

# PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES ÓPTICOS BASEADOS EM GRADES EM FIBRAS ÓPTICAS E SUA IMPORTÂNCIA NAS DIFERENTES ÁREAS TECNOLÓGICAS

*Alexander Cascardo Carneiro<sup>1</sup>*

*Andrés Pablo López Barbero<sup>2</sup>*

**Resumo:** Este artigo apresenta o modelo teórico e o princípio de funcionamento dos sensores ópticos baseados em grades inscritas em fibras ópticas. Além disso, este trabalho inclui as vantagens e algumas configurações desse tipo de sensor que permitiram a inovação tecnológica em sistemas de monitoramento de diferentes áreas. O artigo contém ainda uma metodologia para criação de sensores baseados em grades em fibras ópticas para monitoramento de parâmetros de um sistema, com intuito de fomentar a investigação científica nos campos em que sua utilização ainda não foi explorada.

**Palavras-chave:** Sensores Ópticos, Grades em Fibras Ópticas, Investigação Científica.

**Abstract:** This paper presents the theoretical model and operating principle of optical sensors based on gratings inscribed in optical fibers. Moreover, this work includes the advantages and some configurations of this type of sensor that allowed technological innovation in monitoring systems of different areas. This paper also contains a methodology for creating optical fiber grating sensors for parameters monitoring of a system, in order to foster scientific research in the fields in which their use has not been explored.

**Keywords:** Optical Sensors, Optical Fiber Grating, Scientific Research.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de engenharia de Telecomunicações. E-mail : xela\_888@hotmail.com

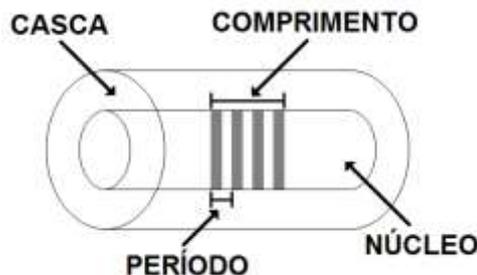
<sup>2</sup> Universidade Federal Fluminense (UFF), Departamento de engenharia de Telecomunicações. E-mail : lopez.barbero@gmail.com

## 1. INTRODUÇÃO

Muitos desconhecem a existência dos sensores ópticos baseados em grades inscritas em fibras ópticas apesar de sua grande importância na inovação dos sistemas de monitoramento em diversas áreas tecnológicas. Monitoramento das condições de uma ponte [Ferreira *et al.*, 2006], de parâmetros de navios [Friebele, 1998] e de parâmetros físico-químicos [Falate, 2006] são alguns exemplos de aplicações desse tipo de sensor. As grades em fibras ópticas podem ser descritas como *enabling technologies*, pois permitem o desenvolvimento rápido e eficiente de novos sensores cujos benefícios superam as limitações dos sensores elétricos tradicionais. A partir de sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas é possível desenvolver sistemas inteligentes, os quais funcionam de forma dinâmica, tomando decisões baseadas nos valores do parâmetro monitorado. Exemplos de sistemas inteligentes são as *smart structures*, reduzindo vibrações indesejadas que podem comprometer a integridade e segurança de uma estrutura [Braghin *et al.*, 2013], e as *smart grids*, avaliando o estado da linha aérea da rede de transmissão de energia elétrica [Huang *et al.*, 2010].

A gravação de grades em fibras ópticas só foi possível após a descoberta do efeito fotorefrativo [Ashkin *et al.*, 1966], que consiste na mudança do índice de refração de um material induzida por um feixe de luz incidente com variação espacial de intensidade. Baseado nisso, uma fibra óptica foi exposta a um padrão de interferência de luz ultravioleta emitida por um laser de argônio [Hill *et al.*, 1978]. A luz ultravioleta varia o índice de refração do núcleo da fibra óptica nas regiões em que a intensidade de luz é maior. Como a intensidade de luz ultravioleta é espacialmente periódica, é gerada uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica, a qual é denominada grade ou rede em fibras ópticas. A figura 1 apresenta esquematicamente uma grade em fibras ópticas. Na figura 1, a cor cinza representa a região em que houve variação do índice de

refração do núcleo, ou seja, onde a grade foi gravada.



**Figura 1** - Representação esquemática de uma grade em fibras ópticas.

Na figura 1, estão indicados o período e o comprimento da grade, além de o núcleo e a casca da fibra óptica. A casca é a região ao redor do núcleo. A característica da fibra óptica que garante a variação permanente do índice de refração do núcleo induzida pela exposição à radiação ultravioleta é conhecida como fotossensibilidade. O artigo de Othonos [1997] apresenta os modelos propostos para explicar a fotossensibilidade das fibras ópticas e sua relação com os diferentes tipos de fibras. A intensidade de variação do índice de refração do núcleo da fibra óptica depende de fatores relacionados às características da luz ultravioleta emitida pelo laser utilizado no processo de fabricação da grade, como comprimento de onda, intensidade e quantidade total de luz irradiada sobre a fibra óptica [Hill e Meltz, 1997]. No processo de fabricação, o valor típico para a variação do índice de refração do núcleo da fibra óptica é da ordem de  $10^{-5}$  a  $10^{-3}$  [Hill e Meltz, 1997]. Técnicas de tratamento da fibra óptica tanto anterior a sua exposição à luz ultravioleta, como co-dopagem por boro e hidrogenação, quanto posterior à fabricação da grade, como varredura a chama, podem proporcionar uma variação do índice de refração do núcleo da ordem de  $10^{-2}$ , garantindo uma maior eficiência no funcionamento da grade [Bennion *et al.*, 1996]. A modelagem teórica e o princípio de funcionamento das grades em fibras ópticas são descritos pela Teoria de Modos Acoplados [Taylor e Yariv, 1974], explicada no item 2 deste artigo.

A evolução das técnicas de gravação de grades e de melhoria de fotossensibilidade proporcionaram o surgimento de dois tipos principais de grade: as grades de Bragg em fibras ópticas (FBG – *Fiber Bragg Grating*) [Meltz *et al.*, 1989] e as grades de período longo em fibras ópticas (LPG – *Long Period Fiber Grating*) [Vengsarkar *et al.*, 1996]. Os métodos mais comuns utilizados para fabricação de grades em fibras ópticas podem ser do tipo interferométrico, também conhecido como método holográfico, no qual a grade é inscrita a partir de um padrão de interferência produzido por dois feixes de luz coerentes, ou do tipo não-interferométrico, expondo a fibra óptica à luz ultravioleta através de uma máscara de fase ou em uma exposição ponto a ponto [Bennion *et al.*, 1996]. Tanto a FBG quanto a LPG são sensíveis a parâmetros externos, permitindo a criação de sensores ópticos que utilizem uma ou ambas como elemento sensor. Os parâmetros das FBGs e das LPGs são iguais aos indicados na figura 1. Entretanto, os valores desses parâmetros são diferentes, visto que o princípio de funcionamento da FBG difere do da LPG. Existem ainda outros tipos de grade em fibras ópticas, além das FBGs e LPGs, como as grades de Bragg apodizadas; as grades de Bragg aperiódicas, também conhecidas como grades de Bragg chirpadas (CFBG – *Chirped Fiber Bragg Grating*); grades com deslocamento de fase; grades de Bragg de super-estruturas (SFBG – *Superstructure Fiber Bragg Grating*) e grades de Bragg inclinadas (TFBG – *Tilted Fiber Bragg Grating*) [Erdogan, 1997].

