

Técnica de Interrogação de LPGs Auto-Referenciável por Análise Espectral

V. A. Oliveira, A. Cascardo, A. P. López-Barbero, V. H. N. Silva, e R. M. Ribeiro.

Resumo - Este artigo apresenta o desenvolvimento de uma nova técnica de interrogação de sensores à fibra óptica baseados em redes de período longo (LPG). A técnica é um modelo matemático simples e robusto, que considera todos os parâmetros espectrais da LPG, como largura de banda, comprimento de onda de ressonância e profundidade de atenuação. A validação dessa técnica é feita por resultados experimentais obtidos de medidas do índice de refração, com erro relativo inferior a 0,15%. Foi verificada uma faixa dinâmica de operação para a obtenção do deslocamento do comprimento de onda de ressonância da LPG em torno de 18 nm.

Palavras-Chave—Técnica de Interrogação, Redes de Período Longo (LPG), Índice de Refração.

Abstract— This paper presents the development of a new interrogation technique for optical fiber sensors based on long period grating (LPG). The technique is a simple and robust mathematical model, that considers all the LPG's spectral parameters, such as the bandwidth, the resonance wavelength, and the attenuation depth. The validation of this technique is done by experimental results obtained from measurements of the refractive index, with relative error less than 0.15%. A dynamic operating range to obtain the resonance wavelength shift of the LPG around 18 nm was verified.

Keywords—Interrogation Technique, Long Period Gratings (LPG), Refractive Index.

I. INTRODUÇÃO

Em 1996, VENGSARKAR *et al.* demonstraram o uso de estruturas denominadas redes de período longo (LPG - *Long Period Gratings*) como transdutores ópticos [1]. As LPGs são estruturas feitas de fibras ópticas que se comportam como filtros rejeita banda. São dispositivos ópticos passivos e que partilham das características intrínsecas das fibras ópticas, como imunidade a interferências eletromagnéticas, além de características específicas, tais como baixa perda de inserção e alta sensibilidade [2]. Possuem várias vantagens devido às suas características físicas, como baixo peso, pequenas dimensões e elevada resistência à corrosão [3], o que desperta o interesse da comunidade científica no uso de LPGs para o desenvolvimento de sensores ópticos. Vários estudos têm sido publicados neste segmento mostrando o desempenho das LPGs como sensores de temperatura [4], tração [5], curvatura [6] e índice de refração [7].

O grande desafio no uso de LPGs como sensor é o desenvolvimento de técnicas de interrogação capazes de relacionar as alterações na banda de atenuação com a grandeza mensurada. Dentre as técnicas de interrogação de

LPG, destacam-se as baseadas na análise espectral, também chamada de análise harmônica [8-12]. Dentre essas técnicas, um princípio bastante promissor é o da espectroscopia derivativa. Esse princípio consiste em realizar a modulação do comprimento de onda de uma portadora óptica, transmitindo-a através da banda de atenuação de uma LPG. O resultado é um sinal óptico demodulado contendo componentes harmônicas, cujas amplitudes dependem da inclinação da banda de atenuação da LPG no comprimento de onda no qual está ocorrendo a demodulação. Tendo em vista que um parâmetro físico altera a banda de atenuação da LPG, é possível, então, obter o valor desse parâmetro a partir das amplitudes dos harmônicos. ALLSOP *et al.* [9] demonstraram o uso do princípio da espectroscopia derivativa para a interrogação de uma LPG sujeita a curvaturas. Nesse caso, o comprimento da curvatura, que está associado a variações na banda de atenuação da LPG, é calculado a partir da razão entre a amplitude do primeiro e do segundo harmônico do sinal demodulado. Entretanto, no modelo matemático proposto por ALLSOP *et al.*, as equações das amplitudes dos harmônicos não consideram todos os parâmetros espectrais da banda de atenuação da LPG, como a largura de banda e o comprimento de onda de ressonância, separadamente. CARNEIRO *et al.* [10] e PRESLEY *et al.* [11,12] apresentaram um novo modelo matemático que considera todos os parâmetros espectrais da banda de atenuação da LPG na equação das amplitudes dos dois primeiros harmônicos. Esse modelo é mais simples, robusto e possui faixa dinâmica superior ao modelo apresentado em [9]. Porém, em [10-12] foi mostrado o desenvolvimento do modelo matemático sem dar à técnica uma aplicação específica. Além disso, as amplitudes dos harmônicos dependiam da potência da fonte óptica utilizada. Dessa forma, a interrogação e a consequente obtenção do parâmetro de interesse exigem o conhecimento prévio da potência da fonte óptica, acarretando imprecisões do ponto de vista experimental.

