

TÉCNICA DE INTERROGAÇÃO DE SENSORES ÓPTICOS BASEADOS EM LPGS POR ANÁLISE HARMÔNICA

C. N. Rodrigues¹, A. C. Carneiro², V. A. Oliveira², V. N. H. Silva², A. P. López-Barbero².

Resumo—Este artigo apresenta uma técnica de interrogação de sensores à fibra óptica baseados em redes de período longo (LPG). A técnica utiliza um modelo matemático no qual as equações das componentes harmônicas do sinal elétrico consideram a variação na largura do espectro de absorção da LPG ao interrogar diferentes substâncias. A validação da técnica foi comprovada por resultados experimentais das medidas do índice de refração das substâncias testadas, quando considerado a variação na largura espectral de absorção.

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

Abstract—This paper presents the development of the interrogation technique for fiber optic sensors based on Long Period Gratings (LPG). The technique is based on a simple and robust mathematical model in which the equations of the harmonic components of the electrical signal consider the variation in the width of the absorption spectrum of the LPG when interrogating different substances. The validation of the technique is based on experimental results on the measurements of the refractive index, when considering this variation in spectral absorption width.

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

I. INTRODUÇÃO

Em 1996, VENGSARKAR *et al.* demonstraram o uso de estruturas denominadas redes de período longo (LPG - Long Period Gratings) [1] que são dispositivos ópticos passivos que se comportam como filtros de rejeição de banda e que partilham as características intrínsecas das fibras ópticas, como imunidade a interferências eletromagnéticas, baixas perdas de inserção e alta sensibilidade [2]. Essa descoberta despertou o interesse da comunidade científica na sua utilização como sensores ópticos, devido as suas características físicas como baixo peso, pequenas dimensões e elevada resistência à corrosão [3]. Desde então, vários estudos têm sido publicados direcionando a utilização de LPGs como sensores de temperatura [4], tração [5], curvatura [6] e índice de refração [7].

Para a interrogação em sensores ópticos baseados em LPGs é necessário um analisador de espectro óptico (OSA - Optical Spectrum Analyser) para verificar as mudanças no espectro de absorção da LPG quando submetida a parâmetros externos. Em razão do elevado custo de um OSA, seu uso como principal meio para a verificação das mudanças no espectro de absorção da LPG é impeditivo do ponto de vista financeiro, o que dificulta o uso de sistemas

baseados em LPG como elemento sensor. Portanto, o desenvolvimento de técnicas de interrogação capazes de relacionar as alterações na banda de absorção com a grandeza mensurada é um grande desafio.

Diversas técnicas de interrogação de LPG baseados em análise espectral [8-12] se destacam dentre as mais promissoras. O princípio da espectroscopia derivativa para a interrogação de uma LPG sujeita a curvaturas foi utilizada por ALLSOP *et al.* em [9]. Nesse caso, o comprimento da curvatura é calculado a partir da razão entre a amplitude do primeiro e do segundo harmônicos do sinal elétrico na saída do sistema. Entretanto, no modelo matemático proposto por ALLSOP *et al.*, as equações das amplitudes não consideram todos os parâmetros do espectro de absorção da LPG separadamente. CARNEIRO *et al.* em [10] e XAVIER *et al.* em [11,12] apresentaram uma técnica baseada num novo modelo matemático que considera todos os parâmetros espectrais do espectro de absorção da LPG nas equações das amplitudes dos dois primeiros harmônicos, sem dar à técnica uma aplicação específica. Em 2017, OLIVEIRA em [13] aprimorou a técnica apresentada em [10-12], na qual a interrogação era feita sem o conhecimento prévio da potência da fonte óptica, tornando assim a técnica auto-referenciável. Esse estudo apresentou uma aplicação para a técnica que determina o índice de refração da substância, na qual o sensor LPG estava submerso. No modelo matemático utilizado em [10-13], a largura do espectro de absorção da LPG (*FWHM* - Full Width at Half Maximum) foi considerada constante. Entretanto, verificou-se que a *FWHM* varia em função do índice de refração da substância. Dessa forma, o fato de o modelo apresentado em [10-13] não considerar a variação da *FWHM*, resulta em um aumento do erro no valor do índice de refração obtido.