As vantagens dos sensores ópticos baseados em FBG e LPG estão associadas às propriedades das fibras ópticas, dos componentes ópticos e das grades. A baixa atenuação das fibras ópticas permite que a grade seja instalada em ambientes localizados a quilômetros de distância da central de monitoramento [Farrel *et al.*, 2005]. Como as fibras ópticas são imunes a interferências eletromagnéticas, as grades podem ser utilizadas em ambientes eletricamente

ruidosos, por exemplo, em linhas de alta tensão ou na detecção acústica de descargas parciais em equipamentos de alta tensão [Comanici *et al.*, 2012]. Além disso, os componentes ópticos ativos, como laser e fotodetector, possuem baixo consumo de energia elétrica. Os demais componentes do sensor óptico, como acopladores, circuladores e a própria grade são eletricamente passivos. Dessa forma, o baixo custo e consumo elétrico desses componentes tornam os sensores ópticos baseados em FBG e/ou LPG soluções viáveis quando implantados em sistemas de monitoramento distribuídos, nos quais vários dispositivos são monitorados simultaneamente. As pequenas dimensões e peso dos componentes facilitam ainda a fixação dos sensores ópticos à estrutura, sem a degradação do dispositivo monitorado. Essa vantagem fica clara no artigo apresentado por Carmo *et al.* [2012], no qual um sistema baseado em grade de Bragg foi instalado em uma vestimenta inteligente, tendo a função de monitorar as frequências cardíacas e respiratórias do usuário. As grades são também resistentes à corrosão e podem operar em baixas e altas temperaturas, permitindo a sua instalação em ambientes considerados hostis, como em poços de petróleo [Méndez, 2007].

Quando comparado aos sensores convencionais, os sensores ópticos baseados em FBG e LPG possuem maior sensibilidade e precisão na medição de um único parâmetro, de diversos parâmetros ou de um mesmo parâmetro distribuído em vários pontos [James e Tatam, 2003]. As FBGs e LPGs são sensíveis a parâmetros como: temperatura, deformação mecânica, pressão, ultrassom, aceleração, índice de refração, força e campos magnéticos de alta intensidade [Grattan e Augousti, 1996]. A sensibilidade à variação do índice de refração do meio externo, por exemplo, permite a criação de sistemas de monitoramento de processos industriais [Allsop *et al.*, 2001], assegurando a qualidade do produto. Para elevar a sensibilidade da grade ao parâmetro que ela está sujeita podem ser usados revestimentos especiais [Tang

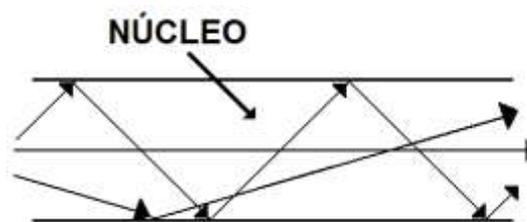
e Wang, 2008]. Revestimentos especiais são usados ainda para tornar a grade sensível a outros parâmetros, como umidade [Yeo *et al.*, 2005]. Nesse caso, a grade é revestida com um polímero que sofre expansão ou contração em função da variação da umidade do ambiente [Yeo *et al.*, 2005]. Como a grade é sensível à deformação mecânica, é possível monitorar indiretamente a variação da umidade do ambiente ao revestir a grade com esse material.

Em relação aos componentes, os sensores ópticos baseado em FBG e LPG possuem duas partes: a sensora e a interrogadora. Os principais elementos da parte sensora são a grade e uma fonte de banda larga. A fonte de banda larga tem a função de transmitir luz através da grade. Dessa forma, as características de radiação da luz são modificadas pelas propriedades físicas da grade, como período e comprimento, e da fibra óptica, como o raio do núcleo e os índices de refração do núcleo e da casca. Um parâmetro externo modifica as propriedades físicas da grade e da fibra óptica, alterando, por conseguinte, as características de radiação da luz. A luz que passa através da grade é recebida pela parte interrogadora. O principal elemento da parte interrogadora é o sistema de interrogação, o qual mede o valor do parâmetro externo a partir das características de radiação da luz recebida. Visto que existe uma relação entre o valor do parâmetro externo e as propriedades físicas da grade e da fibra óptica, e entre essas propriedades e as características de radiação da luz, é possível monitorar a variação do parâmetro externo a partir das características de radiação da luz que é recebida pela parte interrogadora.

O objetivo do presente trabalho é apresentar o princípio de funcionamento e as vantagens dos sensores ópticos baseados em FBG e LPG em suas principais aplicações, com o intuito de fomentar a criação de novos sensores nas áreas em que sua utilização ainda não foram explorada. No próximo item são explicados os aspectos teóricos das grades em fibras ópticas.

## 2. ASPECTOS TEÓRICOS

Nas fibras ópticas, a luz é guiada no interior do núcleo, podendo seguir diferentes caminhos. A figura 2 ilustra três trajetórias na qual a luz pode ser guiada. Essas trajetórias são também conhecidas como modos de propagação da luz e são definidas pelos índices de refração do núcleo e da casca, pelo raio do núcleo e pelo comprimento de onda da luz [Agrawal, 1997]. Portanto, dois sinais com valores diferentes de comprimento de onda podem ser guiados por dois caminhos diferentes, sendo que esses caminhos, ou modos, são definidos pela geometria da fibra óptica.



**Figura 2** - Representação de três modos guiados no núcleo da fibra óptica.

Os modos podem ser classificados como guiados ou não-guiados e como propagantes ou contra-propagantes. A figura 2 ilustra três modos guiados propagantes. Enquanto há um conjunto finito de modos guiados, o número de modos não-guiados é incontável. Abaixo de um determinado valor de comprimento de onda, conhecido como comprimento de onda de corte, a luz deixa de ser guiada, passando a ser irradiada para fora do núcleo. Esses modos são conhecidos como modos não-guiados. Além disso, os modos nos quais a luz se propaga no sentido contrário ao de propagação são conhecidos como modos contra-propagantes. Como a figura 2 está considerando o sentido de propagação para direita, serão contra-propagantes os modos que estiverem se propagando para esquerda.

Para cada modo de propagação existe uma constante de propagação ( $\beta$ ) associada. Na fibra óptica monomodo, onde existe apenas um modo guiado propagante da luz, a constante de propagação é expressa pela equação 1.

Nela,  $\lambda$  representa o comprimento de onda da luz e  $n_{\text{eff}}$  é o índice de refração efetivo do modo guiado, que é função do raio do núcleo e dos índices de refração do núcleo e da casca.

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}} \quad (1)$$

A Teoria de Modos Acoplados prevê o acoplamento entre diferentes modos de propagação, quando a luz passa por uma região que possui uma perturbação periódica no índice de refração. No caso das grades em fibras ópticas, a luz transmitida segundo um modo com constante de propagação  $\beta_1$  pode ser acoplada a um modo de constante de propagação  $\beta_2$  ao passar pela grade. Isso significa que praticamente toda a luz transmitida pela trajetória associada à  $\beta_1$  passará a seguir a trajetória associada à  $\beta_2$  ao passar pela grade. A condição para que ocorra o acoplamento entre os modos  $\beta_1$  e  $\beta_2$  é mostrada na equação 2 [Taylor e Yariv, 1974]. Nela,  $\Lambda$  representa o período da grade.