O presente artigo descreve a evolução da técnica publicada nos trabalhos anteriores [10-12], mostrando como a razão entre as amplitudes dos harmônicos podem torná-la auto-referenciável, isto é, independente da potência da fonte óptica e de perdas no caminho óptico. A técnica será validada experimentalmente e, adicionalmente, uma aplicação para medir o índice de refração de diferentes soluções será apresentada.

II. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

A Fig. 1 apresenta a configuração experimental utilizada para a comprovação da técnica de interrogação de LPG e para a demonstração da aplicação proposta neste artigo.

Vicente Alves de Oliveira, Alexander Cascardo, Andrés Pablo López Barbero, Vinícius Henrique Nunes Silva e Ricardo Marques Ribeiro estão com a Universidade Federal Fluminense (UFF), PPGEEET e PPGIO, Niterói-RJ, Brasil, E-mails: oliveira.vicente@gmail.com.

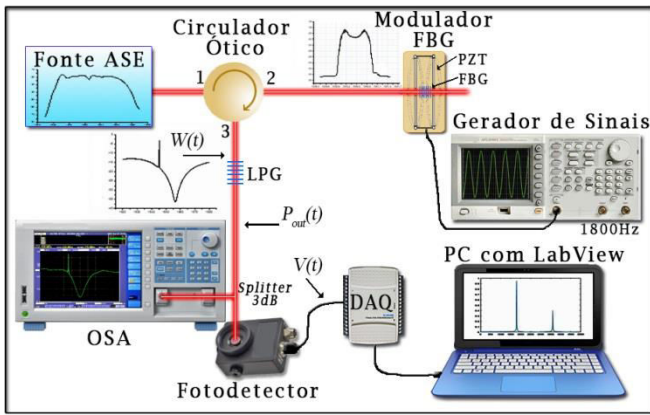


Fig. 1. Configuração experimental.

Como pode ser visto na Fig. 1, uma fonte ASE (*Amplified Spontaneous Emission* – Emissão Espontânea Amplificada), com largura de banda entre 1530 nm a 1610 nm, é acoplada ao circuito óptico através da porta 1 do circulator óptico e transmitida para a porta 2 onde o modulador FBG (*Fiber Bragg Grating* – Rede de Bragg em Fibras Ópticas) está ligado. A luz da fonte ASE é refletida pela FBG, que define o comprimento de onda central (λ_c) da portadora óptica. Para modular o comprimento de onda da portadora óptica (λ_c), é aplicado um sinal elétrico senoidal nos terminais do PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), promovendo uma deformação axial da FBG. O sinal elétrico aplicado no modulador FBG gera um deslocamento de A_m em torno do comprimento de onda central (λ_c) da FBG. A portadora óptica modulada em comprimento de onda é refletida e transmitida através da porta 3 do circulator óptico. A portadora óptica modulada em comprimento de onda é, então, transmitida através da LPG antes de ser detectada pelo fotodetector. A LPG atua como um demodulador óptico passivo, convertendo as variações de comprimento de onda da portadora óptica modulada em uma portadora óptica modulada em amplitude. Em seguida, a portadora óptica modulada em amplitude é detectada pelo fotodetector, que o converte em um sinal elétrico, cuja amplitude é proporcional à potência óptica de entrada. Esse sinal elétrico é digitalizado por uma placa de aquisição (DAQ – *Data Acquisition*) e as amplitudes dos harmônicos desse sinal elétrico são obtidas a partir de uma FFT (*Fast Fourier Transform* – Transformada Rápida de Fourier) executada no LabView.

