



Recepção acústica submarina por meio de hidrofones ópticos baseados em FBG (Fiber Bragg Grating) Underwater acoustic reception using Fiber Bragg Grating based hydrophones

Alexander Cascardo Carneiro¹Andres Pablo Lopez Barbero²

Resumo: Os sensores ópticos baseados em redes de Bragg em fibras ópticas (FBG – *Fiber Bragg Grating*) apresentam diversas vantagens, como imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso, tamanho compacto e resistividade à corrosão química, além de sua simplicidade e larga faixa dinâmica de operação. Essas características o tornam ideal em aplicações como detectores de ondas acústicas submarinas, nas quais os hidrofones convencionais vêm se tornando cada vez mais obsoletos. Um dos princípios a serem considerados ao desenvolver-se hidrofones baseados em FBG é a interface de acoplamento que deve elevar gradativamente a sensibilidade da FBG às ondas acústicas incidentes. Nesse aspecto, existem diversas técnicas e configurações para os hidrofones baseados em FBG para diferentes aplicações. Assim, o presente artigo traz uma revisão bibliográfica sobre a recepção de ondas acústicas submarinas por meio de hidrofones baseados em FBG.

Palavras-chave: Sensores em fibras ópticas; hidrofones baseados em FBG; ondas acústicas submarinas; revisão bibliográfica.

Abstract: Optical sensors based on fiber Bragg grating (FBG) have several advantages, such as immunity to electromagnetic interference, low weight, compact size and resistivity to chemical corrosion, in addition to its simplicity and wide dynamic range of operation. These characteristics make it ideal for applications such as underwater acoustic wave detectors, in which conventional hydrophones have become increasingly obsolete. One of the principles to be considered when developing FBG-based hydrophones is the coupling interface that should gradually increase the sensitivity of FBG to incident acoustic waves. In this respect, there are several techniques and configurations for hydrophones based on FBG for different applications. Thus, the present article brings a bibliographical review on the reception of underwater acoustic waves using FBG-based hydrophones.

Keywords: Optical fiber sensors; FBG-based hydrophones; underwater acoustic wave; bibliographical review.

¹ UFF – Universidade Federal Fluminense

² UFF – Universidade Federal Fluminense

1. Introdução

É evidente a vasta gama de aplicações dos sensores baseados em redes de Bragg em fibras ópticas (FBG – *Fiber Bragg Grating*). Isso se deve principalmente ao fato de a resposta da FBG a parâmetros físicos, como temperatura e deformação, conduzir a variações quase lineares de comprimento de onda. Além disso, as propriedades de imunidade eletromagnética, sensoriamento remoto, estabilidade em ambientes hostis, capacidade de multiplexação, elevada sensibilidade, larga faixa dinâmica e simplicidade, permitem que os sensores baseados em FBG ofereçam soluções onde os sensores convencionais são ineficientes.

O interesse na medição de ondas acústicas submarinas originou um conjunto de configurações de sensores de pressão acústica baseados em FBG (Bennion, 1998), (Takahashi *et al.*, 2000), (Wild e Hinckley, 2008). De modo geral, a medição da pressão acústica pode ser obtida devido a dois fatores: 1- As ondas acústicas provocam uma modulação no comprimento de onda do espectro óptico da FBG; 2- Um sistema de interrogação é capaz de converter essa variação de comprimento de onda em uma variação de amplitude, cuja magnitude é proporcional à pressão da onda acústica incidente. Dessa forma, os sensores de pressão acústica se baseiam em duas premissas: 1- Desenvolver interfaces de acoplamento que elevem gradativamente a sensibilidade da FBG às ondas acústicas incidentes; 2- Criar novas técnicas de interrogação de FBG capazes de converter pequenas variações de comprimento de onda em variações de amplitude cada vez maiores.

Em aplicações submarinas, os hidrofones convencionais, baseados em transdutores piezoelétricos, possuem uma série de desvantagens quando comparado aos sensores baseados em FBG. Em geral, os hidrofones baseados em piezoelétricos possuem grandes dimensões, necessitam de circuitos eletrônicos complexos, além de apresentarem elevada dificuldade de multiplexação, inviabilizando a sua utilização em aplicações que envolvam o sensoriamento de múltiplos parâmetros ou de um único parâmetro distribuído (Campopiano *et al.*, 2009). Com isso, hidrofones baseados em FBG estão se tornando excelentes alternativas aos hidrofones convencionais.

2. Aplicações dos sensores acústicos baseados em fibras ópticas

Os hidrofones possuem diferentes aplicações civis e militares, como em dispositivos de navegação e determinação da distância pelo som (SONAR - *Sound Navigation and Ranging*). Atualmente, a tecnologia mais bem estabelecida consiste nos hidrofones baseados em cerâmicas piezoelétricas (PZT – Titanato Zirconato de Chumbo), as quais convertem as ondas acústicas em tensões elétricas de saída, que podem estar relacionadas com a amplitude e a frequência da onda acústica incidente. Todavia, na configuração dos hidrofones baseados em PZT, grande

parte dos circuitos eletrônicos está imerso em água, acarretando o aumentando da probabilidade de mau funcionamento dos componentes, em função da contínua degradação por infiltrações, que ocorrem frequentemente em explorações de médio e longo prazo (Zhang *et al.*, 2008).

Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias ópticas demonstrou que os sensores ópticos podem ser utilizados como hidrofones para a detecção acústica em uma ampla faixa de frequência, desde aplicações em SONAR até imagem em ultrassom (Kirkendall e Dandridge, 2004), (Udd, 1990). Os hidrofones baseados em fibras ópticas possuem conhecidas vantagens sobre os sensores eletromecânicos convencionais, como os hidrofones baseados em PZT, visto que oferecem operações eletricamente passivas; são imunes a campos eletromagnéticos, pois a fibra óptica é fabricada inteiramente com materiais dielétricos (vidro e plástico); possuem dimensões bastante pequenas (diâmetro externo da ordem de 125 μm para fibras ópticas padrão); além da capacidade de multiplexação para medições em configurações de sensores distribuídos (Wild e Hinckley, 2008). Monitoramento remoto e em ambientes hostis também é possível. De fato, a baixa atenuação (da ordem de 0,3 dB/Km) das fibras ópticas na região em torno de 1,55 μm possibilita a instalação do sistema de controle óptico-eletrônico a quilômetros de distância do ponto de medição (Beverini *et al.*, 2006).

Dentre os sensores ópticos, os sensores baseados em FBG se destacam devido a sua robustez, larga faixa dinâmica, facilidade de multiplexação, além de conceberem soluções simples e de baixo custo (Beverini *et al.*, 2006). Algumas aplicações típicas desses sensores são no controle de deformação de estruturas, nas quais a FBG pode ser fixada ou embarcada. O IFAC (Instituto de Física Aplicada de Carrara) mostrou alguns exemplos de aplicações das FBGs nas áreas de Patrimônio Cultural (Castelli *et al.*, 2003): para medição *in situ* e monitoramento contínuo das deformações de pinturas em painéis de madeira; Automotiva (Falciai *et al.*, 2004): no monitoramento das deformações de para-brisas de carro; Saúde Estrutural (Falciai *et al.*, 2005): com FBGs embarcadas em fibras de carbono em tiras compósitas para reforço de vigas de concreto.

Recentemente, as FBGs vêm sendo utilizadas em um número crescente de aplicações como sensor acústico com diferentes configurações. A FBG pode ser facilmente adaptada, por exemplo, para monitoramento de estruturas (Wen *et al.*, 2008). Quando fissuras começam a se desenvolver em uma estrutura, devido à fadiga e à carga, estas podem ser associadas a rajadas de energia acústica, na forma de ondas ultrassônicas, provenientes das fendas e que se propagam através da estrutura. Portanto, a detecção de sinais de emissão acústica pode indicar precocemente um aviso de falha estrutural. Entretanto, os transdutores ultrassônicos convencionais não são facilmente integrados à estrutura, devido as suas elevadas dimensões. A FBG, por outro lado, possui dimensões bastante reduzidas, permitindo ser facilmente embarcada

à estrutura sem afetar a sua integridade física. Além disso, a FBG é ideal em aplicações de múltiplos sensores, nos quais as FBGs podem ser empregadas tanto em série quanto em paralelo. Dessa forma, é possível embarcar centenas de FBGs em asas de aeronaves, por exemplo, para monitoramento contínuo da saúde estrutural da asa durante o voo. Dessa forma, as vantagens da FBG, como pequenas dimensões e peso, e seu potencial em multiplexação por divisão de comprimento de onda, a tornam uma excelente candidata a aplicações submarinas para detecção de pressão acústica, viabilizando a fabricação de hidrofones baseados em FBG.

3. Aspectos gerais dos hidrofones baseados em FBG

Hidrofones baseados em FBG fornecem soluções eficientes mesmo quando comparado a outros tipos de hidrofones em fibras ópticas (Cusano *et al.*, 2007). Em geral, os hidrofones ópticos convencionais são compostos por uma fibra óptica padrão e baseiam-se na influência da pressão acústica sobre o deslocamento da fase óptica do laser ao propagar-se através do sensor à fibra óptica. A configuração mais apropriada para os hidrofones ópticos convencionais são as baseadas em interferômetros em fibras ópticas, pois garantem elevada sensibilidade na detecção das ondas acústicas incidentes. Entretanto, esse tipo de configuração necessita de grande estabilidade e calibração, que nem sempre podem ser garantidas no ponto onde o sensor está instalado. Hidrofones baseados em FBG utilizam apenas a FBG como elemento sensor, permitindo que todo o sistema de interrogação, ainda que complexo, seja instalado a centenas de quilômetros do ponto de medição. Dessa forma, hidrofones baseados em FBG costumam ser mais compactos e simples quando comparados aos hidrofones ópticos convencionais (Cusano *et al.*, 2007).

Abordagens cada vez mais eficientes têm sido propostas com base na utilização de FBG para detecção acústica. Takahashi *et al.* (2000) propuseram uma FBG inscrita em fibra óptica como detector de ondas acústicas submarinas. Em seu trabalho, a faixa operacional e a sensibilidade à pressão do hidrofone foram sistematicamente investigadas, e a resposta em frequência foi estudada em várias faixas de frequência acústica. Melhorias na resposta do hidrofone foram obtidas via compensação de temperatura (Thongum *et al.*, 2002) através da utilização de um controle realimentado. Operações de multiplexação em hidrofones baseados em FBG, tanto por divisão de tempo (TDM – *Time Division Multiplexing*) (Takahashi *et al.* 1999), quanto por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*) (Yokosuka *et al.*, 2005), foram demonstradas a fim de permitir a detecção em múltiplos pontos.

