

## Proposta de Sensoriamento Remoto de Temperatura e Deformação Simultaneamente via Fibra Óptica

Felipe Barino<sup>1</sup>  
Felipe Souza<sup>1</sup>  
Thiago Vieira Nogueira Coelho<sup>1</sup>  
Alexandre Bessa dos Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF  
Caixa Postal 96 - 36036-900 - Juiz de Fora - MG, Brasil  
thiago.coelho@engenharia.ufjf.br  
alexandre.bessa@engenharia.ufjf.br

**Abstract.** In this work, in order to measure simultaneously temperature and deformation remotely in two points, we explore the ease of multiplexing of the optical fiber sensors based on long-period gratings. Optical fiber sensors is a new trend sensing technology due their advantages in harsh environments like high electromagnetic interference and difficult access areas been applied in physical, chemical and biological sensors measurements. Thus, we proposed and investigated the association of two long-period grating sensors, and through simulations, it is possible to define the most suitable long-period grating parameters for simultaneous measurements of temperature and deformation. Finally, we have achieved temperature sensitivities of 0.4015 nm/°C and 0.4143 nm/°C, and deformation sensitivities of -5.6065 pm/με and -5.4914 pm/με, in each long-period grating respectively.

**Palavras-chave:** sensoriamento remoto, fibra óptica, temperatura, deformação, grades de período longo.

### 1. Introdução

Sensores à fibra óptica vêm sendo utilizados nas mais diversas áreas, encontra-se na literatura aplicações relevantes à biologia, Fu (2014), à química, Mau (2012) e à engenharia elétrica, Zhang (2015), por exemplo. Podemos associar o interesse no estudo desse tipo de sensor características como a imunidade à interferência eletromagnética, o tamanho reduzido, a facilidade de transmissão do sinal e a baixa atenuação, Lee (2005).

Uma das tecnologias mais promissoras de sensoriamento remoto baseado em fibras ópticas são as grades de período longo (LPG). O funcionamento desse tipo de sensor baseia-se no fato de que em grades de refração ocorre o acoplamento entre modos da fibra sob uma condição sensível ao ambiente externo. Especificamente, ocorre o acoplamento entre o modo fundamental do núcleo e os  $m$  modos da casca quando:

$$\lambda_{res}^m = (n_{eff,co} - n_{eff,cl}^m)\Lambda \quad (1)$$

Devido a essa transferência de potência entre modos, observamos bandas de atenuação no espectro de uma LPG centradas em  $\lambda_{res}^m$ , Erdogan (1997).

A relação entre a banda de atenuação e o período da LPG permite criar sensores com condições de acoplamento ligeiramente diferentes, com base nos parâmetros de construção da grade. Uma pequena diferença entre períodos de modulação é suficiente para variar o comprimento de onda ressonante. Isso abre espaço para a análise de diferentes comprimentos de onda ressonantes relacionados a diferentes sensores em um único sinal.

Nesse trabalho exploramos essa facilidade de multiplexação entre sensores à fibra e, através de simulações, estudamos a associação de duas LPGs para a medição simultânea de temperatura e deformação remotamente em dois pontos.

## 2. Metodologia de Trabalho

Foi utilizado o software *OptiSystem* para realizar a simulação do experimento, os sensores foram exportados do *OptiGrating* e importados no setup experimental mostrado na Figura 1. Os sensores foram criados em fibra SMF-28, segundo dados encontrados em Prashar et al. (2015), e as grades escritas sob os parâmetros listados na Tabela 1.

Tabela 1. Características das grades simuladas.

	Grade 1	Grade 2
Período	332 $\mu\text{m}$	343 $\mu\text{m}$
Índice médio	Média: $-1,479467 \times 10^{-5}$ Desvio padrão: $1,790933 \times 10^{-4}$ Variância: $3,207442 \times 10^{-8}$	Média: $-9,223313 \times 10^{-6}$ Desvio padrão: $1,509832 \times 10^{-4}$ Variância: $2,279593 \times 10^{-8}$
Comprimento	50 mm	50 mm
Modulação do índice	0,00025	0,00024
Número de segmentos	50	50

Existem diversas técnicas para se fabricar uma grade em fibra óptica na prática, sendo as principais: exposição UV, lasers  $\text{CO}_2$ , *femtosecond lasers* infravermelhos, implantação de íon, microfissuras mecânicas e arco elétrico, Rego (2016). Dentre elas, a última é uma das mais simples e a mais econômica.