$$\beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

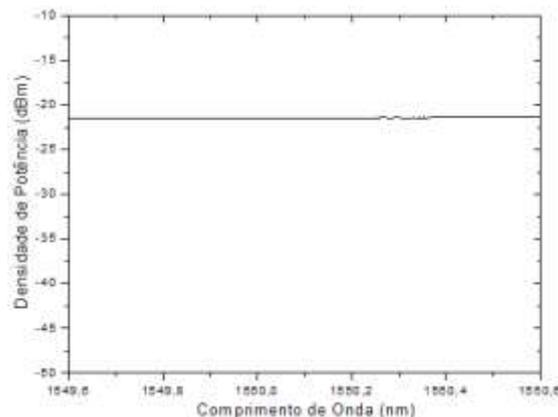
Em uma fibra óptica monomodo, embora só exista um único caminho, ou modo, a luz pode ser guiada tanto para direita, sentido propagante, quanto para esquerda, sentido contra-propagante, seguindo este mesmo caminho. Considerando  $\beta$  a constante de propagação do modo guiado propagante e  $-\beta$  a constante de propagação do modo guiado contra-propagante, onde  $\beta$  é expresso pela equação 1, chega-se à equação 3, ao fazer  $\beta_1 = \beta$  e  $\beta_2 = -\beta$  na equação 2. A equação 3 expressa, portanto, que uma luz, ao passar através de uma grade de período  $\Lambda$ , tem o modo guiado propagante acoplado ao modo guiado contra-propagante, no comprimento de onda  $\lambda_r$ , o qual é conhecido como comprimento de onda de ressonância.

$$\lambda_r = 2n_{\text{eff}} \Lambda \quad (3)$$

A equação 3 é conhecida como condição de Bragg e expressa o princípio

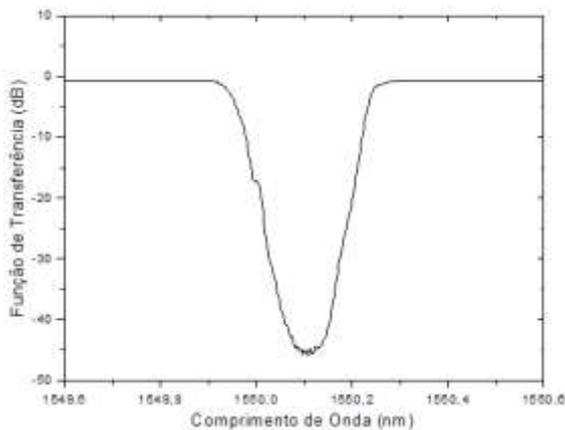
de funcionamento da FBG. Geralmente, o comprimento de onda de ressonância é a característica de radiação da luz monitorada pelo sistema de interrogação, pois ele é função do índice de refração efetivo do modo guiado e do período da grade, os quais variam com o parâmetro externo. Logo, o sistema de interrogação pode monitorar o valor do parâmetro que a FBG está sendo sujeita a partir do comprimento de onda de ressonância da luz recebida.

As características de radiação da luz são apresentadas na forma de um espectro eletromagnético, que contém o valor da densidade de potência da luz em cada comprimento de onda. A figura 3 mostra o espectro eletromagnético de um sinal de banda larga na entrada de uma FBG.

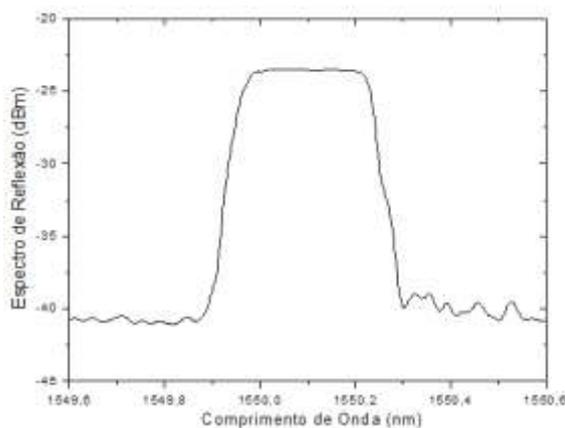


**Figura 3** - Espectro eletromagnético de um sinal de banda larga na entrada de uma FBG.

A figura 4 mostra a função de transferência de uma FBG, que representa a diferença entre o sinal de banda larga na saída e na entrada da FBG. O comprimento de onda de ressonância da FBG corresponde ao comprimento de onda central do espectro da figura 4, que mede 1550,1 nm. Como na FBG o modo propagante é acoplado ao modo contra-propagante, a FBG possui um espectro de reflexão do sinal de banda larga de entrada, mostrado na figura 5.



**Figura 4** - Função de transferência de uma FBG.

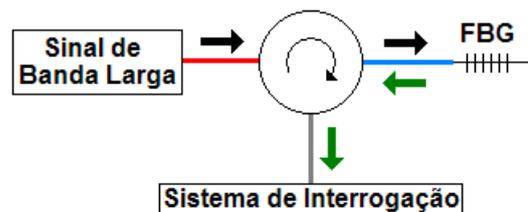


**Figura 5** - Espectro de reflexão de uma FBG.

Logo, na FBG, parte do sinal de banda larga (figura 3) é transmitido através da grade (figura 4) e parte do sinal, na região próxima ao comprimento de onda de ressonância, é refletido (figura 5), pois nessa região o sinal de entrada é acoplado ao modo contra-propagante.

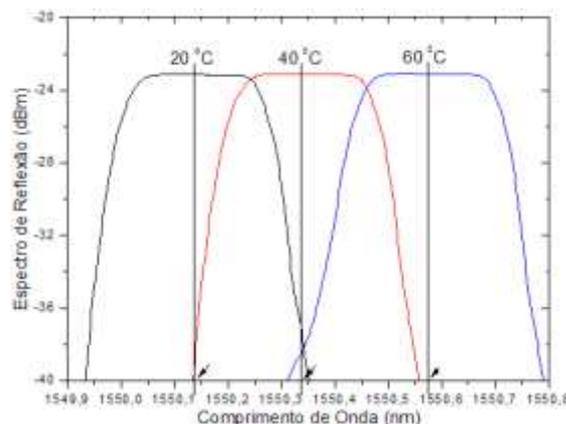
Nos sensores ópticos baseados em FBG, normalmente, o sistema de interrogação monitora o sinal refletido pela FBG. Para isso, pode ser usado um circulador óptico, como mostra a figura 6. No circulador óptico, o sinal de entrada da porta de cor vermelha, que corresponde ao sinal de banda larga, é transmitido para a porta de cor azul. Já o sinal de entrada da porta de cor azul, que corresponde ao espectro de reflexão da FBG, é transmitido para a porta de cor cinza. Com isso, o sinal refletido pela FBG é transmitido para o sistema de interrogação, que mede o valor do parâmetro externo a partir do comprimento de onda

de ressonância do espectro de reflexão da FBG.



**Figura 6** - Disposição dos elementos em relação ao circulador óptico.

A figura 7 mostra o deslocamento do espectro de reflexão de uma FBG sujeita à variação de temperatura. A resposta térmica da FBG é função da variação do período da grade, devido à dilatação da fibra óptica, e da variação do índice de refração efetivo, que é dependente da temperatura [Kersey *et al.*, 1997]. Dessa forma, de acordo com a equação 3, o espectro de reflexão da FBG se desloca em função da variação da temperatura. A figura 7 mostra o espectro de reflexão da FBG sujeita a temperaturas de 20, 40 e 60 °C, as quais resultaram em comprimentos de onda de ressonância de 1550,139, 1550,340 e 1550,575 nm, respectivamente. Nesse caso, a FBG apresentou sensibilidade à temperatura de 10,9 pm/°C. Tipicamente, a variação do comprimento de onda de ressonância em relação à temperatura sobre a FBG mede 13 pm/°C [Krohn, 1992].