Apesar de todas as vantagens dos hidrofones baseados em FBG apresentadas até aqui, a baixa sensibilidade da FBG às ondas acústicas impõe um limite na sua utilização em aplicações submarinas. Essa baixa sensibilidade é devido ao elevado módulo de Young (módulo de

elasticidade) da fibra óptica (da ordem de 72 GPa) (Liu e Guo, 2001). Isso significa que é necessário um valor bastante elevado de pressão acústica para gerar uma modulação do espectro da FBG que seja detectável. Uma forma de elevar a sensibilidade da FBG à pressão acústica é revestir a região da grade com um material que possua baixo módulo de Young (Cusano *et al.*, 2007). Para um dado sensor acústico, o principal efeito do revestimento é aumentar a deformação dinâmica, experimentada pelo sensor, cujo fator depende da razão entre os módulos de elasticidade da fibra óptica e do revestimento. Essa afirmação é demonstrada na Figura 1, na qual é apresentado o ganho teórico em sensibilidade à pressão acústica em função da relação entre o diâmetro do revestimento e da fibra óptica para diferentes valores de módulo de Young. A taxa de Poisson do revestimento considerado nesse cálculo mede $\nu_{rev} = 0,30$.

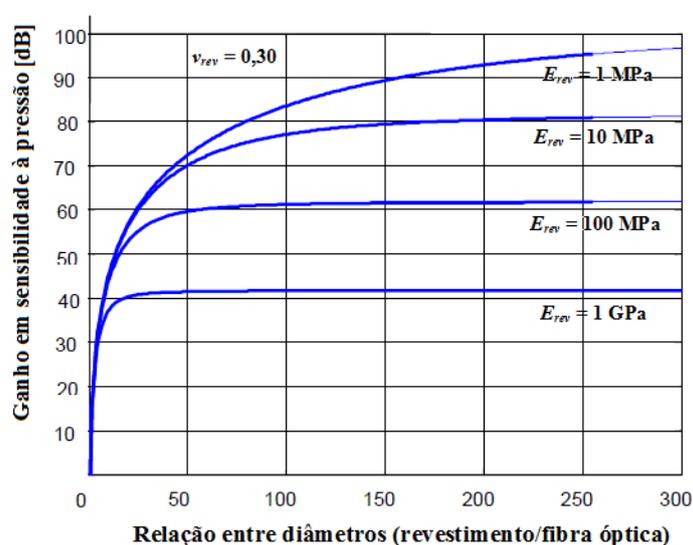


Figura 1: Ganho teórico em sensibilidade à pressão em função da relação entre diâmetros (diâmetro do revestimento/diâmetro da fibra óptica) de uma seção transversal com geometria cilíndrica, para diferentes valores de módulo de Young (Cusano *et al.*, 2007).

Portanto, um revestimento adequado possibilita elevar a sensibilidade do sensor baseado em FBG às ondas acústicas submarinas incidentes, permitindo a sua utilização em diferentes aplicações. Alguns exemplos de revestimento para FBG atuando como hidrofones incluem FBG revestida com polímero (Liu e Guo, 2001), com polímero blindado (Sheng *et al.*, 2004) e por um pistão funcionando como diafragma (Zhang *et al.*, 2008). De fato, hidrofones baseados em FBG demonstram um desempenho significativo como sensor acústico submarino, explorando metodologias e tecnologias relativamente baratas e bem estabelecidas, com estratégias de multiplexação e técnicas de interrogação, cuja eficácia já foi comprovada em diferentes

aplicações tanto na área de Comunicações Ópticas quanto em Sensoriamento (Moccia *et al.*, 2011).

4. Aspectos teóricos dos hidrofones baseados em FBG

O cenário operacional do hidrofone baseado em FBG sobre a influência de ondas acústicas submarinhas é ilustrado na Figura 2. Quando uma onda acústica propagante na água incide sobre o sensor, a onda acústica age como uma força sobre as fronteiras externas. A estrutura compósita do sensor por sua vez sofre uma deformação mecânica de acordo com as suas propriedades elásticas. Dessa forma, a deformação mecânica resultante, isto é, a deformação sobre a FBG, provoca um deslocamento do comprimento de onda central, cuja magnitude $\Delta\lambda_c$ é proporcional à amplitude da onda acústica incidente.

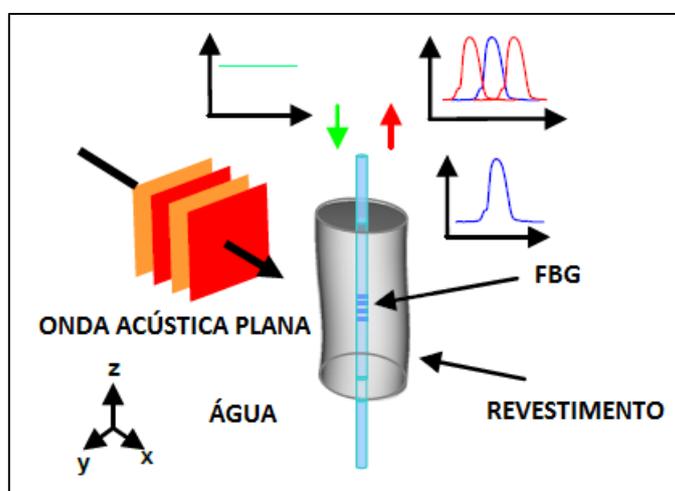


Figura 2: Descrição esquemática do cenário operacional para hidrofones baseados em FBG (Moccia *et al.*, 2011).