Outro importante avanço em relação aos estudos apresentados em [10-13] é o uso de um filtro sintonizável, baseado em interferômetro de Fabry-Pérot, como modulador de comprimento de onda. A introdução deste componente possibilitou o uso valores de amplitude de modulação de comprimento de onda maiores do que aqueles que haviam sido praticados nos estudos anteriores. Isso permitiu explorar e apontar novos caminhos para o modelo matemático desenvolvido.

O presente artigo descreve uma evolução do modelo matemático publicado nos estudos [10-13]. Para considerar a dinâmica da *FWHM* da LPG quando sujeita a diferentes substâncias, o presente modelo matemático inclui a dependência da *FWHM* com o comprimento de onda de ressonância. Dessa forma, foi obtido o aumento da faixa dinâmica na interrogação do sensor.

II. CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Na Figura 1 é apresentada a configuração experimental necessária para a demonstração do modelo matemático de

¹Cesar N. Rodrigues, Universidade Federal Fluminense (UFF), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações (PPGET). e-mail: cn.cesar@gmail.com

²Alexander C. Carneiro, Vicente A. Oliveira, Vinicius N. H. Silva e Andrés Pablo L. Barbero, PPGIO - Programa de Pós-Graduação em Instrumentação e Ótica Aplicada - CEFET/RJ & UFF.

interrogação proposto. Uma fonte de ASE (*Emissão Espontânea Amplificada*) é responsável por gerar um sinal óptico em banda larga, entre 1530 nm a 1610 nm, que ilumina um modulador de comprimento de onda, baseado em um interferômetro de *Fabry-Pérot*. A sintonia do filtro no comprimento de onda central (λ_c) e a sua modulação são feitas por meio de uma fonte de tensão DC e de um gerador de sinais, respectivamente. A amplitude de modulação em comprimento de onda (A_m) é feita por meio da tensão de saída do gerador de sinais. Assim, o sinal óptico proveniente na saída do modulador de comprimento de onda é uma portadora óptica, com comprimento de onda instantâneo centrado em λ_c , com amplitude de modulação A_m e intensidade óptica constante. Essa portadora óptica é então inserida na *LPG*.

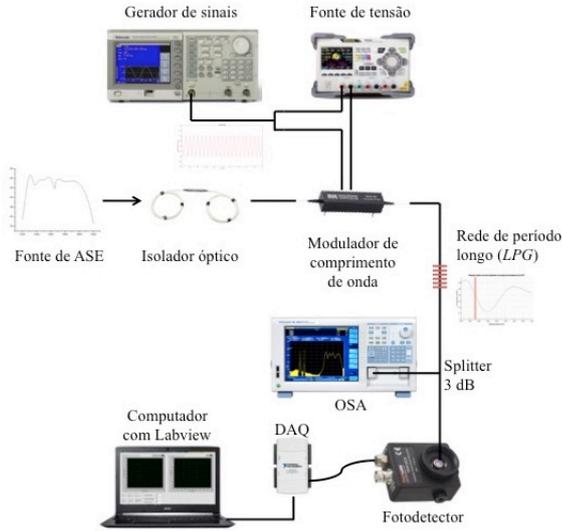


Fig. 1 Configuração experimental

A *LPG* possui um espectro de absorção que se comporta como um filtro rejeita-banda [2], sintonizado num comprimento de onda de ressonância λ_r e com largura espectral de meia potência $\Delta\lambda_{LPG}$. Após a portadora óptica passar pela *LPG*, o espectro de absorção atua como um demodulador de comprimento de onda, gerando um outro sinal óptico modulado em amplitude.

Na saída da *LPG*, um fotodetector é responsável por converter o sinal do domínio óptico para o domínio elétrico. Na saída do fotodetector, as amplitudes e fases das componentes harmônicas podem ser medidas por análise espectral a partir de uma *FFT* (*Fast Fourier Transform*) executada em ambiente *LabView*.

A técnica de interrogação aqui proposta baseia-se na comparação das amplitudes das componentes harmônicas medidas com as calculadas, por meio de equações geradas pelo modelo matemático que será visto na Seção III, o que possibilita calcular o comprimento de onda de ressonância da *LPG* e, então, relacioná-lo com índice de refração da substância à qual o sensor está submerso.