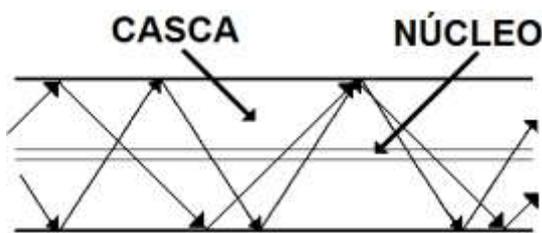


**Figura 7** - Espectro de reflexão da FBG em três temperaturas: 20, 40 e 60 °C.

Algumas aplicações também utilizam a FBG como sensor de deformação mecânica, monitorando a variação do espectro de reflexão da FBG em relação à deformação mecânica aplicada sobre ela. A resposta da FBG a esse parâmetro é

função da variação do período da grade, devido à expansão ou contração da fibra óptica provocada pela deformação, e da variação do índice de refração efetivo devido ao efeito opto-elástico [Kersey *et al.*, 1997]. Portanto, de acordo com a equação 3, o espectro de reflexão da FBG se desloca em função da deformação mecânica aplicada. Tipicamente, é observado um valor de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$  para a variação do comprimento de onda de ressonância devido à deformação aplicada sobre a FBG [Othonos, 1997].

A Teoria de Modos Acoplados pode ser estendida para os modos guiados na casca da fibra óptica [Vengsarkar *et al.*, 1996]. Na verdade, a luz não pode se propagar na casca, pois nessa região ela é atenuada rapidamente. Entretanto, análogo ao apresentado na figura 2, existem caminhos, ou modos, guiados na casca da fibra óptica. Esses caminhos são conhecidos como modos de casca e estão ilustrados na figura 8. O número de modos guiados na casca é finito e é definido através dos índices de refração da casca e do meio ao redor da casca, pelo raio da casca e pelo comprimento de onda da luz.



**Figura 8** - Representação de dois modos guiados na casca da fibra óptica.

Para cada modo de casca existe uma constante de propagação ( $\beta_c$ ) associada. A equação 4 apresenta a constante de propagação dos  $m$  modos de casca em uma fibra óptica. Nela,  $n_c$  representa o índice de refração efetivo de cada um dos  $m$  modos de casca, os quais são função do raio da casca e dos índices de refração da casca e do meio ao redor da casca.

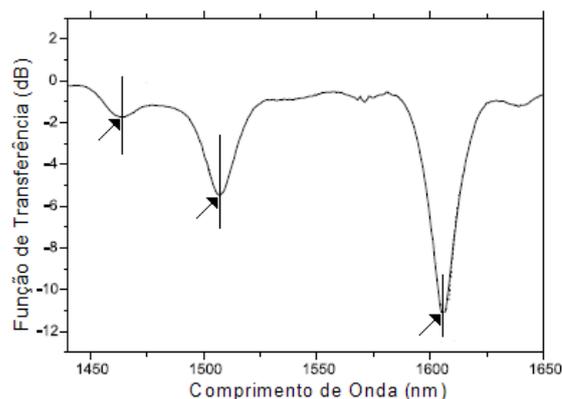
$$\beta_c^m = \frac{2\pi}{\lambda} n_c^m \quad (4)$$

Ao passar por uma grade, o modo guiado no núcleo pode ser acoplado a

algum modo guiado na casca, se a condição da equação 2 for satisfeita. Fazendo  $\beta_1 = \beta$  da equação 1 e  $\beta_2 = \beta_c$  da equação 4, na equação 2, chega-se à equação 5. Nela,  $\lambda_c$  representa cada um dos  $m$  comprimentos de onda de ressonância, que corresponde ao acoplamento do modo guiado no núcleo a cada um dos  $m$  modos guiados na casca. A equação 5 exprime o princípio de funcionamento de uma LPG.

$$\lambda_c^m = (n_{\text{eff}} - n_c^m) \Lambda \quad (5)$$

A figura 9 apresenta a função de transferência do espectro eletromagnético de uma LPG [Karpov *et al.*, 1998]. As setas indicam três comprimentos de onda de ressonância diferentes, que correspondem ao acoplamento do modo guiado propagante no núcleo a três modos de casca propagantes. Como a luz é atenuada rapidamente na casca, o espectro eletromagnético dessa LPG possui três vales na região próxima ao comprimento de onda de ressonância. Além disso, o índice de refração efetivo de cada modo de casca sofre uma variação diferente em função dos parâmetros externos a LPG. Portanto, o comprimento de onda de ressonância de cada modo de casca possui uma variação própria em relação ao parâmetro externo.



**Figura 9** - Função de transferência de uma LPG.

Geralmente, o sistema de interrogação monitora um dos comprimentos de onda de ressonância da LPG, que corresponde ao de maior sensibilidade ao parâmetro externo, isto é, o que sofre maior variação. Comparada a FBG, a LPG não possui espectro de reflexão, sendo sua

variação monitorada, portanto, através de seu espectro de transmissão, o qual corresponde ao sinal de banda larga em sua saída. Além disso, como o índice de refração efetivo do modo de casca depende do índice de refração ao redor da casca, a LPG pode ser usada como sensor de índice de refração.

No caso da LPG, o deslocamento típico do comprimento de onda de ressonância devido à variação da temperatura mede  $93 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ , quase uma ordem de magnitude maior ao de uma FBG convencional [Bhatia e Vengsarkar, 1996]. Entretanto, a elevada sensibilidade da LPG à temperatura é prejudicial na maioria das aplicações, as quais a utilizam como sensor de deformação ou de índice de refração [Bhatia *et al.*, 1997]. Por isso, alguns mecanismos foram propostos com o intuito de diminuir o efeito da temperatura sobre o comprimento de onda de ressonância da LPG [Judkins *et al.*, 1996]. Bhatia [1996] submeteu uma LPG, que possuía baixa sensibilidade à temperatura ( $-18 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ), à deformação mecânica. Na temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ , essa LPG apresentou sensibilidade à deformação mecânica em três comprimentos de onda de ressonância. A resposta à deformação medida foi de  $-2,144 \text{ pm}/\mu\epsilon$  no comprimento de onda de  $1141,5 \text{ nm}$ ,  $-2,347 \text{ pm}/\mu\epsilon$  no comprimento de onda de  $1253,1 \text{ nm}$  e  $-2,696 \text{ pm}/\mu\epsilon$  no comprimento de onda de  $1376,4 \text{ nm}$ .

Atualmente, novas técnicas de fabricação de LPG, por exemplo, através da exposição à radiação de um laser de  $\text{CO}_2$  [Rao *et al.*, 2003] ou em uma aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico [Rego *et al.*, 2001], em diferentes tipos de fibras, como em fibras mantenedoras de polarização (PMF – *Polarization Maintaining Fiber*) e em fibras de cristais fotônicos (PCF – *Photonic Crystal Fiber*), permitem a fabricação de grades em fibras ópticas com valor requerido de sensibilidade ao parâmetro a ser monitorado [Wang, 2010]. Wang *et al.* [2006] apresentaram uma LPG, fabricada em uma PCF utilizando um laser de  $\text{CO}_2$ , com elevada sensibilidade à deformação

mecânica de  $-7,6 \text{ pm}/\mu\epsilon$  e baixa sensibilidade à temperatura de  $3,91 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ .

O período da LPG é sempre maior do que o período da FBG, quando ambas tem o mesmo comprimento de onda de ressonância, pois a constante de propagação do modo de casca propagante é sempre maior do que a constante de propagação do modo guiado contra-propagante. Por isso, essas grades ficaram conhecidas como grades de período longo. Enquanto a FBG é fabricada tipicamente com período entre 1 e 200 nm, o período da LPG é da ordem de algumas centenas de micrometros.