Uma FBG consiste de uma perturbação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica. A FBG atua sobre a radiação propagante nas fibras como um espelho seletivo em comprimento de onda. Esse comprimento de onda refletido é conhecido como comprimento de onda central λ_c , mostrado em (1) (Beverini *et al.*, 2006):

$$\lambda_c = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

Em que Λ é o período da grade e n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado. A largura de banda de reflexão pode ser controlada pela reflexividade da FBG, através do controle do comprimento da grade e/ou da profundidade de modulação do índice de refração. O valor da largura de banda de reflexão da FBG está tipicamente em torno de 0,2 nm. Radiações fora da banda de reflexão da FBG se propagam na fibra sem perturbações, como mostra a Figura 3.

FBGs são fabricadas usando o método da máscara de fase em fibras ópticas especiais dopadas com germânio (Hill e Meltz, 1997). Uma máscara de fase é um elemento óptico

difrativo que modula espacialmente o feixe de ultravioleta para inscrita da grade, tipicamente no comprimento de onda de 248 nm, no qual a fotossensibilidade da fibra óptica é mais elevada. O padrão de franjas do campo próximo, o qual é produzido atrás da máscara, foto-imprime uma modulação no índice de refração do núcleo da fibra óptica fotossensível.

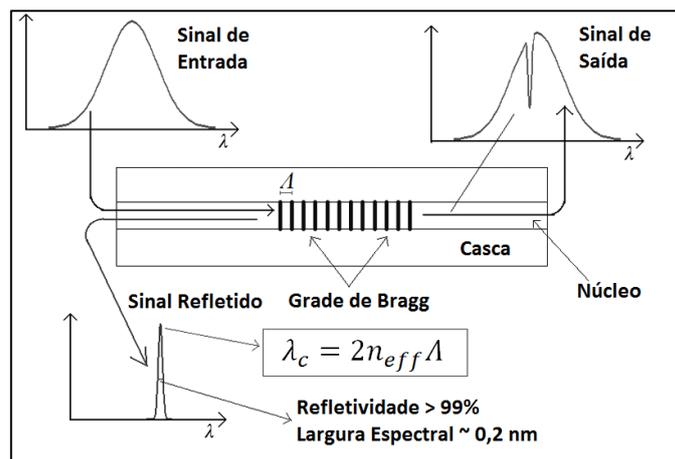


Figura 3: Propriedade de reflexão e transmissão da FBG (Beverini *et al.*, 2006).

As FBGs são altamente sensíveis a perturbações externas que afetem a fibra óptica. Deformação, temperatura e pressão são parâmetros que provocam variações sobre a fibra óptica, resultando em mudanças tanto no período (Λ) quanto no índice de refração efetivo (n_{eff}) da FBG, produzindo um deslocamento no comprimento de onda central com magnitude $\Delta\lambda_c$, como mostra a Figura 4.

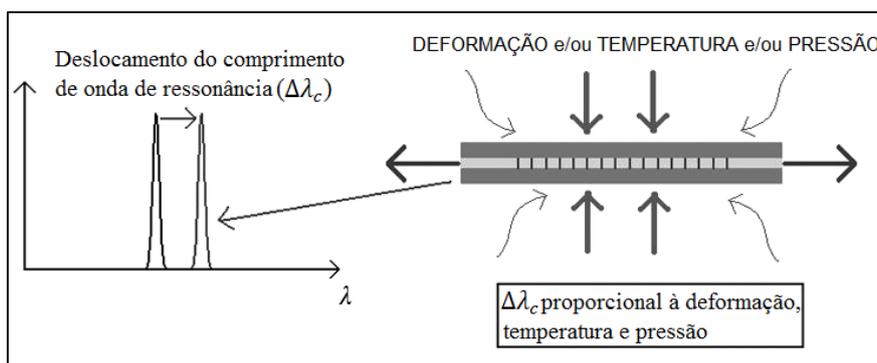


Figura 4: Efeitos da deformação, temperatura e pressão sobre o espectro de reflexão da FBG (Beverini *et al.*, 2006).

Portanto, a variação do parâmetro físico fica expressa na variação do comprimento de onda central da FBG $\Delta\lambda_c$. Essa característica permite utilizar a FBG como sensor de deformação, temperatura e pressão.

