

Numerical Analysis of Remote Optical Fiber Sensors Systems with Raman Optical Amplification

E. Melão, M. Lamim, A. Dos Santos, D. Coelho, M. Pontes, and T. Coelho

Abstract—This work develops a continuous wave numerical model based on the spatial propagation of the pumps and signals into the optical fibre in a Raman amplification scheme that can be helpful to predict the behavior of different architectures in a remote optical fiber sensor system based on a long period grating. The numerical model is validated by experimental results and is applied in the analysis of the noise generated by Raman amplification in the remote optical sensors systems. After that, the numerical model is applied to analyze the most viable architecture to be implemented in an experimental measure in the temperature remote optical sensor with 50 km distance between the central unit and the sensor head. An electrical interrogation scheme is used due their low cost and good time response. The simulation results show 2,8 dB improvement in OSNR estimation for an optical amplification scheme using two optical fibers instead of only one for the same distance length.

Index Terms—Fiber bragg gratings, Long period gratings, Raman amplification, Optical fiber sensor.

I. INTRODUÇÃO

GRADES de difração em fibras são importantes dispositivos no sensoriamento óptico de parâmetros químicos e físicos. As Grades de Bragg (FBGs) e as Grades de Período Longo (LPGs) são exemplos de tais dispositivos que trabalham com o efeito da difração. A aplicação destes inclui o uso em lugares com intensa radiação eletromagnética, como em aplicações de monitoramento de linhas de transmissão [1-3] e em locais de difícil acesso. Para sistemas sensores em longa distância, é necessário considerar a amplificação óptica, para evitar que a qualidade do sinal óptico deteriore a níveis inferiores à sensibilidade da medida.

Os sensores baseados em grades de difração são dispositivos pequenos e leves sendo facilmente embutidos em estruturas, permitindo a multiplexação de muitos sensores ópticos ao longo de um grande trajeto de fibra óptica. As LPGs, em particular, apresentam grande sensibilidade a parâmetros do meio ambiente sem a necessidade de deformação química da casca da fibra óptica, sendo utilizadas diretamente como elemento sensor, devido ao seu maior período de modulação (entre 100 e 1000 μm) provocar acoplamento com os diferentes modos de casca da fibra óptica.

As FBGs e LPGs operam em curtas distâncias devido à atenuação da fibra óptica, principalmente no caso da LPG. Sendo assim, a aplicação de esquemas de amplificação óptica pode resolver essa desvantagem. A amplificação Raman é a tecnologia de amplificação mais interessante a ser aplicada na detecção remota, pois a própria fibra monomodo padrão pode ser usada como meio de ganho, melhorando a figura de ruído em relação a um amplificador concentrado e reduzindo a desvantagem de efeitos não-lineares, como *Four Wave Mixing* (FWM), automodulação e modulação cruzada de fase na interação entre os sinais modulados na fibra óptica. Além disso, a largura de banda da amplificação pode ser otimizada pela mudança dos parâmetros de bombeio. Essas vantagens promovem o uso dessa tecnologia em projetos de sistemas sensores multiplexados.

Devido a estas características apresentadas, a amplificação óptica é um instrumento chave aplicado à detecção remota. Lee et al. [4] demonstraram um sistema de detecção de longa distância baseado em um amplificador Raman para medição simultânea de temperatura e deformação usando um dispositivo sensor baseado em uma fibra dopada com érbio (EDF) combinado com uma FBG. Esse esquema permite o uso de um bombeio Raman reciclado para alimentar a EDF, que por sua vez atua como uma fonte de banda larga na cabeça sensora, atingindo uma distância de 50 km. Hu et al. [5] também relataram a capacidade de amplificação Raman em detecção remota combinada com dois estágios de amplificadores dopados à fibra de érbio (EDFAs) para atingir uma distância de operação de 100 km até a cabeça sensora composta por uma FBG.

Alahabi et al. [6] relataram um sensor de temperatura distribuído com alcance estendido, baseado na detecção coerente do deslocamento de frequência do retroespalhamento espontâneo de Brillouin combinado com a amplificação Raman usando um sistema de detecção de micro-ondas. Bravo et al [7] demonstraram um sensor de deslocamento remoto de 253 km, baseado em um espelho de fibra, interrogado por um refletômetro comercial óptico de

Eduardo Melão, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, eduardo.melao@engenharia.ufjf.br.

Mayk A. Lamin, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, mayk.alves@engenharia.ufjf.br.

Alexandre B. Dos Santos, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, alexandre.bessa@engenharia.ufjf.br.

Diogo Coelho, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, diogo.coelho@engenharia.ufjf.br.

Maria J. Pontes, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Espírito Santo, Brasil, alisson-amorim@hotmail.com.

Thiago V. N. Coelho, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, thiago.coelho@engenharia.ufjf.br.

Corresponding author: Thiago V. N. Coelho.

domínio de tempo. Todos eles consideram basicamente análises experimentais.

Este artigo discute sensores remotos baseados em fibra óptica possibilitados pela amplificação óptica. Diferentes arquiteturas de sistemas de sensores remotos, tanto quanto à posição dos lasers de bombeio para amplificação como a posição das redes de difração (que atuam como sensores) e a quantidade de canais de fibra óptica são avaliadas. Na seção 2 são apresentados os modelos matemáticos que descrevem os sistemas de amplificação Raman, bem como a metodologia para aplicação dos mesmos em sistemas sensores à fibra óptica baseados em grades de difração. Na seção 3 é apresentada a arquitetura deste tipo de sistemas e na seção 4 são descritos os testes e resultados alcançados. A validação dos resultados das simulações é realizada por análises experimentais e, a análise de ruído gerado pela amplificação Raman nos sistemas de sensores remotos é feita por meio de simulações aplicando tal modelagem numérica.

II. ANÁLISE NUMÉRICA

A análise da detecção remota requer basicamente dois parâmetros principais para o projeto do sistema. O primeiro diz respeito à tecnologia de amplificação óptica utilizada para permitir a transmissão de dados para a unidade de recepção, enquanto a última se refere à técnica de interrogação de sinais a ser selecionada para fazer a leitura do sinal do sensor [8].

A amplificação óptica permite atenuar os efeitos de perda na fibra óptica, aumentando os níveis da intensidade do sinal na unidade de recepção e melhorando a relação sinal-ruído. Isto melhora a performance do sistema de detecção de longa distância, o que significa neste artigo aumentar o alcance máximo dos sistemas remotos de detecção em fibras ópticas.