III. MODELO MATEMÁTICO

A técnica apresentada neste trabalho é suportada pela modelagem matemática das amplitudes dos harmônicos. A sequência matemática para obtenção das equações das amplitudes do primeiro e do segundo harmônico será apresentada nessa seção. Primeiramente, a banda de atenuação da LPG pode ser ajustada a uma curva gaussiana [13], como:

$$P_{out}(\lambda) = P_0(1 - m \cdot e^{-a(\lambda - \lambda_r)^2}), \quad (1)$$

onde $P_{out}(\lambda)$ representa a banda de atenuação da LPG em função do comprimento de onda λ , P_0 representa a potência

da fonte óptica e todas as perdas de inserção apresentadas na Fig. 1, tais como do circulator, da reflexão pela FBG e de perdas da própria LPG. O valor $(1 - m)$ é a profundidade de atenuação que ocorre no comprimento de onda de ressonância (λ_r) da LPG e $a = 4 \cdot \ln(2) / \Delta\lambda_{LPG}^2$, onde $\Delta\lambda_{LPG}$ é a largura de banda de meia potência da LPG. A Fig. 2 comprova que a banda de atenuação da LPG é bem ajustada a uma curva gaussiana, dentro da faixa de comprimento de onda de 1537 nm a 1573 nm, que corresponde a uma faixa igual a 36 nm.

Devido a não linearidades apresentadas pelo modulador FBG, deve ser considerada uma distorção adicional A_d sobre o comprimento de onda instantâneo da portadora óptica modulada $W(t)$, resultando na equação (2). Uma vez que não foram observadas distorções de ordem superior nos experimentos, foi considerada apenas uma distorção no segundo harmônico.

$$W(t) = \lambda_c + A_m \cdot \cos(\omega_0 t) + A_d \cdot \cos(2\omega_0 t) \quad (2)$$

onde $\omega_0 = 2\pi f$, f é a frequência de modulação do modulador FBG e t é o tempo. Conforme ilustrado na Fig. 2 e de acordo com a configuração experimental da Fig. 1, o comprimento de onda instantâneo da portadora óptica modulada em comprimento de onda $W(t)$ é transmitido através da banda de atenuação da LPG, resultando em um sinal óptico demodulado $P_{out}(t)$. Esse sinal óptico demodulado pode ser obtido substituindo-se $W(t)$ de (2) em λ de (3) [11,12], resultando em:

$$P_{out}(t) = P_0(1 - m \cdot e^{-a(A_m \cdot \cos(\omega_0 t) + A_d \cdot \cos(2\omega_0 t) - S)^2}), \quad (3)$$

onde $S = \lambda_r - \lambda_c$, que representa o deslocamento do comprimento de onda de ressonância da LPG λ_r em relação ao comprimento de onda central da FBG λ_c .

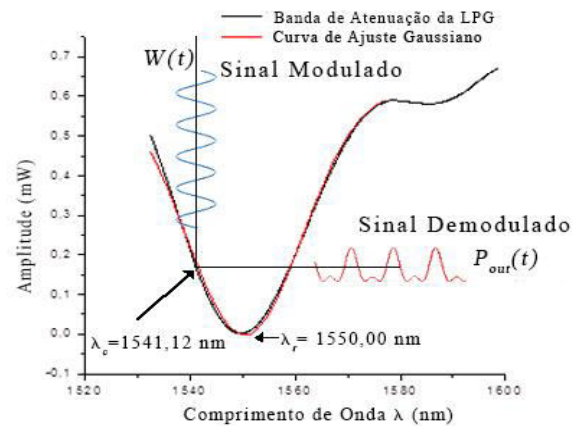


Fig. 2. Princípio fundamental da técnica proposta.

De acordo com a Fig. 1, o sinal óptico demodulado $P_{out}(t)$, é convertido pelo fotodetector em um sinal elétrico $V(t) \propto P_{out}(t)$. É importante notar, a partir da Fig. 2, que o sinal óptico demodulado $P_{out}(t)$ apresenta uma distorção harmônica devido à não linearidade da banda de atenuação da LPG, que é função da posição relativa entre λ_r e λ_c . Como $V(t) \propto P_{out}(t)$, então o sinal elétrico $V(t)$ também apresentará uma distorção harmônica.

