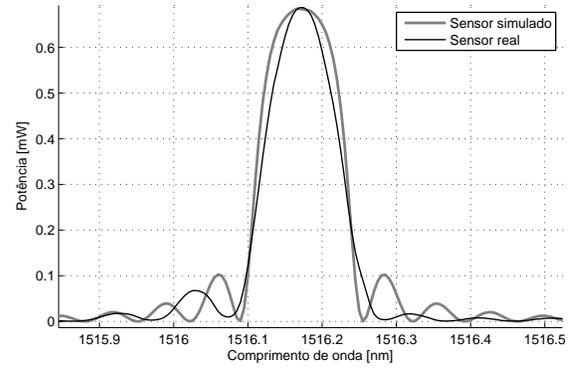


Fig. 5. Simulação e dados reais de um sensor óptico de temperatura para o primeiro cenário.

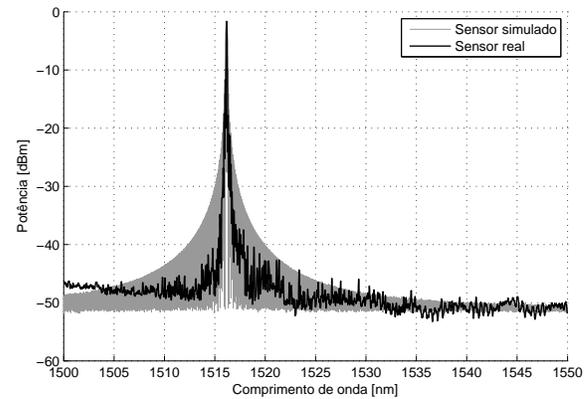


Fig. 6. Simulação e dados reais para o primeiro cenário com a potência em dBm.

interrogador e possui  $\Lambda = 525,826 \text{ nm}$ . A FBG2 foi colocada a 6 km de distância do interrogador e possui o mesmo valor de  $\Lambda$  que FBG1. A FBG3 foi colocada a 7 km de distância do interrogador e possui  $\Lambda = 534,446 \text{ nm}$ . Foi considerada uma atenuação de -0,2 dB/km para a fibra óptica.

A Fig. 7 exibe a resposta espectral simulada em escala logarítmica para a potência óptica recebida pelo interrogador caso a rede de sensores fosse colocada no canal 3. A Fig. 8 exibe com detalhes o primeiro pico da potência óptica detectada. Observa-se nesta figura o surgimento de fendas, o que é esperado devido a ressonância entre a FBG1 e a FBG2. É importante notar que a baixa quantidade de pontos se deve ao uso na simulação da mesma resolução espectral do interrogador FS2200.

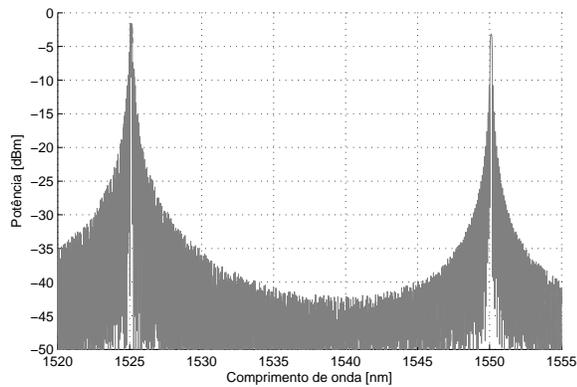


Fig. 7. Simulação para o segundo cenário com a potência em dBm.

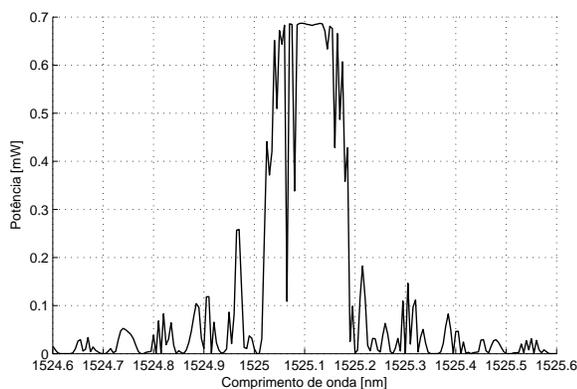


Fig. 8. Destaque para o primeiro pico de reflexão para a potência lida em miliwatts.