Certamente a seleção de uma tecnologia para fornecer amplificação óptica em sistemas de detecção remota precisa considerar o compromisso com vários fatores, como a figura de ruído do amplificador no sistema óptico que é alterada devido aos diferentes níveis de relação sinal-ruído para diferentes arquiteturas de sistemas sensores e topologias de amplificação, o alcance com sistemas de sinais distribuídos, o custo e o tempo de instalação e a detecção de múltiplos parâmetros.

A modelagem discutida neste artigo para detecção remota aplica amplificação Raman. Estes sistemas apresentam custos baixos, pois não necessitam de fibras ópticas especiais para prover amplificação de sinal, utilizam a infraestrutura existente para comunicações em fibra óptica e são facilmente reconfiguráveis. Além disso, como já citado, sua facilidade para otimização da banda de ganho pela mudança de parâmetros de bombeio permite implantar um sistema altamente adaptável a mudanças na escalabilidade do sistema.

Um modelo de propagação espacial considerando a onda contínua (CW) que inclui os efeitos físicos mais importantes presentes nas potências de sinal e de bombeio sob um ambiente com a amplificação Raman é descrito em [9]. Algumas melhorias e modificações de tal modelo foram reportadas por [10], [11] e [12] considerando a propagação de lasers de múltiplos sinais e múltiplos bombeios. Tal modelagem pode ser representada pela equação:

$$\begin{aligned} \frac{dP_v^\pm}{dz} &= \mp \alpha_v P_v^\pm \pm \varepsilon_v P_v^\mp \\ &\pm P_v^\pm \sum_{\mu > \nu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ &\pm 2\hbar\nu B_e \sum_{\mu > \nu} \frac{C_{R\mu\nu}}{\Gamma} (P_\mu^+ + P_\mu^-) [1 + \eta(T)] \\ &P_v^\pm \sum_{\mu < \nu} \frac{\omega_\nu C_{R\nu\mu}}{\omega_\mu \Gamma} (P_\mu^+ + P_\mu^-) \\ &\mp P_v^\pm \sum_{\mu < \nu} \frac{\omega_\nu C_{r\nu\mu}}{\omega_\mu \Gamma} [1 + \eta(T)] 4\hbar\mu B_e \end{aligned} \quad (1)$$

onde $\eta(T)$ é o fator térmico, que corresponde à população de fônons e é definido como

$$\eta(T) = \frac{1}{\exp\left[\frac{\hbar(\mu - \nu)}{KT}\right]}$$

Sendo P_μ, P_ν, α_μ e α_ν os coeficientes de potência e atenuação relativos às frequências μ e ν , respectivamente. Os sobrescritos “+” e “-” indicam, respectivamente, a propagação na direção positiva ou negativa do eixo z , $C_{R\mu\nu}$ é a eficiência do ganho Raman entre as frequências μ e ν , Γ é o fator de polarização assumindo o valor de 1 se as polarizações entre sinais e bombeios são preservadas e 2 quando as polarizações não são mantidas, ε_v é o coeficiente de espalhamento de Rayleigh, h é a constante de Planck, K é a constante de Boltzmann, T é a temperatura absoluta na fibra óptica e B_e é a largura de banda do ruído considerada.

O primeiro termo corresponde às perdas na fibra óptica e o segundo termo é relacionado ao duplo espalhamento Rayleigh. O terceiro termo refere-se ao ganho Raman para uma frequência ν gerado por frequências mais altas. O quarto termo fornece a ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), que é a amplificação da emissão espontânea, na frequência ν , com a contribuição do fator térmico. O quinto termo corresponde à depleção na frequência ν , devido a interação com as frequências mais baixas, e o sexto termo é a perda na frequência ν devido ao ruído de emissão em frequências menores.

Existem basicamente quatro tipos diferentes de ondas propagando na fibra óptica que faz parte do sistema sensor que permitem a definição das condições de contorno no começo e no fim da fibra óptica, conforme mostrado na Fig. 1. É assumido um sinal de entrada propagando na direção positiva do eixo z representado por um sinal de potência P_{sinal} e um sinal refletido dado por P_{sinal}^{ref} , propagando na direção negativa do eixo z . A potência de bombeio é representada por $P_{bombeio}$ e a do sinal de bombeio refletido por $P_{bombeio}^{ref}$, podendo ser encontrado no início ou no final da fibra, dependendo da configuração utilizada.

As equações diferenciais acopladas dadas por (1) são resolvidas com métodos numéricos usando as condições de contorno. Neste trabalho as equações foram resolvidas utilizando o pacote bvp4c do software Matlab. Este pacote possui um método para soluções de equações diferenciais

acopladas através de uma suposição inicial para a solução que deve ser provida como entrada do método.

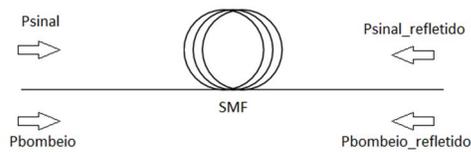


Fig. 1. Condições de contorno aplicadas à fibra óptica na resolução do modelo numérico em um esquema de bombeio copropagante.

Com esta suposição é realizado o cálculo por aproximação numérica da solução baseada nas equações diferenciais e analisado o resíduo gerado que é comparado com o resíduo tolerado. Quando esta tolerância é atingida a solução é encontrada, neste trabalho o critério de parada era atendido se o erro absoluto fosse da ordem de 10^{-6} ou erro relativo da ordem de 0,1 por cento. O método de resolução utilizado nesse pacote pode ser descrito pelo fluxograma da Fig. 2.

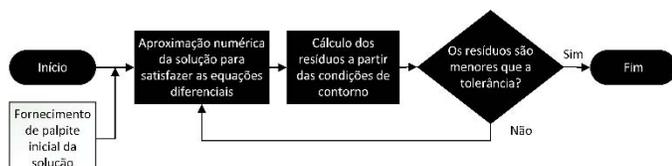


Fig. 2. Fluxograma do método numérico de resolução de problemas de valor de contorno utilizado pelo *bvp4c*.