Nesse trabalho, procuramos simular uma grade fabricada por arco elétrico, pois esse é o método que utilizamos para confecção de LPGs no Laboratório de Instrumentação e Telemetria (LiTel) da UFJF. Portanto aqui apresentamos um estudo de projeto, para posterior aplicação prática.

O processo de fabricação consiste em manter a fibra sem revestimento entre os eletrodos de uma máquina de fusão. Enquanto é fixado um peso a uma das extremidades, para garantir tensão longitudinal constante. Feito isso, aplica-se uma descarga de 7 a 15mA na fibra por meio da máquina de fusão por um período de tempo entre 200ms a 2s, Rego (2016). Logo após, a fibra é deslocada a distância do seu período e o processo é repetido quantas vezes forem necessárias para garantir a atenuação requerida, o espectro é monitorado em um analisador de espectro óptico (OSA) durante todo o processo.

A formação da LPG por arco elétrico ocorre devido a vários fatores, Rego (2005): difusão de dopantes, deformações na geometria da fibra, deformação por estresse. Da difusão de dopantes, ocorrem variações no índice de refração onde o arco foi incidido. Por essa razão adotamos o parâmetro Índice Médio (quarta linha na tabela 1) para simular as variações no índice de refração da fibra geradas pela escrita da grade. Os números aleatórios normalmente distribuídos foram gerados por meio da função *randn* do MATLAB num intervalo  $[-10^{-4}, 10^{-4}]$ , Sévigny (2009).

Os períodos de modulação diferentes foram escolhidos com o objetivo de separar os comprimentos de onda o suficiente para podermos acompanhar os vales de atenuação no espectro de transmissão. Enquanto a modulação do índice foi mais intensa na grade 1, pois esse parâmetro é responsável por uma maior atenuação no comprimento de onda ressonante. Logo, a identificação do comprimento de onda dessa grade se torna uma tarefa simples.

Após o sensor ser totalmente definido, o setup experimental mostrado na Figura 1 foi simulado. Vale notar que foram utilizadas três fibras ópticas: antes, entre, e depois das grades, o objetivo foi simular o sensoriamento a longa distância em dois pontos também distantes entre si.

Os sensores foram sujeitos às variações de temperatura: 25°C, 50°C, 75°C, 100°C, e deformação: 100µε, 400µε, 700µε, 1000µε, totalizando dezesseis combinações entre esses valores, em cada experimento. Em cada uma dessas combinações a simulação foi efetuada e os dados exportados para tratamento posterior no MATLAB.

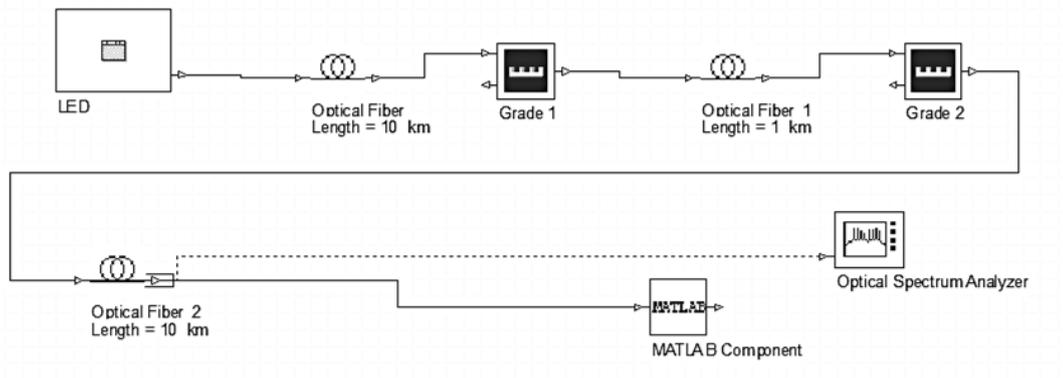


Figura 1. Setup montado no OptiSystem.

Os dados exportados continham muito ruído, que dificultava a implementação de um algoritmo para identificação dos comprimentos de onda ressonantes. Por isso, os dados foram tratados pela técnica utilizada em Zhaoxia e Haili (2011).

### 3. Resultados e Discussão

Multiplexação por comprimento de onda é uma técnica muito utilizada em comunicações ópticas, pois permite a transmissão de diversas informações em um único canal de comunicação. Essa transmissão simultânea é obtida dividindo o espectro de transmissão da fibra em subcanais, ou seja, são selecionados intervalos fixos e bem espaçados de comprimento de onda para transmitirem informações de maneira independente.