A equação (4) mostra a expressão geral do sinal elétrico $V(t)$, em que DC é a componente contínua e H_n é a amplitude da n -ésima componente harmônica, em razão da não linearidade da banda de atenuação da LPG.

$$V(t) = DC + \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cos(n\omega_0 t) \quad (4)$$

Para obter a expressão matemática para a n -ésima harmônica em (4), é realizada uma expansão em série de Taylor em (1) para λ em torno de λ_c . Após a expansão, substitui-se λ por (2) e compara-se o resultado com (4), obtendo-se as equações para as amplitudes do primeiro e do segundo harmônico, mostradas em (5) e (6), respectivamente:

$$H_1 = \frac{1}{6} e^{-a \cdot S^2} \cdot 3a \cdot A_m \cdot \{-2A_d \cdot (-1 + 2a \cdot S^2) - [4 - 3a \cdot (2A_d^2 + A_m^2) + 2a^2 \cdot (2A_d^2 + A_m^2) \cdot S^2] \cdot S\} \cdot y_0 \cdot m \quad (5)$$

$$H_2 = \frac{1}{6} e^{-a \cdot S^2} \cdot 3a \cdot \{-A_m^2 \cdot (-1 + 2a \cdot S^2) - A_d \cdot [4 - 3a \cdot (A_d^2 + 2A_m^2) + 2a^2 \cdot (A_d^2 + 2A_m^2) \cdot S^2] \cdot S\} \cdot y_0 \cdot m \quad (6)$$

As equações (5) e (6) mostram que as amplitudes do primeiro e do segundo harmônico dependem de todos os parâmetros envolvidos, tais como a potência da fonte óptica e as perdas de inserção apresentadas no experimento P_0 , o parâmetro m relacionado com a profundidade de atenuação no comprimento de onda de ressonância, a amplitude de modulação A_m , a amplitude da distorção do modulador FBG A_d , o parâmetro a que está relacionado com a largura de banda espectral de meia potência da LPG $\Delta\lambda_{LPG}$ e o deslocamento S , que é função do comprimento de onda central do modulador FBG λ_c e do comprimento de onda de ressonância da LPG λ_r .

A razão entre as expressões (5) e (6) resulta na equação (7), em que $H = H_1/H_2$.

$$H = \frac{A_m \{-2A_d \cdot (-1 + 2a \cdot S^2) - [4 - 3a \cdot (2A_d^2 + A_m^2) + 2a^2 \cdot (2A_d^2 + A_m^2) \cdot S^2] \cdot S\}}{\{-A_m^2 \cdot (-1 + 2a \cdot S^2) - A_d \cdot [4 - 3a \cdot (A_d^2 + 2A_m^2) + 2a^2 \cdot (A_d^2 + 2A_m^2) \cdot S^2] \cdot S\}} \quad (7)$$

A equação (7) demonstra que a razão entre as amplitudes dos dois primeiros harmônicos consiste em uma expressão auto-referenciada, uma vez que ela independe de P_0 e m . Considerando constantes os parâmetros A_m , A_d e a , em (7), tem-se então que H é uma função apenas de S . Isso significa que o valor de S pode ser calculado a partir de H , via solução da equação (7).

IV. CALIBRAÇÃO DO SENSOR

A LPG foi sujeita a soluções com diferentes concentrações de etileno glicol em água destilada, cujos índices de refração foram medidos usando um refratômetro de Abbe. A Fig. 3 mostra a variação da banda de atenuação da LPG, e os respectivos valores de λ_r , para cada solução. Esses gráficos da Fig. 3 foram obtidos a partir do analisador de espectro óptico (OSA - *Optical Spectrum Analyzer*). Assim, chegou-se à Tabela I, que mostra o índice de refração da solução n e o respectivo comprimento de onda de ressonância da LPG λ_r . Na Tabela I, o valor de $S = \lambda_r - \lambda_c$, em que $\lambda_c = 1541,12$ nm é o comprimento de onda central do modulador FBG.