Em aplicações de telecomunicações, as condições de contorno são bastante conhecidas como ilustrado na Fig. 1. A intensidade do sinal (P_{sinal}) e do bombeio ($P_{bombeio}$) são parâmetros de entrada para o cálculo de resíduos do *solver* e o sinal e bombeio refletidos no final da fibra podem ser desprezados em um primeiro momento.

Um problema encontrado ao modelar este sistema de detecção é o fato de que a potência refletida pelo sensor não é previamente conhecida antes que primeiro o sinal transmitido pelas fontes de sinal e de bombeio seja calculado. Com o objetivo de resolver esse problema, a solução numérica é implementada em 3 passos: I) Inicialmente, assumem-se P_{sinal}^{ref} e $P_{bombeio}^{ref}$ nulas, enquanto P_{sinal} e $P_{bombeio}$ são tomadas como parâmetros de entrada; II) Depois de executar o primeiro passo, se as características de reflexão da cabeça sensora forem bem conhecidas, a potência do sinal refletido pode ser calculada; III) Finalmente, o primeiro passo é repetido, mas assumindo que a potência do sinal refletido é idêntica ao valor obtido no passo II.

Diferentes arquiteturas de bombeamento podem ser utilizadas. Bombeios copropagantes podem elevar a intensidade do sinal logo após a saída da fonte e, nesta posição, dependendo do nível do sinal, a potência pode atingir valores elevados gerando efeitos não lineares indesejados. Entretanto, em esquemas de sensoriamento remoto, a localização do bombeio junto a central de interrogação do sinal é desejável, pois a unidade sensora localizada ao fim do enlace de fibra pode estar posicionada em locais de difícil acesso, gerando dificuldades em possíveis manutenções a serem realizadas.

Esquemas de bombeamento contrapropagante em sensores como FBG e LPG têm a facilidade de amplificar uma boa parte do sinal já processado pelo sensor, isto é, o ganho de sinal será mais concentrado na região de espectro útil para interrogação dos sensores, porém deve ser ter a preocupação de o nível de sinal não chegar a valores tão baixos, no mesmo patamar do ruído, antes de ocorrer a amplificação.

III. SISTEMAS SENSORES REMOTOS

A configuração básica considerada nos experimentos é mostrada na Fig. 3, contendo a Unidade A que compõe a unidade de interrogação, formada por uma fonte óptica de banda larga e um analisador de espectro óptico (OSA) da Thorlabs modelo OSA202C, utilizado para medir o sinal óptico recebido da Unidade B. A unidade B possui a cabeça sensora que contém a LPG desenvolvida no LITel (Laboratório de Instrumentação e Telemetria) da UFJF (Universidade Federal de Juiz de Fora) sendo usada como elemento sensor, com um espelho acoplado que reflete parte da luz incidente.

O comprimento de onda de ressonância da LPG utilizada é 1545,2 nm com uma largura de banda de 15 nm apresentando uma razão de extinção em torno de 25 dB no modo de transmissão. Tais características da LPG fornecem uma alta sensibilidade da medida. Contudo, a alta sensibilidade de LPGs profundas impacta na redução da faixa dinâmica do circuito de interrogação.

Ainda compõem o sistema sensor uma fibra de sílica monomodo padrão (SMF) de 50 km de comprimento conectando a Unidade A à Unidade B e um laser de bombeio em configuração copropagante inicialmente. O comprimento de onda de bombeio é de 1455,1nm.

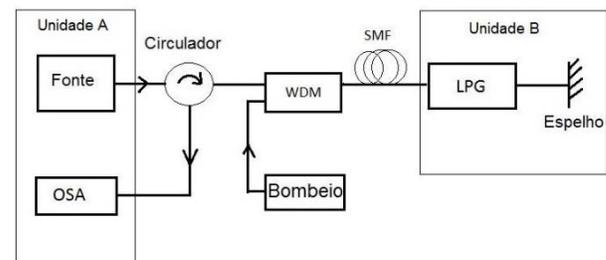


Fig. 3. Sensor remoto assistido por amplificação Raman em um esquema de bombeio copropagante.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando a LPG como o elemento sensor, diferentes arquiteturas, com relação a posição dos bombeios e adoção de uma ou duas fibras ópticas, nos sistemas sensores remotos, podem ser avaliadas. A validação dos resultados calculados é feita pela análise experimental baseada na arquitetura apresentada na Fig. 3. Após a validação do modelo, foram estudadas aplicações envolvendo a avaliação de sensibilidade de um sistema sensor LPG espelhado, assim como a avaliação de uma cabeça sensora híbrida LPG/FBG com ruído gerado pela amplificação Raman. Tais sistemas são analisados utilizando resultados da modelagem numérica apresentada na seção anterior.

As Figs. 4 e 5 mostram a comparação entre os resultados do modelo numérico (linha contínua) e os dados experimentais (marcadores) para um sistema sensor remoto em fibra óptica com 50 km de alcance. As potências de bombeio de 800 mW e 1 W foram acopladas ao sensor da fibra como mostrado na Fig. 3 com comprimento de onda de bombeio em 1455,1 nm.

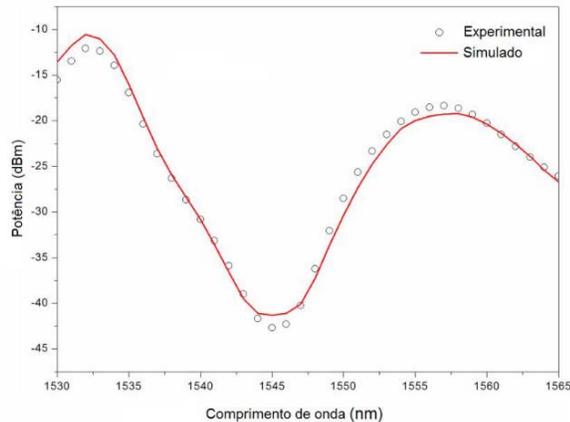


Fig. 4. Espectro óptico experimental (marcadores) e simulado (linha contínua) para uma potência de bombeio de 800mW.