### 3. APLICAÇÕES

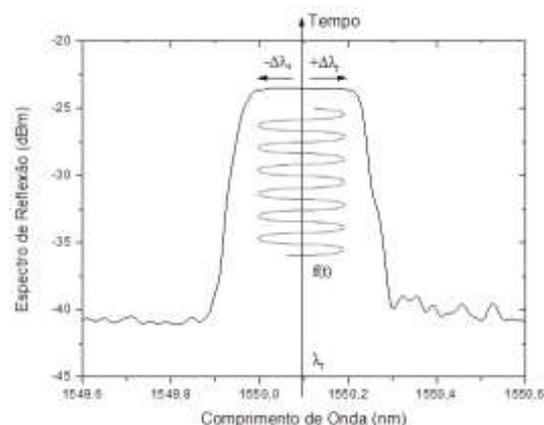
A constante expansão dos sistemas ópticos de telecomunicações, consequência da crescente demanda de dispositivos conectados à Internet, reduziu consideravelmente o custo dos componentes ópticos, tornando os sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas economicamente viáveis [Giles, 1997]. Dessa forma, cada vez mais os sensores ópticos baseados em FBG e LPG vêm sendo alvo de investigação científica, tornando-se alternativa aos sistemas de monitoramento em diversas áreas e em diferentes aplicações. Esses sensores podem ser usados em estruturas civis, como prédios, pontes e rodovias, em processos industriais, como alimentos, laminados e petroquímicos, em medicina, química e biologia, em *smart grids*, monitorando equipamentos da linha de transmissão de energia elétrica, em ambientes hostis, como em poços de petróleo, oleodutos e estações espaciais, e em *smart structures*, como em asas de aeronaves, cascos de navios e itens esportivos. Nessas aplicações, as grades em fibras ópticas oferecem soluções mais eficazes, reduzindo o peso e o custo dos sensores fixados ao material, além de realizarem a medição de parâmetros, como deformação, temperatura e índice de refração, em tempo real [Rao, 1999].

### 3.1 DEFORMAÇÕES MECÂNICAS

As FBGs e as LPGs são sensíveis a deformações mecânicas. Dessa forma, parâmetros como vibrações, ondas acústicas e ultrassom podem ser monitorados, pois geram uma deformação mecânica sobre a grade. Essa característica torna esse tipo de sensor viável em aplicações que envolvam a segurança e a integridade física de uma estrutura, a detecção acústica de descargas parciais emitidas por um equipamento de alta tensão, ou a criação de hidrofones baseados em grades em fibras ópticas.

O princípio de funcionamento das grades em fibras ópticas como sensores de vibrações está relacionada a sua natureza opto-elástica, que exprime a tendência do espectro óptico em variar conforme as vibrações, ondas acústicas ou ultrassom. Esses parâmetros modificam o período e o índice de refração efetivo, alterando o comprimento de onda de ressonância da grade, conforme as equações 3, para FBG, e 5, para LPG, deslocando, conseqüentemente, o espectro óptico da grade. A figura 10 mostra o deslocamento do espectro de reflexão de uma FBG quando esta é fixada a uma cerâmica piezoelétrica de titanato zirconato de chumbo (PZT). Um material piezoelétrico, como o PZT, sofre deformação mecânica ao receber uma tensão elétrica. Como a tensão elétrica aplicada sobre o PZT possui forma de onda senoidal, o PZT se expande (enquanto a tensão elétrica for positiva) e se contrai (enquanto a tensão elétrica for negativa) com valores de amplitude e frequência correspondentes ao sinal elétrico aplicado sobre ele. A FBG, fixada ao PZT, é esticada quando o PZT se expande, deslocando seu espectro para direita. Por outro lado, quando o PZT se contrai, a FBG também se contrai, deslocando o seu espectro para esquerda. Dessa forma, quando o PZT vibra segundo o sinal elétrico senoidal aplicado, se expandindo e se contraindo, o espectro da FBG sensora se desloca para esquerda ( $-\Delta\lambda_r$ ) e para direita ( $+\Delta\lambda_r$ ) conforme a deformação provocada pelo PZT ( $f(t)$ ) sobre a FBG. Ocorre um deslocamento semelhante quando a FBG é usada

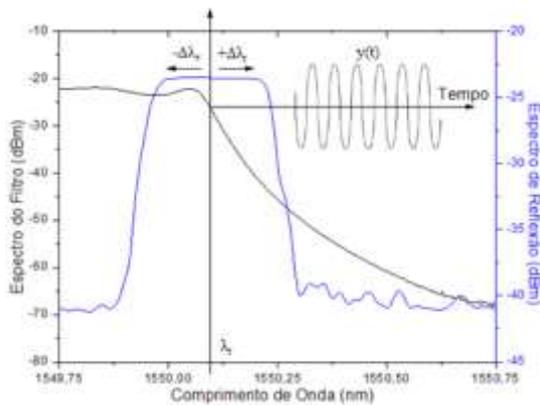
como receptor de ondas acústicas ou ultrassom.



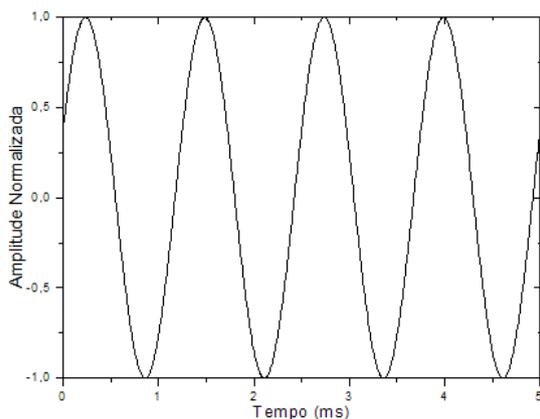
**Figura 10** - Variação do espectro de reflexão de uma FBG sujeita a vibrações.

No caso de deformação mecânica, o sistema de interrogação tem a função de converter o deslocamento do espectro de reflexão da FBG nas vibrações, ondas acústicas ou ultrassom, equivalentes. Geralmente, para esses parâmetros, são usados sistemas de interrogação por intensidade, pois possuem uma resposta eficaz, além de seu projeto ser bastante simples. Em um sistema de interrogação por intensidade, o deslocamento do espectro de reflexão da FBG é convertido em uma variação de amplitude cuja forma de onda corresponde às vibrações, ondas acústicas ou ultrassom, às quais a FBG está sujeita. A figura 11 apresenta o uso de um filtro óptico com espectro de borda linear para a interrogação. O deslocamento do espectro de reflexão da FBG para direita ( $+\Delta\lambda_r$ ) e para esquerda ( $-\Delta\lambda_r$ ) devido às vibrações, ondas acústicas ou ultrassom, é convertido em uma redução e em um aumento de amplitude, respectivamente, na saída do filtro, cuja forma de onda ( $y(t)$ ) representa o parâmetro ao qual a FBG está sujeita.

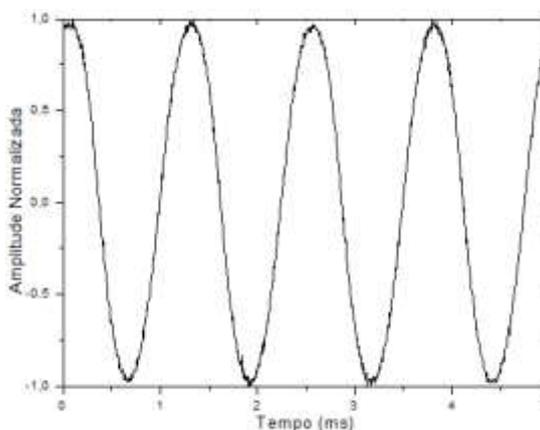
Considerando uma FBG fixada a um PZT vibrando com uma forma de onda senoidal de frequência 800 Hz, conforme a figura 12, o sinal resultante correspondente às vibrações ( $y(t)$ ) ao utilizar o sistema de interrogação por intensidade mostrado na figura 11, é expresso pela forma de onda apresentada na figura 13.