Aplicar esse conceito à sensores ópticos construídos com grades de período longo é simples, pois, como discutido anteriormente, basta variar o período de modulação da grade para deslocar sua banda de atenuação.

Entretando, para garantir a não interferência entre as grades associadas é necessário estudar a variação destas ao estímulo medido. É ideal que esse estudo seja feito através de simulações, para se definir os melhores períodos de modulação para cada grade antes de construí-las na prática, a fim de poupar material.

Para realizar esse estudo plotamos a variação dos estímulos externos em uma grade enquanto a outra é mantida a temperatura ou deformação constante. Os resultados são mostrados nas Figuras 2 e 3, observa-se que ao variar o ambiente em uma das grades, há sempre um vale de atenuação fixo, centrado em um comprimento de onda ressonante, enquanto o outro vale varia linearmente. De fato, espera-se que o vale referente à grade que foi submetida a um meio com temperatura ou deformação fixa, se mantenha fixo. Já a variação linear pode ser mostrada a partir da derivação da condição de acoplamento, James (2003):

$$\frac{d\lambda}{dT} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left( \frac{dn_{eff}}{dT} - \frac{dn_{cl}}{dT} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{dL}{dT} \quad (2)$$

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \frac{d\lambda}{d(\delta n_{eff})} \left( \frac{dn_{eff}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{cl}}{d\varepsilon} \right) + \Lambda \frac{d\lambda}{d\Lambda} \quad (3)$$

Dos valores máximos e mínimos que os comprimentos de onda ressonante admitiram nos experiemntos concluímos que a grade 2 ocupa o intervalo de 1550 nm a 1600 nm no espectro de transmissão do sistema, enquanto a grade 1 ocupa o intervalo de 1500 nm a 1550 nm. Logo, não há interferência na medição de temperatura e deformação obtidas pelas duas LPGs construídas quando elas trabalham na faixa de 25°C a 100°C para temperatura e 100 με a 1000 με de deformação. Portanto, os períodos de modulação escolhidos para as grades foram satisfatórios para o sensoriamento simultâneo em dois pontos, nessas consições.

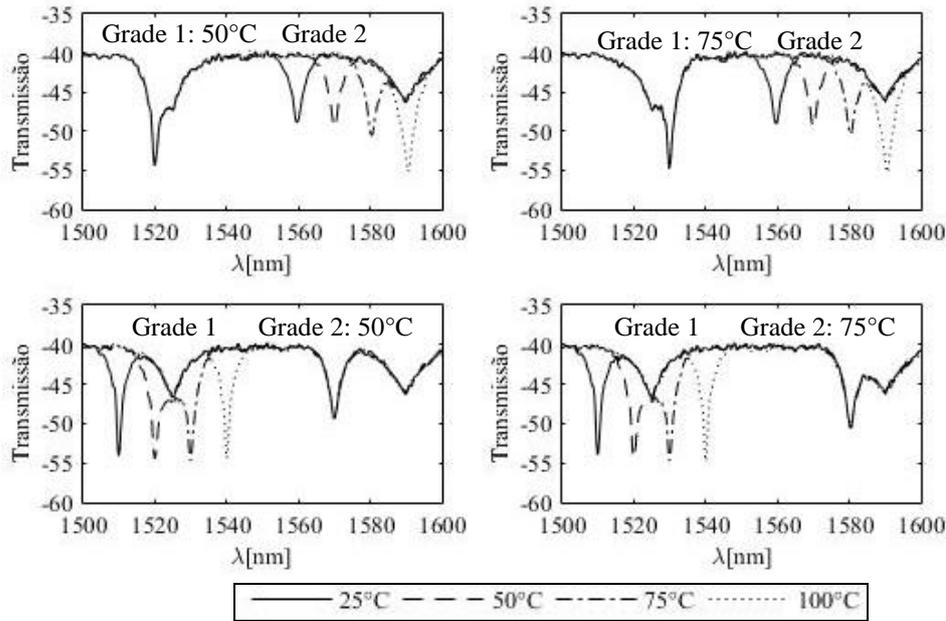


Figura 2. Resposta do sistema à variação de temperatura.