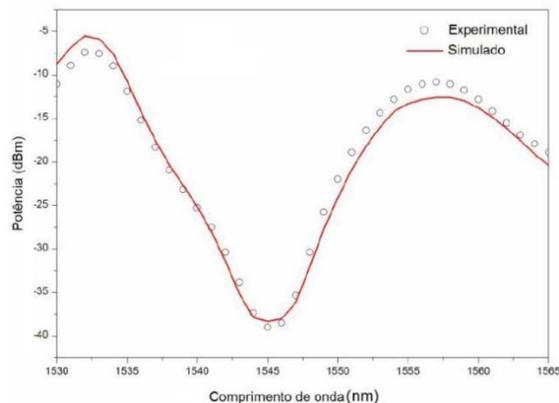


Fig. 5. Espectro óptico experimental (marcadores) e simulado (linha contínua) para uma potência de bombeio de 1W.

Os resultados das simulações e dos testes experimentais mostram uma boa aproximação. A maior discrepância entre os resultados experimentais e do modelo numérico ao redor da ressonância é de aproximadamente 1 dB no caso do bombeio de 800 mW, este fato ocorre possivelmente, pois a ressonância está em um nível mais próximo ao patamar de ruído.

A função de transferência da LPG, como mostrado na Fig. 6, foi obtida por meio de testes experimentais e foi considerada como dado de entrada nas simulações numéricas do sensor remoto de temperatura mostrado na Fig. 7. Para utilização do método bvp4C foi admitido como critério de parada resíduos da ordem 10^{-9} no cálculo de potência.

A largura de banda óptica é de cerca de 30 nm e o comprimento de onda de ressonância é de aproximadamente 1544 nm a 27° Celsius. O espectro experimental das grades de Bragg utilizadas na unidade de interrogação é também mostrado na Fig. 6, onde FBG1 e FBG2 estão centradas, respectivamente, em 1537,5 nm e 1548,5 nm.

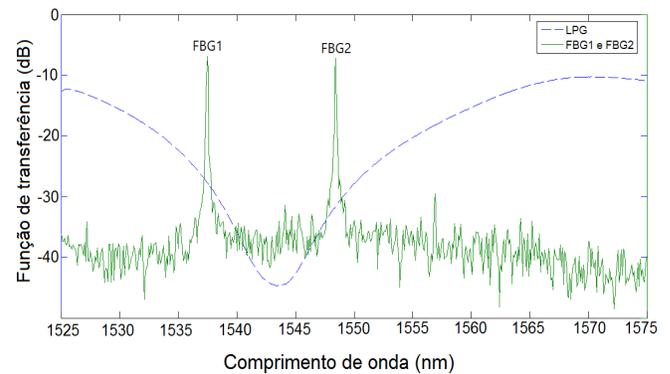


Fig. 6. Posição espectral das FBGs em relação a uma LPG no circuito de interrogação.

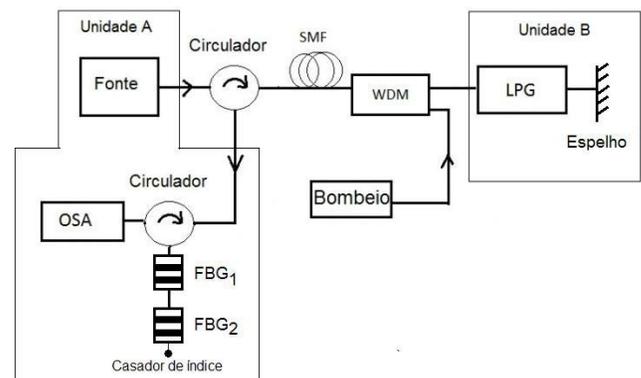


Fig. 7. Montagem utilizada na análise do sensor de temperatura, considerando diferentes alcances e interrogação óptica por meio das FBGs 1 e 2.

A. Caracterização da Sensibilidade e Alcance Máximo do Sistema Sensor LPG Espelhado

A validação da modelagem numérica por meio de dados experimentais permitiu calibrar as rotinas de simulação para reproduzir o design de uma LPG para aplicações em um sistema com amplificação Raman que expõe a LPG a altas potências de bombeio Raman, o que pode distorcer o espectro característico da LPG amplificando mais uma parte da banda do que outra.

A modelagem numérica foi aplicada para se estudar a influência da amplificação Raman na detecção de temperatura. O OSA disponível na Unidade A permitiu a caracterização inicial dos espectros das FBG1 e FBG2.

Foi escolhida uma configuração de bombeio Raman contrapropagante para privilegiar a amplificação do espectro refletido pela unidade sensora em detrimento do sinal da fonte, pois parte deste será rejeitado na unidade sensora e sua amplificação seria desperdiçada.

A interrogação utilizada no sistema de sensores é baseada no esquemático mostrado na Fig. 7 e considera uma técnica ratiométrica que explora a razão de potências obtidas do sinal óptico refletido das FBGs, onde FBG1 e FBG2 estão centradas nos comprimentos de onda, respectivamente, inferior e superior ao de ressonância da LPG. Logo, as FBGs não atuam como sensores e sim como intensidades de referências em comprimento de ondas fixos do espectro refletido da LPG.

Essa técnica de interrogação foi primeiramente aplicada em [13]. A potência óptica refletida obtida das FBGs 1 e 2 pode ser representada por uma relação conhecida como fator R , dada por $R = (I_1 - I_2)/(I_1 + I_2)$, onde I_1 e I_2 fornecem as intensidades do sinal óptico refletido provenientes, respectivamente, das FBGs 1 e 2.

A variação de temperatura modifica a posição da ressonância da LPG, o que muda a razão entre as intensidades de potência refletida das FBGs. A faixa dinâmica do sistema de detecção corresponde diretamente ao intervalo de máxima e mínima intensidades do sinal detectáveis e, além disso, depende da sensibilidade da LPG com a temperatura. A banda de rejeição da LPG é outra característica importante na performance do sensor de temperatura, já que uma banda de rejeição curta limita a excursão de FBGs pela região linear do perfil da LPG.

Além do mais, o sistema de interrogação pode ser avaliado por meio dos valores das intensidades de potência, isto é, determinando o fator R para as FBGs. Se a espessura de rejeição é fixada, a sensibilidade da medida aumenta à medida que a banda de rejeição da LPG se torna estreita devido a uma maior inclinação da função de transferência da LPG. A Fig. 8 ilustra o perfil da LPG calculado para diferentes bandas de rejeição: 15 nm, 30 nm e, 50 nm.