A FBG pode ser utilizada como um sensor de pressão acústica, de forma que a onda acústica incidente sobre a FBG provoque um deslocamento no seu comprimento de onda central. A relação entre a deformação sobre a fibra óptica e a consequente variação no comprimento de onda central do espectro de reflexão da FBG $\Delta\lambda_c$, normalizado para o comprimento de onda central λ_c , é dada por (2) (Matos *et al.*, 2001):

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = \varepsilon_z - \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{11}\varepsilon_x + p_{12}(\varepsilon_x + \varepsilon_y)] \quad (2)$$

Em que p_{11} e p_{12} são os parâmetros elástico-ópticos ou coeficientes foto-elásticos da fibra óptica, n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado, e ε_i ($i = x, y, z$) são as componentes cartesianas do tensor deformação calculadas no local onde está inscrita a FBG. Quando a birrefringência induzida não é significativa ($\varepsilon_x = \varepsilon_y$) e as componentes de deformação são uniformes ao longo o comprimento da FBG, pode-se fazer a aproximação $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$ (Minardo *et al.*, 2005). Essa aproximação é válida quando o comprimento de onda da onda acústica é muito maior do que o comprimento do sensor. Visto que o comprimento de onda da onda acústica (da ordem de km) incidente sobre a FBG é muito maior do que o seu comprimento (da ordem de cm), a aproximação $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z$ pode ser substituída em (2), conduzindo à (3) (Hocker, 1979):

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = \left[1 - \frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right] \varepsilon_z \quad (3)$$

Em condições hidrostáticas, a deformação longitudinal se comporta como (4) (Liu *et al.*, 2000):

$$\varepsilon_z = \frac{(2\nu - 1)P}{E} \quad (4)$$

Em que P representa a amplitude da pressão da onda acústica, E é o módulo de Young da fibra óptica e ν a taxa de Poisson da fibra óptica. Substituindo (4) em (3) chega-se à (5) (Campopiano *et al.*, 2009):

$$\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_c} = \left[\frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \frac{(1 - 2\nu)P}{E} \quad (5)$$

Considerando uma onda acústica cossenoidal $P(t) \cdot \cos(\omega t)$, em que $P(t)$ é a amplitude instantânea da pressão da onda acústica e ω a frequência angular, tem-se, como resultado, uma variação do comprimento de onda central da FBG da forma $\Delta\lambda_c(t) \cdot \cos(\omega t)$,

em que $\Delta\lambda_c(t)$ é a magnitude, ou amplitude, instantânea do deslocamento do comprimento de onda central da FBG. Com isso, chega-se à (6):

$$\frac{\Delta\lambda_c(t)}{\lambda_c} = \left[\frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \frac{(1 - 2\nu)P(t)}{E} \quad (6)$$

A sensibilidade à pressão acústica é expressa em (7) (Wen *et al.*, 2008):

$$k_p = \left[\frac{n_{eff}^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) - 1 \right] \frac{(1 - 2\nu)}{E} \quad (7)$$

Substituindo (7) em (6), tem-se a (8):

$$\frac{\Delta\lambda_c(t)}{\lambda_c} = k_p P(t) \quad (8)$$

A equação (8) apresenta a relação entre a magnitude, ou amplitude, do deslocamento do comprimento de onda central da FBG $\Delta\lambda_c(t)$ e a amplitude instantânea da pressão da onda acústica $P(t)$ que incide sobre a FBG. Dessa forma, conhecendo-se as características ópticas da FBG (λ_c) e da fibra óptica (p_{11} , p_{12} , n_{eff} , E e ν) é possível determinar a relação entre $\Delta\lambda_c$ e P .

5. Revisão bibliográfica sobre os hidrofones baseados em FBG

Existem diversos desafios técnicos no desenvolvimento de hidrofones baseados em FBG. Em primeiro lugar, a sensibilidade à pressão acústica deve ser muito elevada, visto que o sinal acústico é muito fraco e o ambiente submarino é muito ruidoso. Em segundo lugar, a velocidade de detecção deve ser alta o suficiente para recuperar instantaneamente a maior parte da informação do sinal acústico, como amplitude e frequência.

Xu *et al.* (1993) demonstraram que uma FBG sem revestimento possui baixa sensibilidade à pressão. Em seus experimentos, uma pressão acústica de 70 Mpa foi aplicada à FBG provocando uma amplitude da variação do comprimento de onda central de apenas 0,22 nm, que corresponde a uma sensibilidade à pressão da onda acústica da ordem de $-2,02 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹, em (8), para $\lambda_c = 1550$ nm.

Teoricamente, os parâmetros da fibra óptica são dados por: $p_{11} = 0,121$, $p_{12} = 0,265$, $n_{eff} = 1,465$, $E = 72$ GPa e $\nu = 0,17$ (Hill e Cranch, 1999). Substituindo esses valores em (7), chega-se ao valor teórico da sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica para a fibra óptica sem revestimento $k_p^{fo} = -2,76 \cdot 10^{-6}$ MPa⁻¹ (Hill e Cranch, 1999), que é próximo ao valor encontrado experimentalmente por Xu *et al.* (1993).

5.1. Hidrofones baseados em FBG revestida por polímero

Quando as fibras ópticas são revestidas com materiais poliméricos, elas exibem um aumento de algumas ordens de magnitude em sua sensibilidade à pressão acústica (Bucaro e Hickman, 1979). De acordo com a análise de Hocker (Liu *et al.*, 2000), se uma FBG for

revestida com uma camada fina de polímero, a magnitude do deslocamento do comprimento de onda central da FBG normalizado é dada segundo (9):

$$\frac{\Delta\lambda_c(t)}{\lambda_c} = \left\{ \frac{n_{eff}^2}{2} \cdot [p_{12} - \nu \cdot (p_{11} + p_{12})] - 1 \right\} \cdot \frac{(1 - 2\nu_{rev})}{E_{rev}} \cdot P(t) \quad (9)$$