III. MODELO MATEMÁTICO

Para a obtenção das equações do modelo matemático deste artigo é preciso ajustar o espectro de absorção da *LPG* por meio de uma função gaussiana [13], conforme Eq. 1:

$$y(\lambda) = y_0(1 - m \cdot e^{-a(\lambda - \lambda_r)^2}), \quad (1)$$

na qual $y(\lambda)$ representa o espectro de absorção da *LPG* em função do comprimento de onda λ , y_0 é a potência da fonte óptica e perdas dos dispositivos, m é a atenuação do espectro de absorção que ocorre no comprimento de onda de ressonância (λ_r) da *LPG*, sendo o parâmetro a definido em função da largura do espectro de absorção da *LPG* dado pela Eq. 2:

$$a = \frac{4 \cdot \ln(2)}{\Delta\lambda_{LPG}^2} \quad (2)$$

na qual $\Delta\lambda_{LPG}$ é a largura do espectro de absorção da *LPG*.

Temperatura, tração e índice de refração são fenômenos externos capazes de alterar a condição de casamento de fase de uma *LPG*. Assim, λ_r , m e $\Delta\lambda_{LPG}$ mudam de forma direta com estes fenômenos. Assim, um polinômio é ajustado de forma que o parâmetro a seja função de λ_r , conforme Eq. 3:

$$a(\lambda_r) = A + B\lambda_r + C\lambda_r^2 + D\lambda_r^3, \quad (3)$$

onde A , B , C e D são as constantes do ajuste polinomial.

Devido às não linearidades no modulador de comprimento de onda, uma distorção no segundo harmônico, A_d , deve ser considerada. Em razão da técnica utilizar duas componentes espectrais para a interrogação, as distorções de ordens superiores não foram consideradas. Desta forma, a Eq. 4 representa o comprimento de onda instantâneo da portadora óptica $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lambda_c + A_m \cdot \text{Cos}(\omega t) \pm A_d \cdot \text{Cos}(2\omega t), \quad (4)$$

na qual λ_c é o comprimento de onda central da portadora óptica, A_m é a amplitude de modulação do comprimento de onda; $\omega = 2\pi f$, f é a frequência de modulação do sinal elétrico do gerador de sinais e t é o tempo.

Como apresentado na Figura 2, a interação entre λ_c e o espectro de absorção da *LPG* resulta em um sinal modulado em amplitude, rico em componentes harmônicas, que é detectado pelo fotodetector, doravante denominado sinal elétrico $V(t)$. O sinal elétrico é obtido matematicamente substituindo-se $a(\lambda_r)$ da Eq. 3 e $\lambda(t)$ da Eq. 4 em a e λ da Eq. 1 [11,12], respectivamente, resultando na Eq. 5:

$$V(t) = V_0(1 - m e^{-a(\lambda_r)(\lambda(t) - \lambda_r)^2}), \quad (5)$$

onde, V_0 representa a tensão elétrica convertida da potência óptica y_0 .

As equações das amplitudes das componentes harmônicas que compõem $V(t)$, são obtidas através da expansão em Série de Taylor de 6º ordem no termo exponencial da Eq. 5, para λ em torno de λ_c . Após a expansão, substitui-se λ pela Eq. 4 e realiza-se a expansão dos termos trigonométricos, originando assim a Eq. 6 que representa a expressão geral do sinal elétrico na saída do fotodetector $\tilde{V}(t)$.

$$V(t) \cong \tilde{V}(t) = DC + \sum_{n=1}^{\infty} H_n \cdot \text{Cos}[n\omega t] \quad (6)$$

na qual DC é a componente contínua e H_n é a n ésima componente harmônica.

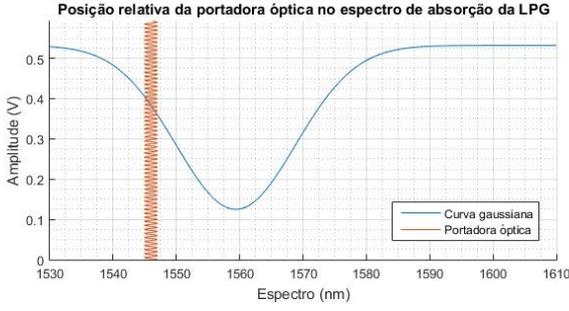


Fig. 2 Comprimento de onda instantâneo da portadora óptica e espectro de absorção da LPG.