A equação (8) apresenta a expressão do índice de refração da solução n em função do comprimento de onda de ressonância da LPG λ_r , obtida a partir dos dados contidos na Tabela I.

$$n(\lambda_r) = A_0 + \sum_{k=1}^4 A_k e^{\frac{(\lambda_r - \lambda_k)}{t_k}} \quad (8)$$

onde $A_0 = 1,451$ e os parâmetros A_k , t_k e λ_k são mostrados na Tabela II. Assim, o valor do índice de refração é calculado ao substituir o valor de λ_r na equação (8), cujo valor é obtido a partir de S , obtido via solução de (7).

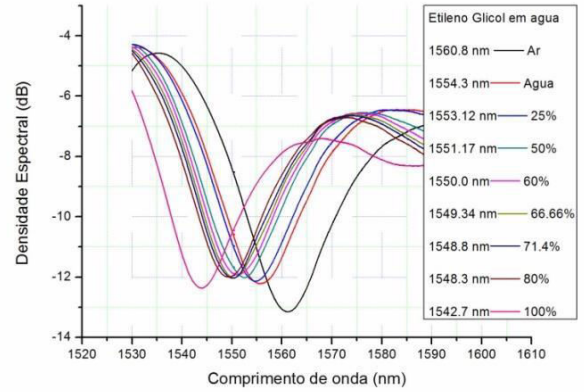


Fig. 3. LPG submersa em soluções com diferentes índices de refração.

TABELA I. MEDIDA DO ÍNDICE DE REFRACÇÃO E DO COMPRIMENTO DE ONDA DE RESSONÂNCIA DA LPG PARA DIFERENTES SOLUÇÕES.

Solução	Concentração de Etileno Glicol (%)	Índice de refração (n)	λ_r (nm)	$S = \lambda_r - \lambda_c$ (nm)
Ar	-	≈ 1	1560,8	19,68
Água Destilada	0	1,333	1554,3	13,18
Solução 1	25	1,359	1553,12	12
Solução 2	50	1,384	1551,17	10,05
Solução 3	60	1,394	1550	8,88
Solução 4	66,6	1,400	1549,34	8,22
Solução 5	71,4	1,405	1548,8	7,68
Solução 6	80	1,414	1548,3	7,17
Etileno Glicol	100	1,429	1542,7	1,58

TABELA II. PARÂMETROS PARA A EQUAÇÃO (8).

k	A_k	t_k	λ_k
1	0,0125	45,00	1543,54
2	0,0135	4,80	1547,00
3	0,0115	5,70	1554,35
4	0,0034	1,64	1555,00

V. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção, o modelo matemático proposto será validado. Para isto as amplitudes do primeiro e do segundo harmônicos devem ser obtidas experimentalmente, via FFT do sinal elétrico, executada no LabView. Após calcular a relação entre as amplitudes dos harmônicos, medidas experimentalmente, as soluções para S podem ser obtidas via equação (7). Com isso, considerando $\lambda_r = S + \lambda_c$, o índice de refração da substância pode ser obtido através da equação (8).

Os parâmetros espectrais da LPG foram caracterizados a partir da configuração experimental da Fig. 1, submergindo a LPG em diferentes soluções, como mostrado na Tabela I. O modulador FBG, mostrado na Fig. 1, consiste em uma FBG fixada entre duas cerâmicas de PZT paralelas (PI - Physik instrument, modelo P - 289,20). A largura de banda de meia potência da FBG ($\Delta\lambda_{FBG}$), utilizada em nosso experimento, foi de 0,25 nm. O sinal elétrico aplicado no modulador FBG, está na frequência de ressonância do dispositivo PZT P-289.20 utilizado, que é de 1800 Hz. As características do modulador FBG são mostradas na Tabela III. O fotodetector utilizado é um THORLABS PDA10CS. A conversão analógico-digital é realizada por meio de uma placa de aquisição, NI-National Instruments, USB-6210, e o processamento de sinal é feito pelo LabView.