Podem ser mencionados que as curvas de LPGs apresentadas na Fig. 8 foram projetadas tomando como referência um perfil Gaussiano. Apesar de uma melhor aproximação da curva de LPG poder ser obtida resolvendo as equações de modos acoplados que permitem considerar diferentes perfis de modulação do índice de refração da fibra, a presente aproximação produziu resultados suficientes para a análise. Observa-se, a partir da Fig. 8, que as bandas de rejeição mais amplas aumentam a largura de banda óptica e suavizam a definição do pico, tornando-a mais plana ao redor do comprimento de onda de ressonância. Nesse caso, a inclinação diminui e afeta a sensibilidade dos sistemas de interrogação. As FBGs 1 e 2 utilizadas na unidade A foram centradas em 1537,5 nm e 1548,5 nm, respectivamente.

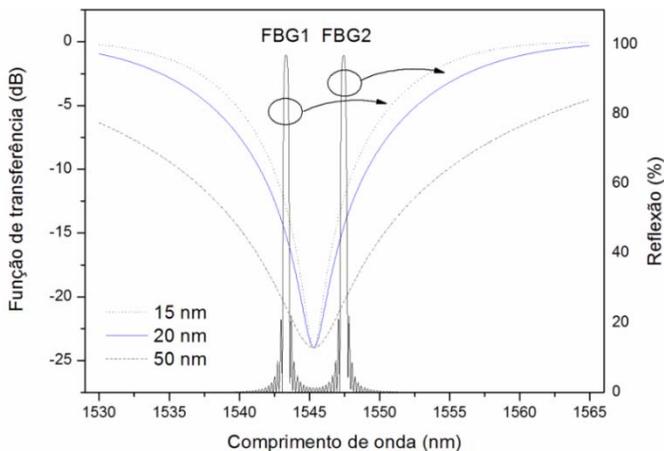


Fig. 8. Funções de transferência da LPG calculadas considerando bandas de rejeição de 15 nm, 30 nm e 50 nm com FBGs centradas em 1542 nm e 1547 nm.

A Fig. 9 mostra os resultados da simulação para o fator R em função da variação da temperatura para sistemas remotos

(Fig. 5) onde a cabeça sensora está afastada da unidade de interrogação de 50 km, 100 km, 125 km e 150 km.

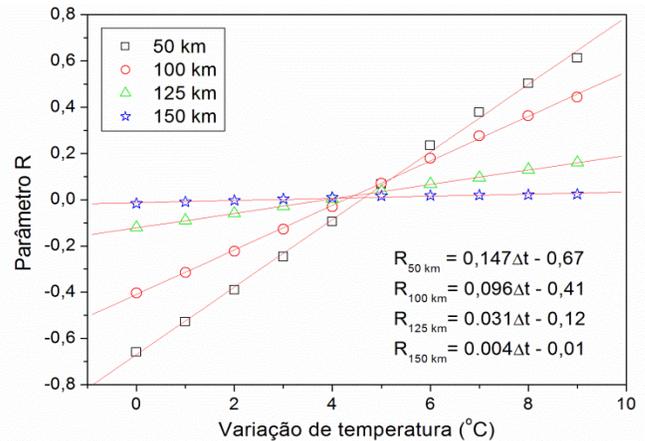


Fig. 9. Parâmetro R em função da variação da temperatura para distâncias de sensoriamento de 50, 100, 125 e 150 km.

Como observado na Fig. 9, o aumento da distância causa uma deterioração na sensibilidade do sistema remoto de detecção de temperatura, já que o sinal óptico é atenuado ao longo da propagação através da fibra, o que degrada a relação sinal-ruído em torno do comprimento de onda de ressonância da LPG. A sensibilidade de aproximadamente $0,15 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ foi obtida para 50 km de comprimento de fibra. A sensibilidade decai para $0,1 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ quando o sistema remoto opera a 100 km. À medida que a distância aumenta, a deterioração da sensibilidade aumenta, até alcançar a resolução mínima em 150 km. A potência do sinal óptico em tal distância já está em níveis de ruído de emissão espontânea amplificada (ASE) e ruído de Rayleigh, o que também degrada a recepção do sinal e faz com que a estas distâncias o sistema seja inviável.

O perfil espectral da LPG amplificada, detectado na entrada da unidade de interrogação, isto é, antes da propagação pelas FBGs, calculado pelo modelo numérico é mostrado na Fig. 10. A diminuição da sensibilidade pode ser observada e mostra a atenuação da fibra e o patamar de ruído afetando o sistema sensor remoto em distâncias maiores.

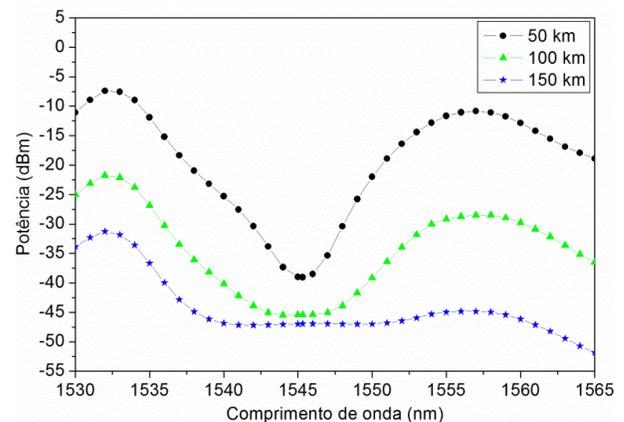


Fig. 10. Espectros do sinal da LPG na entrada da unidade de interrogação para distâncias de 50, 100 e 150 km.

Diferentes configurações de amplificação podem ser aplicadas com o objetivo de minimizar a figura de ruído e

melhorar o desempenho do sistema. O uso de duas fibras ópticas, uma para alimentar o sensor e a outra para captar o sinal de retorno, é uma das possibilidades. A primeira fornece uma fonte de banda larga à unidade sensora e, enquanto isso, a segunda fibra propaga o sinal processado na cabeça sensora para a unidade de interrogação. Além disso, esquemas de bombeios diferentes em cada caminho óptico podem ser implementados. As simulações aceleram o processo de análise até que se obtenha a melhor configuração possível para a implementação experimental.

B. Simulação de um Sistema Sensor Híbrido LPG/FBG

A fim de discutir como as características do ruído afetam a modelagem do sistema de sensores remoto usando a fibra SMF para conectar a cabeça sensora à unidade de interrogação, uma LPG/FBG híbrida relatada em [14] e mostrada na Fig. 11, foi simulada.