Em que E_{rev} e ν_{rev} são, respectivamente, o módulo de Young do revestimento e a taxa de Poisson do revestimento. Considerando (9), e os parâmetros da fibra óptica ($p_{11} = 0,121$, $p_{12} = 0,265$, $n_{eff} = 1,465$, e $\nu = 0,17$), chega-se à (10) para a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica incidente, quando revestida por um polímero (Wen *et al.*, 2008):

$$k_p^{rev} = -0,79 \cdot \frac{(1 - 2\nu_{rev})}{E_{rev}} \quad (10)$$

Wen *et al.* (2008) demonstraram que uma FBG revestida por uma camada fina de um polímero em formato cilíndrico nomeado PP-1 ($E_{rev} = 9$ MPa e $\nu_{rev} = 0,49$) tem sua sensibilidade à pressão da onda acústica elevada para $-1,10 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹. Teoricamente, substituindo os valores de E_{rev} e ν_{rev} em (10), chega-se ao valor de $k_p^{rev} = -1,76 \cdot 10^{-3}$ MPa⁻¹. A relação entre a magnitude do deslocamento do comprimento de onda central da FBG, revestida por esse polímero, e a amplitude da pressão da onda acústica incidente é linear.

É possível analisar a influência do módulo de Young e da taxa de Poisson do revestimento sobre a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica, como mostra a Figura 5. Pode-se observar que a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica diminui à medida que a taxa de Poisson do polímero se eleva. Além disso, quando a taxa de Poisson do polímero é muito pequena, a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica diminui rapidamente com o aumento do módulo de Young do polímero. Por outro lado, quando a taxa de Poisson do polímero tem um valor elevado, o módulo de Young tem pequena influência sobre a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica incidente. Dessa forma, para elevar a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica, é preciso fabricar revestimentos a base de polímeros com baixo módulo de Young e baixa taxa de Poisson.

Outro parâmetro importante relacionado aos hidrofones baseado em FBG revestida com polímero é o ganho em sensibilidade à pressão da onda acústica (G_p), dado em (11), o qual é definido como o ganho em sensibilidade à pressão acústica da FBG quando revestida por um polímero (k_p^{rev}) em relação à FBG sem revestimento (k_p^{fo}):

$$G_p = 20 \cdot \log_{10} \left(\left| \frac{k_p^{rev}}{k_p^{fo}} \right| \right) \quad (11)$$

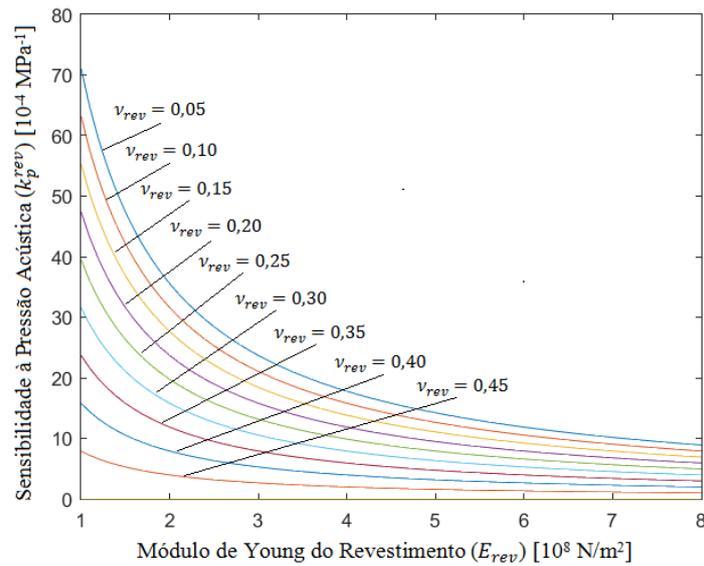


Figura 5: Influência do módulo de Young do polímero sobre a sensibilidade da FBG à pressão acústica incidente, para diferentes taxas de Poisson do polímero.

A Figura 6 apresenta o ganho teórico em sensibilidade à pressão da onda acústica (G_p), em dB, em função do módulo de Young do revestimento (E_{rev}), para diferentes taxas de Poisson (ν_{rev}). É possível notar que o ganho em sensibilidade à pressão da onda acústica se eleva à medida que a taxa de Poisson e o módulo de Young diminuem.

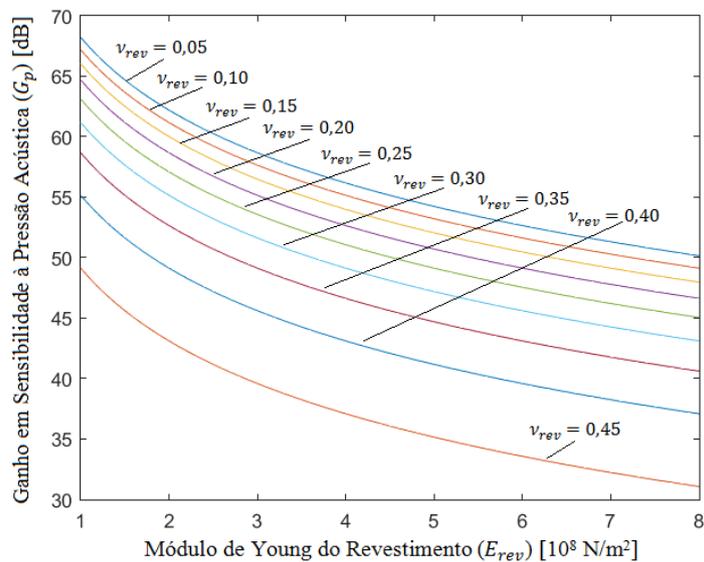


Figura 6: Ganho em sensibilidade da FBG à pressão acústica incidente, em dB, em função do módulo de Young do revestimento, para diferentes taxas de Poisson.