TABELA III CARACTERÍSTICAS DO MODULADOR FBG

Frequência de Ressonância do PZT	1800 Hz
Largura de Banda de Meia Potência da FBG ($\Delta\lambda_{FBG}$)	0,25 nm
Comprimento de Onda Central do modulador FBG (λ_c)	1541,12 nm

Através de ajustes gaussianos da banda de atenuação da LPG, mostrados na Fig. 3, foi encontrado $a = 0,01 \text{ nm}^{-2}$. O comprimento de onda central da FBG $\lambda_c = 1541,12 \text{ nm}$ foi escolhido de modo a estar dentro da banda de atenuação da LPG em quaisquer condições experimentais.

Os parâmetros $A_m = 0,44 \text{ nm}$ e $A_d = 0,0519 \text{ nm}$ foram obtidos a partir de análises espectrais, no domínio óptico, do sinal na porta 3 do circulador, conforme ilustrado na Fig. 1. Este sinal corresponde à portadora óptica modulada em comprimento de onda $W(t)$ gerada pelo modulador FBG.

A. Simulações

Para simular as equações (5), (6) e (7), foram adotados os valores já mencionados de $A_m = 0,44 \text{ nm}$, $A_d = 0,0519 \text{ nm}$, $a = 0,01 \text{ nm}^{-2}$ e $\lambda_c = 1541,12 \text{ nm}$. Para λ_r será adotado, na simulação, o intervalo entre 1520 e 1565 nm, que contém todos os valores de λ_r da Tabela I. O resultado desta simulação é mostrado na Fig. 4. Observa-se um ponto de singularidade, em que H tende a infinito, em razão do valor de H_2 tender a zero em $\lambda_r \approx 1540,92 \text{ nm}$, conforme foi discutido na seção 3.8 da referência [12] em presença da distorção A_d .

Calculando $H = H_1/H_2$ a partir das amplitudes dos harmônicos obtidos e inserindo este valor na equação (7) encontram-se as soluções (ou raízes) S_1 e S_2 , mostradas na

Fig. 5. O comprimento de onda de ressonância λ_r , que é mostrado no eixo vertical à direita da Fig. 5, é obtido adicionando o valor de λ_c às raízes, uma vez que $S = \lambda_r - \lambda_c$. Outra característica que pode ser observada é a mudança de fase de π radianos que ocorre dependendo de que lado da banda de atenuação da LPG o sinal é demodulado. As raízes encontradas em (7) têm relação direta com a fase citada acima. Assim, temos as raízes S_1 para um lado da banda de atenuação da LPG e S_2 para o outro lado, conforme a Fig. 5. Observa-se na Fig. 5 que não há solução no ponto singular citado anteriormente.

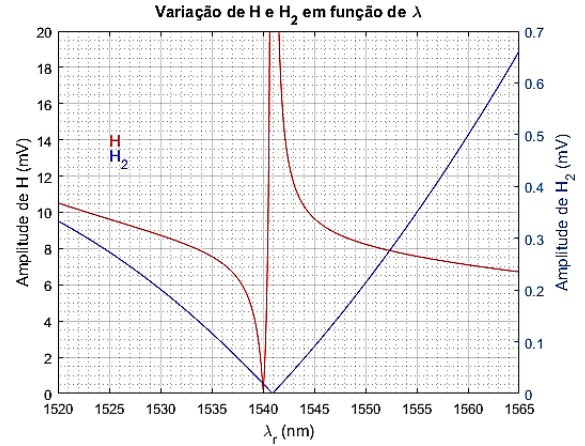


Fig. 4. Valores simulados para H_2 e H_1/H_2 .