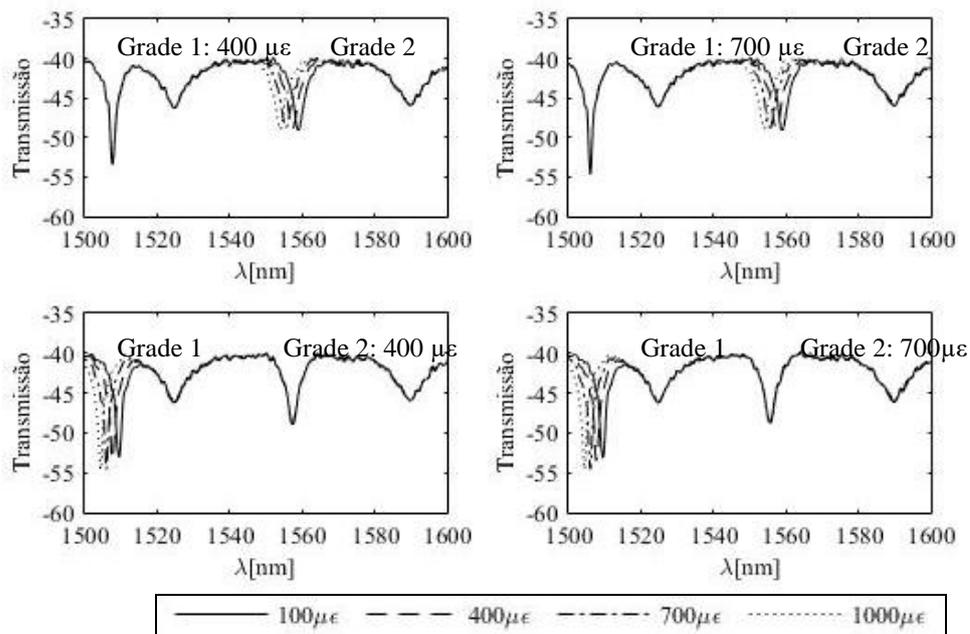


Figura 3. Resposta do sistema à variação de deformação.

Extraindo os comprimentos de onda ressonantes, pudemos relacionar a sua variação à variação do ambiente, obtendo as sensibilidades:  $0.4015 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e  $-5.6065 \text{ pm}/\mu\epsilon$  na grade 1. Enquanto na grade 2:  $0.4143 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e  $-5.4914 \text{ pm}/\mu\epsilon$ .

Vale ressaltar que há também a possibilidade de, ao invés de medir temperatura em dois pontos ou deformação em dois pontos, medirmos em cada ponto um desses parâmetros. Abaixo ilustramos essa possibilidade. É importante notar que essas combinações são possíveis, pois tanto para deformação quanto para temperatura a largura de banda das duas grades é a mesma, mantendo as mesmas características de multiplexação.