As FBGs contidas na cabeça sensora do sensor híbrido compõem a técnica de interrogação. Sendo assim, a medida simultânea da temperatura e do índice de refração pode ser realizada. A temperatura é sentida por FBG1 ou FBG2, enquanto que a medida do índice de refração é realizada pela LPG. Essa configuração híbrida é beneficiada pela boa sensibilidade da LPG para medir o índice de refração e as características das FBGs para operar no modo de reflexão. Além disso, a avaliação do *crosstalk* para as medidas de temperatura e índice de refração não é necessária, já que a FBG é a referência para a temperatura enquanto a LPG atua como refratômetro.

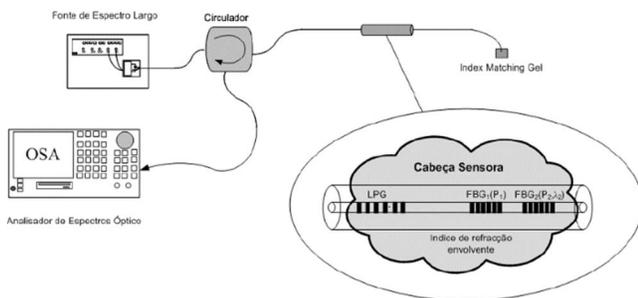


Fig. 11. Ilustração do sensor híbrido LPG/FBG simulado [14].

Os sinais refletidos referentes às grades de Bragg, mostrados na Fig. 12, apresentam dois espectros de reflexão estreitos e centradas nos seus respectivos comprimentos de onda de ressonância, o que permite estimar o ruído gerado pelo efeito do espalhamento espontâneo Raman em torno desses canais, determinando o parâmetro de relação sinal-ruído óptica (OSNR) analisado. A temperatura calculada pelo desvio do comprimento de onda da FBG e o índice de refração são determinados pela relação de potência das FBGs.

C. Cálculo do Índice de Refração por Meio de Interrogação Óptica por Razão de Potências

No sistema de detecção híbrido, o fator R foi determinado em função da variação do índice de refração usando duas FBGs com comprimentos de onda de ressonância centrados em 1535,5 nm e 1546,5 nm, respectivamente, e a ressonância da LPG localizada em 1542,5 nm. A largura da banda da amplificação foi de aproximadamente 15 nm e a resolução da

variação no índice em torno de 1550,0 nm de $-98 \text{ pm}/0,001 \Delta RIU$, onde RIU refere-se à unidade do índice de refração. A Fig. 12 mostra a função de transferência das FBGs e LPG consideradas na simulação.

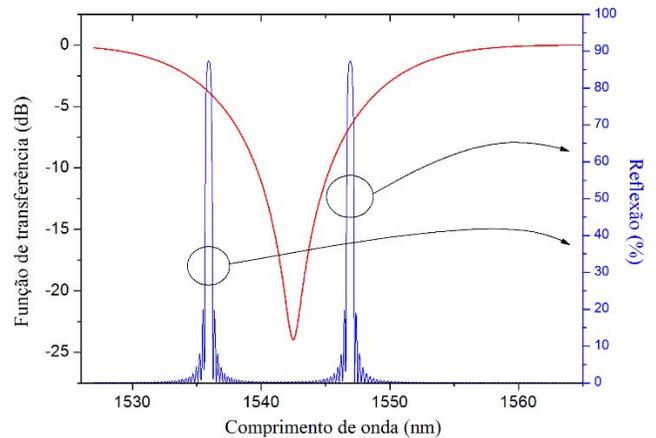


Fig. 12. Espectro das FBGs e da LPG usadas nas simulações do sensor híbrido para determinar a variação do índice de refração.

Uma fonte de luz de banda larga idealmente plana com potência de saída de -30 dBm foi considerada nas simulações. Dois lasers de bombeio Raman, definidos com 1441,8 nm e 1444,0 nm com potência de 350 mW cada, promoveram a amplificação em todo o espectro da LPG a fim de manter uma boa sensibilidade do sistema sensor híbrido para as distintas configurações avaliadas.

O fator R calculado considerando dois casos distintos é mostrado na Fig. 13. O caso 1 utilizou uma análise *back to back*, onde a cabeça sensora é iluminada diretamente pela fonte de banda larga sem a inclusão da fibra de transmissão SMF. O caso 2 analisou o comportamento do fator R acoplando 50 km de SMF com amplificação Raman copropagante com a fonte de banda larga.

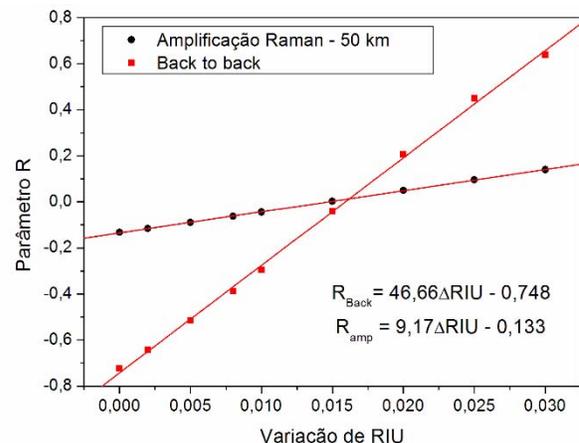


Fig. 13. Parâmetro R como função da variação do índice de refração para configurações *back to back* e 50km de SMF com amplificação Raman.

A faixa dinâmica da medida e a variação no índice de refração foi em torno de $0,03 \Delta RIU$. Para um sistema de detecção local é observar uma sensibilidade do fator R com variação do índice de refração de $46,66 \text{ RIU}^{-1}$. Enquanto isso, em um sistema de detecção remota com amplificação

Raman, o resultado obtido é $9,17 RIU^{-1}$, o que significa 5 vezes menor.

Parte dessa diferença pode ser atribuída à resolução que é reduzida quando longas distâncias são envolvidas e sinais de baixa potência são detectados na unidade de interrogação do sensor. Todavia, algumas arquiteturas podem minimizar as perdas causadas pela atenuação da fibra, o ruído (ASE e retroespalhamento Rayleigh) introduzido pela amplificação óptica e também para o uso de um maior número de elementos nessa configuração. Uma simples mudança na arquitetura pode ser realizada utilizando duas fibras de transmissão em vez de apenas uma. A primeira irá ligar a Unidade A à Unidade B, e a segunda fibra é utilizada para transmitir o sinal processado da cabeça sensora da Unidade B diretamente para o sistema de interrogação OSA, como mostrado na Fig. 14. Alguns testes de desempenho demonstraram um resultado duas vezes melhor que os previamente obtidos com apenas um caminho de fibra.