**Figura 11** - Sistema de interrogação por intensidade utilizando filtro óptico com espectro de borda linear.



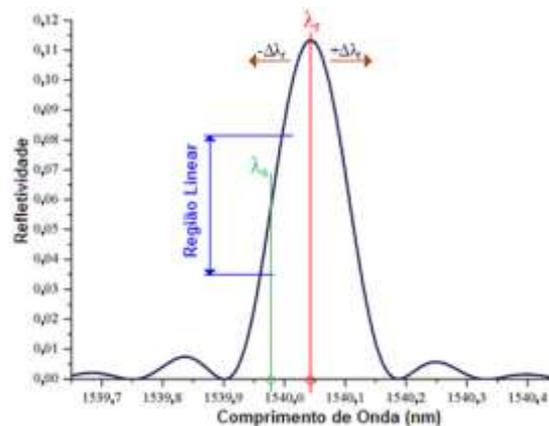
**Figura 12** - Forma de onda correspondente às vibrações do PZT sobre a FBG.



**Figura 13** - Forma de onda medida pelo sistema de interrogação por intensidade da figura 11.

Outro exemplo de sistema de interrogação por intensidade consiste na utilização de um laser sintonizado à região linear do espectro de reflexão da FBG sujeita a vibrações, ondas acústicas ou ultrassom, como mostra a figura 14 [Betz *et al.*, 2003]. Nesse caso, o deslocamento do espectro de reflexão da FBG para direita ( $+\Delta\lambda_r$ ) e para esquerda ( $-\Delta\lambda_r$ ),

provocado pelo parâmetro externo, produz uma variação na amplitude do laser, diminuindo e aumentando o seu valor, quando o laser é sintonizado à região linear do espectro de reflexão da FBG ( $\lambda_0$ ). O sinal resultante, nesse tipo de sistema de interrogação por intensidade, é equivalente ao obtido pelo sistema de interrogação apresentado na figura 11.



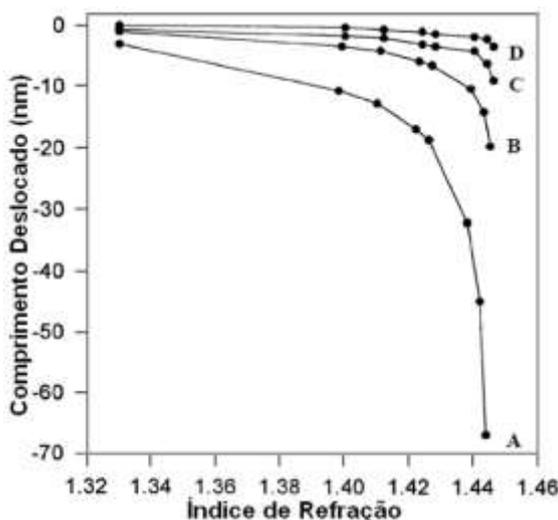
**Figura 14** - Sistema de interrogação por intensidade utilizando laser sintonizado à região linear do espectro de reflexão da FBG.

### 3.2 ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Geralmente, em sistemas de monitoramento de índice de refração, são usadas LPGs, devido ao fato de o modo de casca ( $n_c$ ), mostrado na equação 5, ser dependente do índice de refração do meio ao redor da LPG. A sensibilidade da LPG ao índice de refração vem sendo explorada na produção de sensores de índice de refração, para, por exemplo, monitorar a concentração da solução de uma substância durante o processo químico ou medir o nível de um fluido dentro de um recipiente [James e Tatam, 2003]. LPGs podem ser usadas em sensores que fazem o monitoramento em tempo real da concentração de materiais de solução aquosa, de materiais que estejam em locais inacessíveis ou em ambientes potencialmente explosivos, para o controle de qualidade de produção industrial. As concentrações de soluções como as de cloreto de sódio e cloreto de cálcio foram medidas com sensibilidade igual ou maior do que as medições com refratômetro de Abbe convencionais [Falciai *et al.*, 2001].

LPGs também vem sendo usadas na formação biossensores [Delisa *et al.*, 2000]. Através da imobilização de anticorpos sobre a superfície da fibra, é possível monitorar a alteração do índice de refração quando um antígeno se liga a um anticorpo. LPGs são usadas ainda na formação de sensores de fluxo, cuja função é monitorar a chegada de resina no interior de um sistema de moldagem de composto líquido [Kueh *et al.*, 2002].

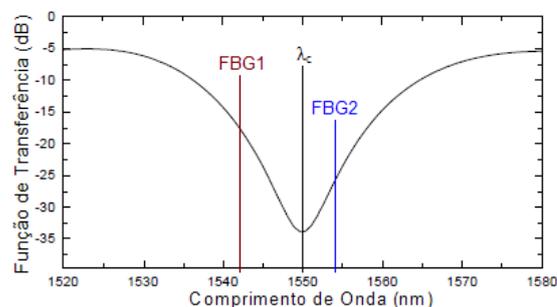
A figura 15 mostra o deslocamento de quatro comprimentos de onda de ressonância de uma LPG em função do índice de refração do meio externo, com relação ao índice de refração do meio igual a 1 [Bhatia, 1996]. Nesse experimento, a LPG foi imersa em óleos com diferentes índices de refração. Os comprimentos de onda de ressonância de cada modo de casca são: 1496,6 nm (A), 1329,3 nm (B), 1243,8 nm (C) e 1192,1 nm (D). Para essa LPG em particular, o deslocamento de cada comprimento de onda de ressonância é negativo e aumenta com a ordem do modo de casca. A sensibilidade da LPG ao índice de refração pode ser elevada escolhendo-se ainda um revestimento apropriado ou em grades inscritas em fibras de cristais fotônicos [Tsuda e Urabe, 2009].



**Figura 15** - Deslocamento do comprimento de onda de ressonância de quatro modos de casca de uma LPG em função da variação do índice de refração do meio externo.

Diversos sistemas de interrogação foram propostos para converter o des-

locamento do comprimento de onda de ressonância de um dos modos de casca da LPG no valor do parâmetro que está sendo monitorado. Com isso, é possível monitorar a variação do índice de refração do meio externo a partir do deslocamento do comprimento de onda de ressonância de um ou de vários modos de casca de uma LPG [Shu e Huang, 1999]. Um exemplo de sistema de interrogação de LPG consiste em sintonizar o espectro de reflexão de duas FBGs nas duas regiões lineares do espectro de transmissão (função de transferência) da LPG, conforme a figura 16 [Carvalho *et al.*, 2010].



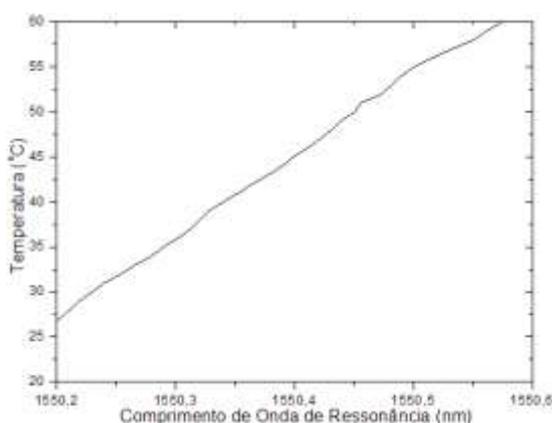
**Figura 16** - Sistema de interrogação de LPG utilizando duas FBGs sintonizadas às regiões lineares da LPG.