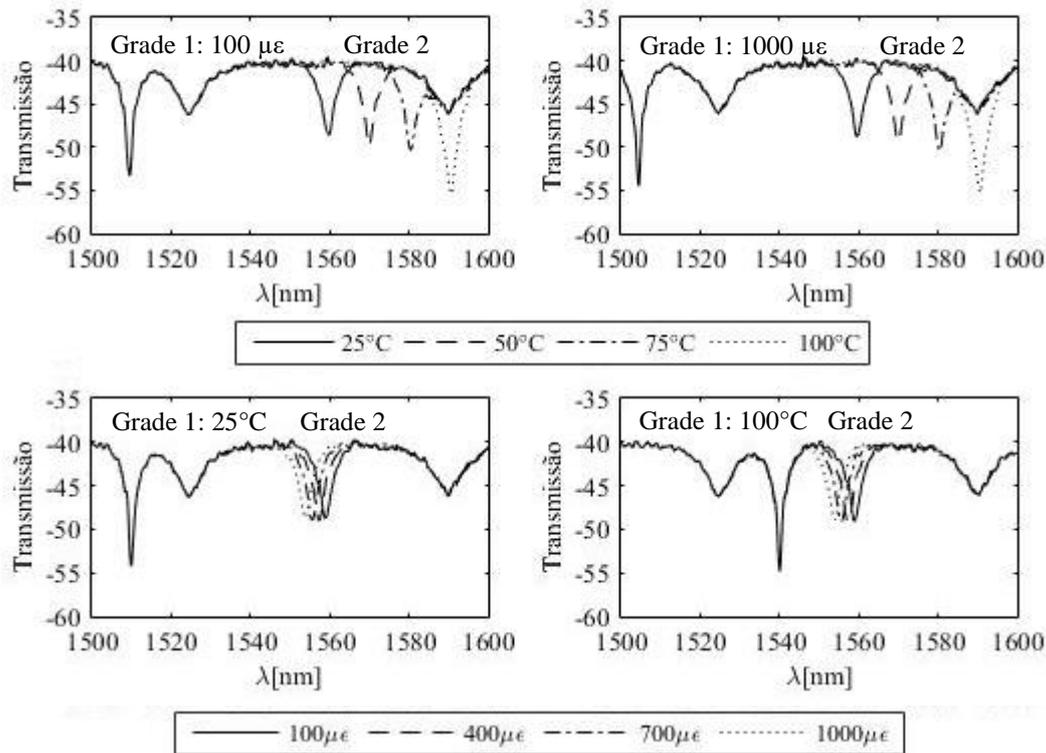


Figura 4. Resposta do sistema à variação de temperatura e deformação.

#### 4. Conclusões

Mostramos que as grades apresentam comportamento independente, permitindo uma análise por superposição, em que cada grade pode ser tratada como um único sensor.

Logo, concluímos que a diferença entre período de modulação das grades associadas é suficiente para separar a informação dos dois sensores. Extrapolando esse resultado, podemos concatenar  $n$  grades e dividir o espectro de transmissão em  $n$  intervalos, bastando apenas realizar o estudo similar ao aqui apresentado para definir os melhores parâmetros para as LPGs envolvidas.

Com isso podemos concluir que as redes de período longo apresentam, de fato, uma grande facilidade de multiplexação por divisão de frequência, permitindo assim o sensoriamento em diferentes pontos e a grandes distâncias.

#### Agradecimentos

Agradecemos ao apoio financeiro da Universidade Federal de Juiz de Fora, FAPEMIG e CNPq.

## Referências Bibliográficas

- S. Prashar, D. Engles and P. Singh, "**Effect of material and waveguide parameters on strain sensitivity of uniform long-period fiber grating**," Signal Processing and Communication (ICSC), 2015 International Conference on, Noida, 2015, pp. 448-451.
- M. Y. Fu et al., "**Optical glucose sensor based on a fiber Bragg grating concatenated with a long period grating**," Optical Fibre Technology, 2014 OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on, Melbourne, VIC, 2014, pp. 472-473.
- J. C. Mau, M. Y. Fu, G. R. Lin and W. F. Liu, "**Fiber pH sensor based on long period gratings**," Sensors, 2012 IEEE, Taipei, 2012, pp. 1-3.
- N. Zhang, X. Dong, P. Shum, D. Hu, H. Su, W. Lew, and L. Wei, "**Highly Sensitive Magnetic Field Sensor Using Long-Period Fiber Grating**," in 2015 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, (Optical Society of America, 2015), paper 27F2\_3.
- B. Lee, **Review of the present status of optical fiber sensors**, *Optical Fiber Technology*, Volume 9, Issue 2, 2003, Pages 57-79.
- T. Erdogan, **Fiber grating spectra**. *Journal of lightwave technology*, v. 15, n. 8, p. 1277-1294, 1997.
- R. Ranjan, **Comparative Study of Long-Period Gratings Written in Standard and Fluorine-Doped Fibers by Electric Arc Discharge**. *IEEE Sensors Journal*, v. 16, n. 11, p. 4265-4273, 2016.
- G. Rego, "**Arc-Induced Long Period Fiber Gratings**," *Journal of Sensors*, vol. 2016, Article ID 3598634, 14 pages, 2016. doi:10.1155/2016/3598634
- G. Rego. **Arc-induced long-period gratings**. *Fiber and Integrated Optics*, v. 24, n. 3-4, p. 245-259, 2005.
- W. Zhaoxia, Y. Haili, **Fiber Bragg grating peak wavelength detection technique based on wavelet analysis**. In: *Internet Computing & Information Services (ICICIS)*, 2011 International Conference on. IEEE, 2011. p. 462-464.
- S. W. James, R. P. Tatam, **Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application**. *Measurement science and technology*, v. 14, n. 5, p. R49, 2003.
- B. Sévigny, **Characterization of the large index modification caused by electrical discharge in optical fibers**. In: *Lasers and Electro-Optics. Conference on Quantum Electronics and Laser Science*. 2009. p. 2-4.
- J. Estudillo-Ayala, **Long period fiber grating produced by arc discharges**. *Fiber Optic Sensors*, v. 1, p. 295-316, 2012.