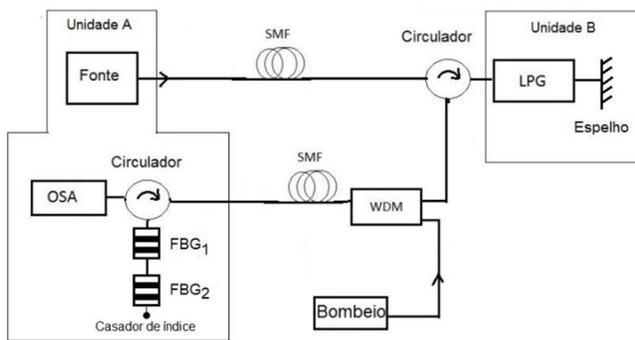


Fig. 14. Montagem com duas fibras ópticas e bombeio copropagante na segunda fibra, e interrogação óptica por meio das FBGs 1 e 2.

D. Cálculo do Índice de Refração com uma Configuração de Dois Canais de Fibra

Os resultados da simulação considerando dois caminhos de fibra são mostrados na Fig. 15 e Fig. 16, que contêm o espectro observado no OSA para o sistema sensor remoto.

O patamar de ruído observado no espectro, observado na Fig. 15, para o caso com apenas uma fibra, em torno dos comprimentos de onda da ressonância das FBGs é dominado principalmente pelo ruído ASE e o retroespalhamento Rayleigh.

Testes adicionais, mostrados na Fig. 16 mostraram que, introduzindo uma variação no índice de refração de 0,03 ao espectro mostrado na Fig. 16(c) e na Fig. 16(d), respectivamente 50 km e 60 km, há degradação da intensidade do sinal da FBG1 para o resultado de 60 km de comprimento de fibra considerando apenas um caminho óptico. Nesse caso, o ruído afeta fortemente a FBG1 resultando numa OSNR calculada menor que 0,5 dB.

Considerando a mesma variação do índice de refração de 0,03 para os alcances de detecção remota de 50 km e 60 km de SMF, um e dois caminhos de fibra foram avaliados. A Fig. 16 mostra esses resultados, pelos quais pode se notar uma degradação na intensidade do pico de FBG1 se forem considerados 60 km de apenas um caminho de fibra, como visto na Fig. 16 (c). Para distâncias maiores do que 50 km com apenas um caminho de fibra, a detecção não é praticável,

enquanto que o uso da configuração de dois caminhos de fibra possibilita a detecção. O piso do ruído variando de acordo com a configuração também pode ser observado na Fig. 16.

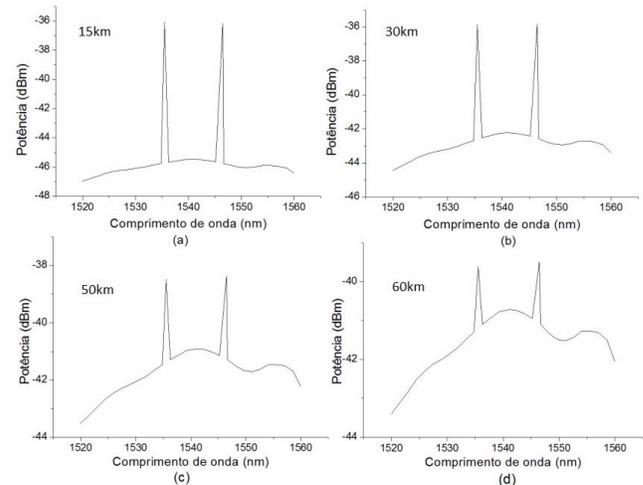


Fig. 15. Espectro do sistema híbrido na entrada do OSA considerando uma fibra SMF-28 comprimentos de (a) 15 km, (b) 30 km, (c) 50 km e (d) 60 km sob amplificação Raman.

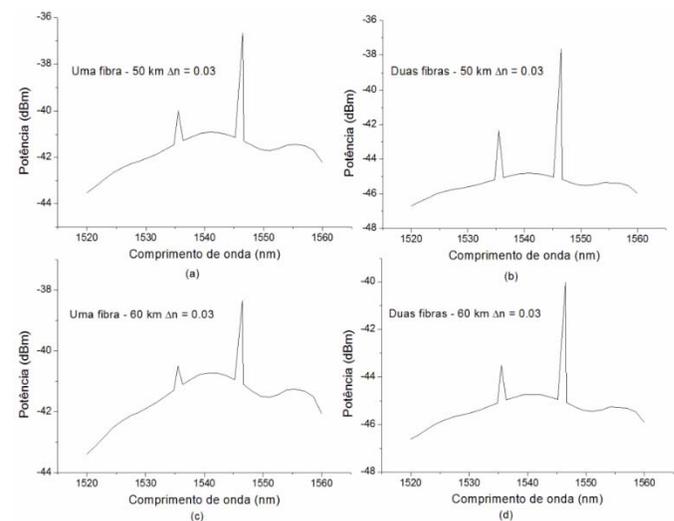


Fig. 16. Espectro do sistema remoto híbrido na entrada do OSA: (a), (c) com um único caminho de fibra e (b), (d) com dois caminhos de fibra considerando um alcance de sensoriamento de (a) - (b) 50 km e (c) - (d) 60 km.

A estimativa da OSNR em função do comprimento ou do alcance da detecção é mostrada na Fig. 17, considerando a variação do índice de refração de 0,015. Se ambas configurações de um e dois caminhos de fibra são consideradas na Fig. 16, a maior diferença observada nos valores de OSNR ocorre a 35 km do alcance do sistema de detecção com variação de OSNR de 2,8 dB. A estratégia de incluir uma fibra adicional como caminho exclusivo para transmitir o sinal submetido ao sensor contribui positivamente para aprimorar a OSNR do sistema de detecção remoto. Um divisor de potência de fibra 50/50 foi usado neste estudo a fim de acoplar uniformemente metade da potência em cada caminho de fibra.