A configuração apresentada na figura 16 permite que o deslocamento do espectro de transmissão da LPG e, consequentemente, a variação do comprimento de onda de ressonância ( $\lambda_c$ ) seja monitorada através da relação entre a diferença e a soma da potência das duas FBGs (V), onde  $V = (V_1 - V_2)/(V_1 + V_2)$ , e  $V_1$  e  $V_2$  são as amplitudes dos sinais correspondentes à FBG1 e à FBG2, respectivamente. Quando a LPG não sofre nenhum deslocamento,  $V_1$  é igual a  $V_2$ , tornando  $V = 0$ . No caso de o espectro de transmissão da LPG deslocar para direita, o valor de  $V_2$  diminui e o valor de  $V_1$  aumenta, tornando V um número positivo. Por outro lado, quando o espectro de transmissão da LPG se desloca para esquerda, o valor de  $V_2$  aumenta e o valor de  $V_1$  diminui, tornando o valor de V negativo. Assim, o deslocamento do espectro de transmissão (ou do comprimento de onda de ressonância) da LPG é monitorado através do valor de V. Com isso, o valor do parâmetro externo, como

índice de refração, pode ser medido a partir do valor de  $V$ .

#### 4. METOLOGIA PARA A CRIAÇÃO DE UM SENSOR

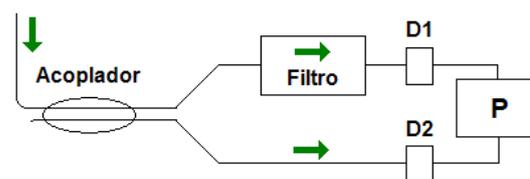
O primeiro passo para a criação de um sensor consiste na verificação do deslocamento do comprimento de onda de ressonância da grade em função da variação do parâmetro a ser monitorado. Para isso, são necessários um medidor do parâmetro externo e um analisador de espectro óptico (OSA – *Optical Spectrum Analyser*), o qual mede o comprimento de onda de ressonância da grade. A figura 17 mostra a variação da temperatura, medida por um medidor de temperatura, em função da variação do comprimento de onda de ressonância de uma FBG, medida por um OSA. Considerando  $T(\lambda_r)$  a função que contém o valor da temperatura em função do comprimento de onda de ressonância  $\lambda_r$  da FBG, dado na figura 17, o valor da temperatura pode ser obtido a partir do valor do comprimento de onda de ressonância da FBG, o qual é medido através do OSA, ao resolver a função  $T(\lambda_r)$ . A função  $T(\lambda_r)$  pode ser obtida e resolvida através de programas computacionais para cálculos matemáticos, como MatLab e Mathematica.



**Figura 17** - Variação da temperatura em função do comprimento de onda de ressonância da FBG.

Além disso, é possível substituir o OSA por um sistema de interrogação, após obter-se a função que representa a variação do parâmetro externo em função da variação do comprimento de onda de ressonância da grade, no caso,  $T(\lambda_r)$ . Na figura 18, o sistema de interrogação rece-

be o sinal refletido pela FBG, sujeita a variação da temperatura, e calcula o valor do parâmetro  $P$ . O espectro de reflexão da FBG é transmitido para o sistema de interrogação conforme mostrado na figura 6. O espectro de reflexão da FBG é dividido em duas parcelas pelo acoplador. Uma das parcelas passa por um filtro óptico de borda linear antes de chegar ao fotodetector (D1), enquanto a outra parcela é transmitida diretamente para o fotodetector (D2). Considerando  $P_1$  a potência elétrica na saída de D1 e  $P_2$  a potência elétrica na saída de D2,  $P = P_1 / P_2$ . O valor de  $P$  pode ser calculado ao conectar-se as saídas de D1 e D2 a um osciloscópio. O valor de  $P$  também pode ser medido ligando-se as saídas D1 e D2 a entradas analógicas de um conversor analógico-digital. A saída digital pode ser ligada a um computador e o valor de  $P$  calculado com um programa de cálculo matemático. Ao medir o valor de  $P$  variando-se o comprimento de onda de ressonância da FBG, é obtida a função  $\lambda_r(P)$ , a qual exprime o valor de  $\lambda_r$  em função do valor de  $P$ . Dessa forma, o valor do comprimento de onda de ressonância é obtido a partir de  $P$ , dado na configuração da figura 18. Em seguida, o valor da temperatura pode ser calculado com a função  $T(\lambda_r)$  através do valor do comprimento de onda de ressonância  $\lambda_r$  obtido.



**Figura 18** - Sistema de interrogação de FBG utilizando filtro óptico.

A utilização de um conversor analógico-digital permite a criação de sistemas de monitoramento dinâmicos realizados em ambiente computacional. Programas de instrumentação gráfica, como LabVIEW, podem ser usados para controlar dispositivos a partir do valor de  $P$  recebido. O valor da corrente elétrica sobre um PZT, por exemplo, pode ser alterada a partir de uma equação que seja função do valor de  $P$ . Com isso, a deformação mecânica provocada pelo PZT é controlada pela variação do comprimento

de onda de ressonância da FBG, a qual está sujeita a algum parâmetro externo. A possibilidade de modificar de forma dinâmica os parâmetros da grade e dos dispositivos nos quais elas são fixadas, tornam os sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas soluções viáveis para o desenvolvimento de sistemas inteligentes, como *smart structures* e *smart grids*.

## 5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, verificou-se a importância dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas nas diferentes áreas tecnológicas para criação de sistemas de monitoramento, devido as suas vantagens em relação aos sensores convencionais. As vantagens como baixas perdas, imunidade a interferências eletromagnéticas, pequenas dimensões e peso, além do baixo custo, tornam esse tipo de sensor ideal em diversas aplicações, como em estruturas civis, *smart structures*, *smart grids* e em processos industriais.

O artigo apresentou ainda os aspectos teóricos e a metodologia para criação de um sensor óptico baseado em grades em fibras ópticas. Os dois tipos mais comuns são as FBGs e as LPGs, cujo princípio de funcionamento pode ser explicado pela Teoria de Modos Acooplados. Além disso, conhecendo-se a relação entre o valor do comprimento de onda de ressonância da grade e a variação do parâmetro ao qual ela está sujeita, é possível monitorar a variação desse parâmetro através de um sistema de interrogação. Dessa forma, é possível criar diferentes tipos de sensores ópticos baseados em FBG e LPG com características específicas para cada aplicação, permitindo inclusive o monitoramento de parâmetros de forma dinâmica além de a tomada de decisões em tempo real.

## REFERÊNCIAS

AGRAWAL, G. P. 1997. *Fiber-Optic Communication Systems*, Second Edition, John Wiley & Sons: New York.

ALLSOP, T., ZHANG, L., BENNION, I. 2001. Detection of organic aromatic compounds by a long period fibre grating optical sensor with optimized sensitivity. *Optics Communications*, 191, 181-190.

ASHKIN, A., BOYD, G. D., DZIEDZIC, J. M., SMITH, R. G., BALLMAN, A. A., LEVINSTEIN, J. J., NASSAU, K. 1966. Optically-induced refractive index inhomogeneities in LiNbO<sub>3</sub> and LiTaO<sub>3</sub>. *Applied Physics Letters*, 9, 72-74.

BENNION, I., WILLIAMS, J. A. R., ZHANG, L., SUGDEN, K., DORAN, N. J. 1996. UV-written in-fibre Bragg gratings. *Optical and Quantum Electronics*, 28, 93-135.