Logo, para elevar a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica incidente, é preciso revesti-la com um material polimérico de baixo módulo de Young e baixa taxa de Poisson.

5.2. Hidrofones baseados em FBG inserida em um pistão funcionando como diafragma

A presente Seção resume o trabalho de Zhang *et al.* (2008), no qual foi apresentado um hidrofone baseado em FBG com elevada sensibilidade à pressão da onda acústica incidente (da ordem de $-4,6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$). O hidrofone consiste de uma fina camada cilíndrica de metal e um pistão funcionando como diafragma. Devido à maior deformação do diafragma com a presença de um núcleo rígido central, a redução das dimensões em conjunto com uma elevada sensibilidade à pressão da onda acústica foi alcançada.

O hidrofone baseado em FBG proposto por Zhang *et al.* (2008) é mostrado na Figura 7. A água entra no hidrofone através do orifício sensor e age sobre a superfície do pistão funcionando como diafragma. O diafragma, que é feito de borracha, é pressurizado na direção axial, criando uma tensão axial sobre a FBG. O núcleo rígido de cobre está afixado no centro do diafragma para elevar a sensibilidade e auxiliar na fixação da fibra óptica.

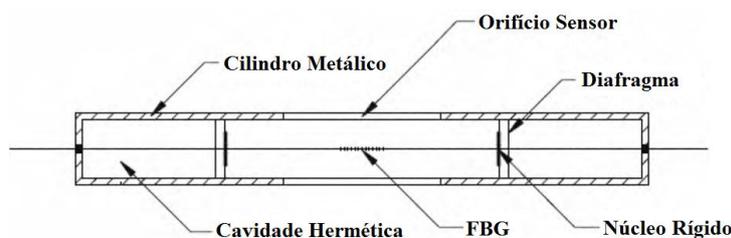


Figura 7: Ilustração esquemática do hidrofone baseado em FBG proposto por Zhang (Zhang *et al.*, 2008).

Visto que o diafragma é feito de borracha, o módulo de Young pode variar dentro da faixa entre 1 MPa e 10 GPa (Hofmann, 1989). A análise teórica comprovou que a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica se eleva à medida que o módulo de Young do diafragma diminui. Na configuração descrita por Zhang *et al.* (2008), o comprimento da FBG era de 8 cm, a espessura do diafragma era 1 mm, o raio do diafragma era de 3,5 mm, o raio do núcleo rígido era de 1,2 mm, a taxa de Poisson do diafragma era de 0,45, o módulo de Young da fibra óptica era de 72 GPa, o comprimento de onda central da FBG era de 1527 nm e o módulo de Young do diafragma possui diferentes valores entre 5 MPa e 100 MPa.

Considerando um diafragma feito de borracha de poliuretano do tipo T-805 (módulo de Young igual a 17 MPa e taxa de Poisson de 0,45), além do raio externo do cilindro metálico igual a 5 mm e o raio do núcleo rígido igual a 1,2 mm (os demais parâmetros são iguais aos apresentados no parágrafo anterior), chegou-se ao valor teórico de $-4,5 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ para a sensibilidade à pressão da onda acústica, o qual é muito próximo do resultado obtido experimentalmente (Zhang *et al.*, 2008).

É importante observar que o valor da sensibilidade à pressão da onda acústica encontrado por Zhang *et al.* (2008) é ainda maior do que o encontrado por Wen *et al.* (2008) (aproximadamente 4 vezes maior) para uma FBG revestida por um polímero. Ao calcular o ganho em sensibilidade à pressão da onda acústica (G_p) para $k_p^{rev} = -1,10 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (Wen *et al.*, 2008) e $k_p^{rev} = -4,6 \cdot 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ (Zhang *et al.*, 2008), chega-se aos valores de G_p iguais a 52 dB e 64.4 dB, respectivamente.

6. Conclusão

O presente artigo apresentou os principais conceitos relacionados aos hidrofones baseados em FBG, incluindo suas características, configurações e aplicações. Além disso, foram explicados os aspectos teóricos dos hidrofones baseados em FBG, demonstrando as equações que relacionam a pressão da onda acústica incidente e a magnitude de variação do comprimento de onda central da FBG. Por fim foi abordada uma revisão bibliográfica sobre os hidrofones baseados em FBG, descrevendo diferentes interfaces de acoplamento, seja através do revestimento por um polímero ou de um pistão funcionando como diafragma, com o intuito de elevar a sensibilidade da FBG à pressão da onda acústica incidente.

7. Referências

BENNION, I. 1998. Ultrasonic hydrophone based on short in-fiber Bragg gratings. *Appl. Opt.*, 37, 8120-8128.

BEVERINI, N., FALCIAI, R., MACCIONI, E., MORGANTI, M., SORRENTINO, F., TRONO, C. 2006. Developing fiber lasers with Bragg reflectors as deep sea hydrophones. *Annals of Geophysics*, 40, 6, 1157-1165.