A faixa dinâmica do sistema de detecção ainda pode ser melhorada se uma LPG com maior largura de banda em torno do comprimento de onda de ressonância for usada na cabeça

sensora. Contudo, a sensibilidade do sistema de detecção poderia sofrer com tal mudança, especialmente se a configuração conter apenas um caminho de fibra e poderia se exigir um maior número de bombes para promover a Amplificação Raman com o custo de se aumentar também o ruído ASE.

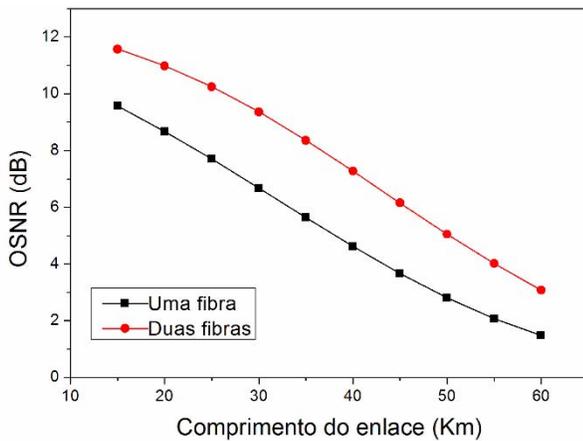


Fig. 17. OSNR como função do comprimento da fibra considerando as configurações de um e dois caminhos de fibra (SMF-28).

V. CONCLUSÕES

A análise e aplicação de uma modelagem numérica incluindo a amplificação Raman aplicada à detecção remota em diferentes configurações é discutida neste artigo. O elemento sensor depende das grades de difração, tanto a FBG quanto a LPG, para monitorar a temperatura e o índice de refração. Sem amplificação, o alcance do sistema é reduzido, como observado nas diferentes configurações de sensores avaliadas. Foi também identificado um alcance de amplificação óptica ótimo e confirmado que a sensibilidade do sensor pode ser afetada pela presença da amplificação óptica. As diferentes configurações discutidas podem ser aplicadas em diferentes sistemas de detecção remota.

Para a resposta do modelo numérico na análise do espectro do sensor o erro máximo conseguido foi da ordem de 1 dB permitindo prever o comportamento do sensor na banda espectral analisada.

A modelagem numérica descrita neste trabalho permite a utilização de diversos esquemas de detecção remota, além de possibilitar aplicar técnicas de previsão e otimização de sistemas sensores para otimização da banda de ganho Raman para aplicação em sistemas sensores multiplexados.

Conclui-se que esquemas utilizando duas fibras ópticas, separando o canal de alimentação do sensor e um canal de retorno com a amplificação concentrada nesta fibra óptica, permitiu uma melhor interrogação do sensor, aumentando a OSNR medida em torno de 2,8 dB neste caso.

REFERÊNCIAS

[1] M. Wydra, P. Kisala, D. Harasim, P Kacejko, "Overhead Transmission Line Sag Estimation Using a Simple Optomechanical System with Chirped Fiber Bragg Gratings. Part 1: Preliminary Measurements," *Sensors Basel*, 18 (1) 2018.

[2] G. Ma, Y. Li, N. Mao, C. Shi, C. Li, B. Zhang, "A Fiber Bragg Grating-Based Dynamic Tension Detection System for Overhead Transmission Line Galloping," *Sensors Basel*, 18 (2) 2018.

[3] D. H. Waters, J. Hoffman, M. Kumosa, "Monitoring of Overhead Transmission Conductors Subjected to Static and Impact Loads Using Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, 2019.

[4] Ju Han Lee, Y. M. Chang, Young-Geun Han, H. Chung, S. H. Kim e S. B. Lee. "Raman amplifier-based long-distance remote, strain and temperature sensing system using an erbium-doped fiber and a fiber Bragg grating." *Opt. Express*. v. 12. pp. 3515-3520, 2004.

[5] J. Hu, Z. Chen, X. Yang, J. Ng, e C. Yu. "100-km Long Distance Fiber Bragg Grating Sensor System Based on Erbium-Doped Fiber and Raman Amplification." *IEEE Sensors Journal*. v.11. p.1152, 2011.

[6] M. N. Alahbabi, Y. T. Cho e T. P. Newson. "150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification." *J. Opt. Soc. Am. B*. vol. 22. no.6. pp. 1321-1324. Junho, 2005.

[7] M. Bravo, J. M. Baptista, J. L. Santos, M. Lopez-Amo e O. Frazão. "Ultralong 250 km remote sensor system based on a fiber loop mirror interrogated by an optical time-domain reflectometer." *Optics Letters*. v. 36. n. 20. pp. 4059-4061. 2011.

[8] M. Fernandez-Vallejo, M. Lopez-Amo. "Optical Fiber Networks for Remote Fiber Optic Sensors." *Sensors*. v. 12. n. 4. pp. 3929-3951. 2012.

[9] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma e E. Rabarjaona. "Pump interactions in a 100 nm bandwidth Raman amplifier." *IEEE Photonics Technology Letters*. v. 11. n. 5. p. 530-532. Maio 1999.

[10] S. Namiki, Y. Emori. "Ultrabroad-band Raman amplifiers pumped and gain-equalized by wavelength-division multiplexed high-power laser diodes." *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics*. v. 7. n. 11. p. 316. Jan/Fev 2001.

[11] M. Achtenhagen, T. G. Chang, B. Nyman e A. Hardy. "Analysis of a multiple-pump Raman amplifier." *Applied Physics Letters*. v. 78. n. 10. p. 1322-1324. 2001.

[12] S. P. N. Cani, L. de Calazans Calmon, M. J. Pontes, M. R. N. Ribeiro, M. E. V. Segatto, A. V. T. Cartaxo. "An Analytical Approximated Solution for the Gain of Broadband Raman Amplifiers With Multiple Counter-Pumps." *Journal of Lightwave Technology*. v. 27. n. 7. pp. 944-951. Abril 1, 2009.

[13] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam e E. Joseph Friebele. "Fiber Grating Sensors." *Journal of Lightwave Technology*. v. 15. n. 8. p. 1442-1463. 1997.

[14] C. Jesus, et al. "Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Using a Hybrid Fiber Bragg Grating/Long-Period Fiber Gratings Configurations." *Fiber and Integrated Optics*. v.28. pp. 440-449. 2009.