A Figura 2 mostra que $\lambda(t)$ é demodulada em amplitude pela região não linear do espectro de absorção. Em razão do λ_c ser conhecido e o λ_r do espectro de absorção variar de acordo com o índice de refração, pode-se definir um parâmetro S que represente a posição relativa entre λ_c e λ_r , dado pela Eq. 7:

$$S = \lambda_c - \lambda_r \quad (7)$$

Nas Eq. 9 e Eq. 10, as componentes do primeiro e segundo harmônicos, respectivamente, serão função dos parâmetros S e a . Dessa forma, o parâmetro a , definido, pela Eq. 3, é escrito em função de S . Assim, a Eq. 3, pode ser reescrita nos termos da Eq. 7, resultando na Eq. 8:

$$a_s = a(s) = A + B(\lambda_c - S) + C(\lambda_c - S)^2 + D(\lambda_c - S)^3 \quad (8)$$

Tendo em vista o desenvolvimento apontado para a obtenção da Eq. 8, as equações para as amplitudes dos primeiro e segundo harmônicos elétricos, H_1 e H_2 , são determinadas nas Eq. 9 e Eq. 10, respectivamente.

$$H_1 = (-V_0 \cdot m) a_s e^{-a_s S^2} \left(\frac{1}{96} A_m (-12 a_s^2 S (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_d^4 + 2 a_s^2 (-15 + 90 a_s S^2 - 60 a_s^2 S^4 + 8 a_s^3 S^6) A_d^5 - 4 a_s S A_d^2 (-72 + a_s (48 S^2 + 7 (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_m^2)) + 8 a_s A_d^3 (9 + a_s (12 S^2 (-3 + a_s S^2) + (-15 + 2 a_s S^2 (45 + 2 a_s S^2 (-15 + 2 a_s S^2))) A_m^2)) + A_d (-96 + a_s (192 S^2 + 32 (3 + 4 a_s S^2 (-3 + a_s S^2)) A_m^2 + 3 a_s (-15 + 2 a_s S^2 (45 + 2 a_s S^2 (-15 + 2 a_s S^2))) A_m^4) - 4 S (48 + a_s A_m^2 (-36 + a_s (24 S^2 + (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_m^2)))) \right) \quad (9)$$

$$H_1 = (-V_0 \cdot m) a_s e^{-a_s S^2} \cdot k_1$$

$$H_2 = (-V_0 \cdot m) a_s e^{-a_s S^2} \left(\frac{1}{192} (-8 S A_d (48 + a_s A_d^2 (-36 + a_s (24 S^2 + (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_d^2))) + 2 (-48 + a_s (96 S^2 - 96 S (-3 + 2 a_s S^2)) A_d + 36 (3 + 4 a_s S^2 (-3 + a_s S^2)) A_d^2 - 24 a_s S (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_d^3 + 5 a_s (-15 + 2 a_s S^2 (45 + 2 a_s S^2 (-15 + 2 a_s S^2))) A_d^4) A_m^2 + 4 a_s (12 + a_s (16 S^2 (-3 + a_s S^2) - 7 S (15 + 4 a_s S^2 (-5 + a_s S^2)) A_d + 3 (-15 + 2 a_s S^2 (45 + 2 a_s S^2 (-15 + 2 a_s S^2))) A_d^2) A_m^4 + a_s^2 (-15 + 90 a_s S^2 - 60 a_s^2 S^4 + 8 a_s^3 S^6) A_m^6) \right) \quad (10)$$

$$H_2 = (-V_0 \cdot m) e^{-a_s S^2} \cdot k_2$$

A razão entre a Eq. 9 e Eq. 10 resulta na Eq. 11,

$$H = \frac{H_1}{H_2} = \frac{(-V_0 \cdot m) a_s e^{-a_s S^2} \cdot k_1}{(-V_0 \cdot m) a_s e^{-a_s S^2} \cdot k_2} = \frac{k_1}{k_2} \quad (11)$$

A Eq. 11 mostra que a razão entre as amplitudes dos dois primeiros harmônicos independe de V_0 , o que a torna auto-referenciada. Além disso, os parâmetros A_m , A_d , λ_c e as constantes A , B , C e D do ajuste polinomial da Eq. 3 são conhecidos e constantes. Logo, H é função somente de S . Assim, medindo as componentes harmônicas H_1 e H_2 , calculando sua relação e comparando este valor com a Eq. 11, obtém-se o valor de S e, conseqüentemente o valor de λ_r , que é o principal parâmetro de mérito na interrogação do sensor. O índice de refração (n) da substância, na qual a *LPG* está submersa, pode ser obtido por meio de uma equação de recorrência que relacione o índice de refração com o comprimento de onda de ressonância da *LPG*.