BETZ, D. C., THURSBY, G., CULSAHW, B., STASZEWSKI, W. J. 2003. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings. *Smart Materials and Structures*, 12 (1), 122-128.

BHATIA, V. 1996. *Properties and sensing applications of long-period gratings*. Ph.D. Dissertation, Virginia Tech.

BHATIA, V., CAMPBELL, D., D'ALBERTO, T., EYCK, G. T., SHERR, D., MURPHY, K. A., CLAUS, R. O. Standard optical fiber long-period gratings with reduced temperature-sensitivity for strain and refractive index sensing. *Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication*. 1997. 346-347.

BHATIA, V., VENGSARKAR, A. M. 1996. Optical fiber long-period grating sensors. *Optics Letters*, 21 (9), 692-694.

BRAGHIN, F., CAZZULANI, G., CINQUEMANI, S., RESTA, F. Potential of FBG sensors for vibration control in smart structures. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, 2013. 186-191.

CARMO, J. P., SILVA, A. M. F., ROCHA, R. P., CORREIA, J. H. 2012. Application of Fiber Bragg Gratings to Wearable Garments. *IEEE Sensors Journal*, 12 (1), 261-266.

- CARVALHO, J. P., COELHO, L., FRAZÃO, O., SANTOS, J. L. Electrical Dynamic Interrogation System for Long Period Gratings. Proceedings of the 3rd WSEAS International Conference on Advances in Sensors, Signals and Materials. 2010. 158-161.
- COMANICI, M. I., ZHANG, L., CHEN, L. R., GU, X., WANG, L., KUNG, P. 2012. All-Fiber DBR-Based Sensor Interrogation System for Measuring Acoustic Waves. *Journal of Sensor*, 2012 (2012), 1-7.
- DELISA, M. P., ZHANG, Z., SHILOACH, M., PILEVAR, S., DAVIS, D. D., SIRKIS, J. S., BENTLEY, W. 2000. Evanescent wave long period fiber Bragg grating as an immobilized antibody biosensor. *Analytical Chemistry*, 72, 2895-2900.
- ERDOGAN, T. 1997. Fiber Grating Spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15 (8), 1277-1294.
- FALATE, R. 2006. *Redes de Período Longo Fabricadas com Arco Elétrico como Sensores de parâmetros Físico-Químicos*. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- FALCIAI, R., MIGNANI, A. G., VANNINI, A. Long period gratings as solution concentration sensors. 5<sup>th</sup> European Conference on Optical Chemical Sensors and Biosensors. 2001, 74. 74-77.
- FARRELL, T., O'CONNOR, P., LEVINS, J., MCDONALD, D. 2005. Novel FBG interrogation technique for achieving < 100 ne accuracies at remote distances > 70 km. *Proceedings of SPIE*, 5826 (1), 663-669.
- FERREIRA, L. AL., ARAÚJO, F. M., BARBOSA, C., COSTA, N. ARÊDE, A., COSTA, A., COSTA, P. Implementation of a fiber Bragg grating sensor network for structural monitoring of a new stone bridge. 3rd International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2006.
- FRIEBELE, E. J. 1998. Fiber Bragg Grating Strain Sensors: Present and Future Applications in Smart Structures. *Optics & Photonics News*, 9 (8), 33-37.
- GILES, C. R. 1997. Lightwave Applications of Fiber Bragg Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 15 (8), 1391-1404.
- GRATTAN, K. T. V., AUGOUSTI, A. T. 1996. *Introduction to Fiber Optic Sensors*, Chapman & Hall.
- HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S. 1978. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32 (10), 647-649.
- HILL, K. O., MELTZ, G. 1997. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. *Journal of Lightwave Technology*, 15 (8), 1263-1276.
- HUANG, Q., ZHANG, C., LIU, Q., NING, Y. New type of fiber optic sensor network for smart grid interface of transmission system. IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2010. 1-5.
- JAMES, S. W., TATAM, R. P. 2003. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. *Measurement Science and Technology*, 14 (5), 49-61.
- JUDKINS, J. B., PEDRAZZANI, J. R., DIGIOVANNI, D. J., VENGSARKAR, A. M. Temperature-insensitive long-period fiber gratings. Proceedings of Conference on Optical Fiber Communication. 1996. PD1.
- KARPOV, V. I., GREKOV, M. V., DIANOV, E. V., GOLANT, K. M., VASILIEV, S. A., MEDVEDKOV, O. I. Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermo-diffusion in nitrogen-doped silica-core fibers. *Optical*

- Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC'98, Technical Digest, 1998. 279-280.
- KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., KOO, K. P., ASKINS, C. G., PUTNAM, M. A., FRIEBELE, E. J. 1997. Fiber Grating Sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15 (8), 1442-1463.
- KROHN, D. A. 1992. *Fiber Optic Sensors*, Second Edition, Instrument Society of America, North Carolina.
- KUEH, S. R., PARNAS, R. S., ADVANI, S. G. 2002. A methodology for using long-period gratings and mold-filling simulations to minimize the intrusiveness of flow sensors in liquid composite molding. *Composites Science and Technology*, 62 (2), 311-327.
- MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H. 1989. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 14, 823-825.
- MÉNDEZ, A. Fiber Bragg grating sensors: a market overview. Invited Paper of EWOFS - European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2007.
- OTHONOS, A. 1997. Fiber Bragg gratings. *Review of Scientific Instruments*. 68 (12), 4309-4341.
- RAO, Y. J. 1999. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors. *Optics and Lasers in Engineering*, 31, 297-324.
- RAO, Y. J., WANG, Y. P., RAN, Z. L., ZHU, T. 2003. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO<sub>2</sub> laser pulses. *Journal of Lightwave Technology*, 21 (5), 1320-1327.
- REGO, G., OKHOTNIKOV, O., DIANOV, E., SULIMOV, V. 2001. High-temperature stability of long-period fibre gratings using an electric arc. *Journal of Lightwave Technology*, 19, 1574-1579.
- SHU, X., HUANG, D. 1999. Highly sensitive chemical sensor based on the measurement of the separation of dual resonant peaks in a 100-mm-period fiber grating. *Optics Communications*, 171, 65-69.
- TANG, J. L., WANG, J. N. 2008. Chemical Sensing Sensitivity of Long-Period Grating Sensor Enhanced by Colloidal Gold Nanoparticles. *Sensors*, 8 (1), 171-184.
- TAYLOR, H. F., YARIV, A. 1974. Guided Wave Optics. *Proceedings of the IEEE*, 62 (8), 1044-1060.
- TSUDA, H., URABE, K. 2009. Characterization of Long-period Grating Refractive Index Sensors and Their Applications. *Sensors*, 9, 4559-4571.
- VENGSAKAR, A. M., LEMAIRE, P. J., JUDKINS, J. B., BHATIA, V., ERDOGAN, T., SIPE, J. E. 1996. Long-Period Fiber Grating as Band-Rejection Filters. *Journal of Lightwave Technology*, 14 (1), 58-65.
- WANG, Y. 2010. Review of long period fiber gratings written by CO<sub>2</sub> laser. *Journal of Applied Physics*, 108, 081101-081119.
- WANG, Y. P., XIAO, L., WANG, D. N., JIN, W. 2006. Highly sensitive long-period fiber-grating strain sensor with low temperature sensitivity. *Optics Letters*, 31 (23), 3414-3416.
- YEO, T. L., SUN, T., GRATAN, K. T. V., PARRY, D., LADE, R., POWELL, B. D. 2005. Polymer-Coated Fiber Bragg Grating for Relative Humidity Sensing. *IEEE Sensors Journal*, (5), 1082-1089.