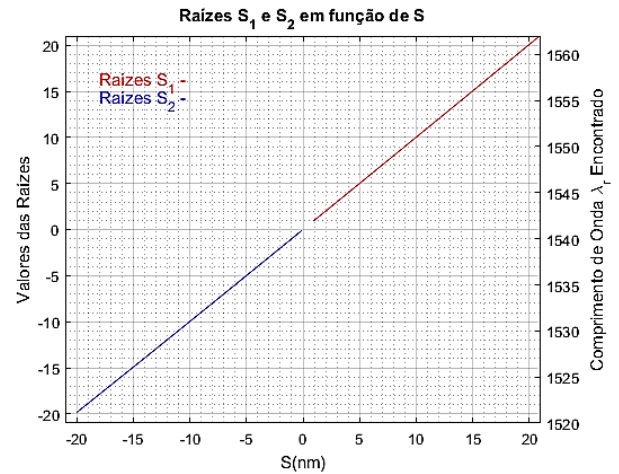


Fig. 5. Valores simulados das raízes da eq. (7) e λ_r em função de S .

B. Experimentos.

Na LPG escolhida para este experimento, os índices de refração utilizados fazem com que o λ_r seja sempre maior do que λ_c , ou seja, $S > 0$. A Tabela IV mostra a comparação entre os resultados experimentais e os valores calculados utilizando conjuntamente as equações (7) e (8). Note que os valores experimentais de λ_r , obtidos diretamente do OSA, diferem dos valores calculados pela equação (7) de no máximo 0,02%. Além disso, os valores dos índices de refração calculados através da equação (8) diferem dos valores obtidos diretamente do refratômetro de Abbe em no máximo 0,15%.

Adicionalmente, e como citado anteriormente, os índices de refração utilizados neste experimento exploraram somente as soluções da equação (7) em que $S > 0$. Ou seja, neste experimento foi explorada somente a metade da faixa da curva de ajuste gaussiana, resultando em uma faixa de operação de aproximadamente 18 nm (19,68 – 1,58).

Tabela IV. COMPARAÇÃO ENTRE VALORES EXPERIMENTAIS E VALORES CALCULADOS.

Valores Experimentais				Valores Calculados		
Solução	n	λ_r	S	Raiz de H	λ_r	n
Ar	1	1560,8	19,68	21,92	1562,04	≈ 1
Água	1,333	1554,3	13,18	13,31	1554,43	1,335
25%	1,359	1553,12	12	12,06	1553,18	1,357
50%	1,384	1551,17	10,05	9,89	1551,01	1,384
60%	1,394	1550,04	8,88	9,23	1550,35	1,395
66,66%	1,4	1549,34	8,22	8,23	1549,35	1,401
71,40%	1,405	1548,8	7,68	7,54	1548,66	1,405
80%	1,414	1548,3	7,17	7,13	1548,25	1,408
100%	1,429	1542,7	1,58	1,49	1542,61	1,430

VI. CONCLUSÕES.

Este trabalho demonstrou o aperfeiçoamento da técnica de interrogação apresentada em [10, 11 e 12] para sensores baseados LPG, usando o princípio de espectroscopia derivativa. O aperfeiçoamento aqui demonstrado permitiu que a solução matemática do problema independesse da potência óptica da fonte, tornando a técnica auto-referenciada. Foi demonstrado que o modelo matemático apresentado é mais simples e robusto quando comparado com o previamente publicado [9]. A razão disso é que as expressões matemáticas das amplitudes dos harmônicos são obtidas por funções simples, facilitando sua integração em sistemas eletrônicos embarcados. As amplitudes do primeiro e do segundo harmônico dependem das características não lineares da banda de atenuação da LPG, bem como das distorções introduzidas no segundo harmônico pelo modulador FBG. Apresentou-se neste trabalho uma aplicação para a técnica aqui desenvolvida em que o índice de refração de uma mistura de etileno glicol com água destilada foi medido. Um erro máximo de 0,15% foi observado quando comparados os valores dos índices de refração medidos diretamente com aqueles calculados com a técnica aqui apresentada. Por outro lado, o cálculo do comprimento de onda de ressonância da LPG usada como elemento sensor apresentou um erro inferior a 0,02% quando comparada com a medida direta a partir do OSA. O erro relativo de 0,02% na obtenção do comprimento de onda de ressonância pode ser atribuído, entre outros motivos, à modelagem da banda de absorção da LPG como uma curva gaussiana com características independentes em todo o deslocamento espectral. Por outro lado o erro relativo de 0,15%, observado no cálculo do índice de refração da mistura, pode ser atribuído à modelagem matemática feita para representar a equação do índice de refração em função do comprimento de onda de ressonância da LPG. Os experimentos comprovaram a eficácia da técnica dentro da