BUCARO, J. A., HICKMAN, T. R. 1979. Measurement of sensitivity of optical fibers for acoustic detection. *Appl. Opt.*, 18, 938-941.

CAMPOPIANO, S., CUTOLO, A., CUSANO, A., GIORDANO, M., PARENTE, G., LANZA, G., LAUDATI, A. 2009. Underwater Acoustic Sensors Based on Fiber Bragg Gratings. *Sensors*, 9, 4446-4454.

CASTELLI, C., LANTERNA, G., FALCIAI, R., TRONO, C. 2003. Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg-grating sensors. *J. Cultural Heritage*, 4, 285-290.

CUSANO, A., D'ADDIO, S., CUTOLO, A., CAMPOPIANO, S., BALBI, M., BALZARINI, S., GIORDANO, M. 2007. Enhanced acoustic sensitivity in polymeric coated fiber Bragg grating. *Sens. Transducers J.*, 82, 1450-1457.

FALCIAI, R., KENNY, J. M., TERENCEZI, A., TRONO, C., MEZZACASA, R. Reinforcing and monitoring of concrete structures with composites and fiber optic sensors, in Proceedings of the 9th Conference Sensors and Microsystems, 2005. 329-336.

FALCIAI, R., TRONO, C., CASTELLI, P., GALLI, R., MATTIUCCI, N., PALLARO, N. Automotive applications of fiber Bragg grating sensors, in Proceedings of the 8th Conference Sensors and Microsystems, 2004. 545.

HILL, D. J., CRANCH, G. A. 1999. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fiber Bragg grating. *Electron. Letter*, 35, 15, 1268-1269.

HILL, K. O., MELTZ, G. 1997. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. *J. Lightwave Technol.*, 15, 1263-1276.

HOCKER, G. B. 1979. Fiber optic sensing of pressure and temperature. *Appl. Opt.*, 18, 9, 1445-1448.

HOFMANN, W. 1989. *Rubber technology handbook*, New York, Hanser Publishers.

KIRKENDALL, C. K., DANDRIDGE, A. 2004. Overview of high performance fibre-optic sensing. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 37, 18, R197-R216.

LIU, Y., GUO, Z. 2001. Technique of tune filter detection in fiber Bragg grating sensor. *AC7J1 Optica Sinica*, 21, 1, 88-92.

LIU, Y., GUO, Z., LIU, Z. 2000. High-sensitivity fiber grating pressure sensor with polymer jacket. *Chinese J. Lasers*, 27, 3, 211-214.

MATOS, C. J. S., TORRES, P., VALENTE, L. C. G., MARGULIS, W., STUBBE, R. 2001. Fiber Bragg grating (FBG) characterization and shaping by local pressure. *J. Lightwave Technol.*, 19, 8, 1206-1211.

MINARDO, A., CUSANO, A., BERNINI, R., ZENI, L., GIORDANO, M. Response of fiber Bragg gratings to longitudinal ultrasonic waves. 2005. *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, 52, 2, 304-312.

MOCCIA, M., PISCO, M., CUTOLO, A., GALDI, V., BEVILACQUA, P., CUSANO, A. 2011. Opto-acoustic behavior of coated fiber Bragg gratings. *Optics Express*, 19, 20, 18842-18860.

SHENG, H. J., FU, M. Y., CHEN, T. C., LIU, W. F., BOR, S. S. 2004. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Technology Letter*, 16, 4, 1146-1148.

TAKAHASHI, N., TETSUMURA, K., TAKAHASHI, S. 1999. Multipoint detection of acoustical wave in water with WDM fiber Bragg grating sensor, *Proc. SPIE*, 3740, 270-273.

TAKAHASHI, N., YOSHIMURA, K., TAKAHASHI, S., IMAMURA, K. 2000. Development of an optical fiber hydrophone with fiber Bragg grating. *Ultrasonics*, 38, 581-585.

THONGUM, W., TAKAHASHI, N., TAKAHASHI, S. Temperature stabilization of fiber Bragg grating vibration sensor, OFS 2002, 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002, 223-226.

UDD, E. 1990. *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, New York, Wiley.

WEN, Q., ZHU, J., GONG, S., HUANG, J., GU, H., ZHAO, P. 2008. Design and synthesis of a packaging polymer enhancing the sensitivity of fiber grating pressure sensor. *Progress in Natural Science*, 18, 197-200.

ISSN: 1415-7314

ISSN online: 2317-6717

WILD, G., HINCKLEY, S. 2008. Acoustic-ultrasonic optical fiber sensors: overview and state-of-the-art. *IEEE Sens. J.*, 8, 10, 1184-1193.

XU, M. G., REEKIE, L. CHOW, Y. T. 1993. Optical in fiber grating high pressure sensor. *Electron. Letter*, 29, 4, 398-399.

YOKOSUKA, H., TANAKA, S., TAKAHASHI, N. 2005. Time-division multiplexing operation of temperature-compensated fiber Bragg grating underwater acoustic sensor array with feedback control. *Acoust. Sci. Technol.*, 6, 5, 456-458.

ZHANG, W., LI, F., LIU, Y., XIAO, H. FBG Hydrophone: Theory and Experiment, IEEE Optical Fiber Sensors Conference, 2008.