## V. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi apresentado o simulador de um sistema de interrogação com características semelhantes a de sistemas de interrogação comerciais. A modelagem do interrogador foi baseada em um modelo empírico obtido a partir de dados de um sistema de interrogação comercial, mas que pode ser estendido para outros equipamentos de modelos e fabricantes diferentes. O modelo apresentado incorpora ruídos da fonte e dos detectores, além da dependência em função do comprimento de onda dos principais componentes internos do interrogador. Adicionalmente, o próprio elemento sensor baseado em grades de Bragg foi modelado computacionalmente e integrado ao sistema de interrogação. Os resultados usando grades simples ou conjunto de grades formando uma rede de sensores mostraram a consistência dos modelos e do simulador. Para os próximos passos pretende-se estender o software simulador incluindo outras funcionalidades, como as simulações dinâmicas onde os sensores têm suas temperaturas e deformações variantes com o tempo; incluir cenários que utilizem outros tipos de componentes de rede, como acopladores ópticos e, finalmente, modelar o efeito da diversidade de polarização, permitindo a simulação de componentes tais como os rotacionadores de Faraday.

## REFERÊNCIAS

- [1] T. Ichino, T. Suzuki, T. Wada, and T. Sadahiro. Measurement of conductor temperature of power cable by optical fiber sensor. In *The 7th International Conference on Dielectric Materials, Measurements and Applications.*, pages 303–306, September 1996.
- [2] G. Yilmaz and S. E. Karlik. A distributed optical fiber sensor for temperature detection in power cables. *Sensors and Actuators.*, 125(2):148–155, 2006.
- [3] H. J. Kalinowski and R. C. Chaves. Quasi distributed optical fiber sensor for strain measurement along power conductors. In *The 3rd Iberoamerican Optics Meeting and 6th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Their Applications.*, pages 134–140, July 1999.
- [4] F. M. Araujo, L. A. Ferreira, and I. M. Dias. Surveillance of fiber optic cables and electric power cables using fiber bragg grating sensors. *Fiber Optic and Laser Sensors and Applications.*, 3541:279–289, November 1999.
- [5] T. K. Gangopadhyay and M. C. Paul. Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage (400kv) power transmission lines. In *The 20th International Conference on Optical Fibre Sensors.*, October 2009.
- [6] W. Guo and Y. Li. Temperature and strain online monitoring system of power cable based on fiber bragg grating. In *The 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing.*, pages 1–4, October 2008.
- [7] F. V. B. Nazaré. *Sistema de Monitoramento de Temperatura e Corrente para Linhas de Transmissão usando Tecnologia de Fibras Ópticas.* PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, May 2010.
- [8] A. Othonos and K. Kalli. *Fiber Bragg gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing.* Artech House, 1999.
- [9] W. W. Morey. Distributed fiber grating sensors. In *The 7th International Conference on Optical Fiber Sensors.*, pages 285–288, May 1990.
- [10] A. D. Kersey and A. Dandridge. Applications of fiber-optic sensors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology.*, 13(1):137–143, march 1990.
- [11] B. Culshaw. Fiber optics in sensing and measurement. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.*, 6(6):1014–1021, November 2000.
- [12] B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology.*, 9(2):57–79, April 2003.
- [13] OptiSystem. Optical communication system design software for system engineers. [http://www.optiwave.com/products/system\\_overview.html](http://www.optiwave.com/products/system_overview.html), Jan 2012.
- [14] N. Haramoni. *Sistema para interrogação de redes de Bragg utilizando laser EDF sintonizado.* PhD thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, February 2007.
- [15] FiberSensing. FiberSensing – measurement units. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=33208](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=33208), Jan 2012.
- [16] HBM. The optical measurement chain from HBM test and measurement. <http://www.hbm.com/en/menu/applications/experimental-stress-analysis/optical-sensing/>, Jan 2012.
- [17] Micron Optics. Micron optics, inc. – instruments. [http://www.micronoptics.com/sensing\\_instruments.php](http://www.micronoptics.com/sensing_instruments.php), Jan 2012.
- [18] National Instruments. NI PXIe–4844 optical sensor interrogator for fiber bragg gratings – national instruments. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/209012>, Jan 2012.
- [19] FiberSensing. FS2100–2200 Standard Rack–Mountable Braggmeter User Manual. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=33208](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=33208), Nov 2011.
- [20] T. Erdogan. Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology.*, 15(8):1277–1294, August 1997.
- [21] W. Shang Lin Zhang and I. Bennion. *Fiber Optic Sensors.* CRC Press, 2008.
- [22] FiberSensing. FS6300 – temperature sensors datasheet. [http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM\\_PaginaId=27933](http://www.fibersensing.com/PageGen.aspx?WMCM_PaginaId=27933), Jan 2012.