faixa de operação de 18 nm. Entretanto, caso fosse utilizada toda a faixa de ajuste gaussiano, a faixa de operação poderia ser superior a 36 nm. A limitação da técnica pela faixa de ajuste gaussiana já havia sido prevista em [12], mesmo com uma LPG diferente da utilizada neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o CNPq, processo nº 305307/2015-0 e 400577/2013-5, a FAPERJ, o INCT-INERGE, e ANEEL-ELETROSUL, pelo apoio parcial a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, J. E. Sipe and T. E. Ergodan, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters," *J. Lightwave Tech.* 14, 58 (1996).
- [2] V. Bhatia, "Properties and sensing applications of long-period gratings" *PhD Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1996.
- [3] K. R. Cooper, J. Elster, M. Jones, and R. G. Kelly, "Optical fiber-based corrosion sensor system for health monitoring of aging aircraft," *Proc. AUTOTESTCON*, pp. 847–856, Aug. 2001.
- [4] B. H. Lee and J. Nishii, "Temperature sensor using the self-interference of a long-period fiber grating," *Proc. SPIE*, vol. 3746, pp. 418–421, Sep. 1999.
- [5] J. A. Besley, T. Wang, and L. Reekie, "Fiber cladding mode sensitivity characterization for long-period gratings," *J. Lightwave Technol.*, vol. 21, pp. 848–853, Mar. 2003.
- [6] T. Allsop, A. Gillooly, V. Mezentsev, T. Earthgrowl-Gould, R. Neal, D.J. Webb, I. Bennion "Bending and Orientational Characteristics of Long Period Gratings Written in D-shaped Optical Fiber", Special Joint Issue - Journal of Lightwave Technology and IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, February 2004.
- [7] M.N. Ng, Z. Chen, Z and K.S. Chiang, "Temperature compensation of long-period fiber grating for refractive-index sensing with bending effect", *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(3), pp361–362(2002)
- [8] J. P. Carvalho, L. Coelho, O. Frazão, J. L. Santos "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.
- [9] T. Allsop, T. Earthrowl, R. Reeves, D. J. Webb, and I. Bennion, "The interrogation and multiplexing of long period grating curvature sensors using a Bragg grating based, derivative spectroscopy technique," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 15, pp. 44–48, Jan. 2004.
- [10] Carneiro, A. C.; Barbero, A. P. L.; Silva, V. N. H.; Ribero, R. M.; Bragantini, S.; Leal, C.; Esteves, F. "Técnica Auto-Referenciável de Interrogação de Grade de Bragg para Medição Simultânea de Temperatura e Vibrações". In: MOMAG 2014: 16º SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e 11º CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, 2014, Curitiba. Momag, p p. 348-353, Curitiba, 2014, 2014.
- [11] Xavier, P. S.; Carneiro, A.C.; Lopez-Barbero, A. P.; Silva, V.N.H.; Ribeiro, B. A.; Sydney B. Germano. "Técnica Auto-referenciável de Interrogação de LPG com Uso da Modulação e Análise dos Harmônicos." In: Encontro Anual do IECOM em Comunicações, Redes e Criptografia, 2015, Campina Grande. Anais do Encontro Anual do IECOM em Comunicações, Redes e Criptografia. Campina Grande: IECOM, 2015. v. 1. pp. 1-2.
- [12] Xavier, P. S. "Técnica Auto-referenciável de Interrogação de Sensores Ópticos Baseados em LPG Atravéz e Análise dos Harmônicos." Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Fluminense, pp. 75–179, Niteroi, 2015.
- [13] Kluczynski, P. "Wavelength modulation absorption spectrometry—an extensive scrutiny of the generation of signals" *Spectrochimica. Acta. B*, vol. 56, no.8, pp. 1277–1354, Department of Experimental Physics, Umea University, May 2001.