IV. CALIBRAÇÃO DO SENSOR

Nesta seção, as constantes do parâmetro a/a_s , da Eq. 3 e da Eq. 8, e a equação de recorrência que relaciona n com λ_r serão definidas. Para isso, foi feito um experimento em que a *LPG* foi submersa em dez substâncias de forma a variar o n externo e assim alterar o espectro de absorção em função do índice de refração das substâncias. A Figura 3 apresenta as curvas gaussianas que representam os espectros de absorção da *LPG* para cada uma das substâncias. Essas curvas foram obtidas através da caracterização do espectro de absorção, para cada uma das soluções, com o auxílio de um *OSA* (*Optical Spectrum Analyzer*) e os ajustes gaussianos feitos com o auxílio do software *Origin*.

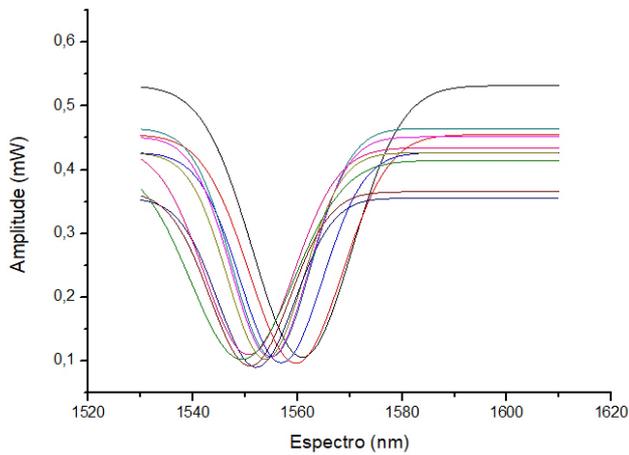


Fig. 3 Curvas gaussianas do espectro de absorção da LPG submersa em soluções com diferentes índices de refração

A Tabela I, mostrada abaixo, apresenta o índice de refração (n), λ_r e $\Delta\lambda_{LPG}$.

Tabela I Medidas obtidas através da caracterização das curvas do espectro de absorção

	Índice de refração	λ_r nm	$\Delta\lambda_{LPG}$
Solução 1	1,333	1559,39	22,31
Solução 2	1,359	1557,95	20,84
Solução 3	1,384	1555,25	18,54
Solução 4	1,4	1553,31	17,66
Solução 5	1,405	1552,80	17,38
Solução 6	1,414	1552,43	17,05
Solução 7	1,418	1550,45	17,31
Solução 8	1,424	1548,53	18,00
Solução 9	1,429	1547,89	20,14
Solução 10	1,43	1546,61	23,09

Tendo em vista a Eq.2 e os valores de λ_r e de $\Delta\lambda_{LPG}$ conforme a Tabela I, foi feito o ajuste do polinômio da Eq. 3 para o parâmetro a/a_s , obtendo:

$$\begin{aligned} A &= -36522,69 \\ B &= 70,41 \\ C &= -0,045 \\ D &= 9,69 \cdot 10^{-6}, \end{aligned}$$

Também foi necessário encontrar uma equação que relacione n com λ_r . A partir dos dados da Tabela I, obteve-se a Eq. 12.

$$n(\lambda_r) = N_1 + N_2\lambda_r + N_3\lambda_r^2 + N_4\lambda_r^3, \quad (12)$$

na qual as constantes N_1 , N_2 , N_3 e N_4 são dadas por:

$$\begin{aligned} N_1 &= 67215,59 \\ N_2 &= -130,68 \\ N_3 &= 8,469 \cdot 10^{-2} \\ N_4 &= -1,83 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Assim, o procedimento experimental para medir o índice de refração de uma substância desconhecida é obter o valor de λ_r a partir da solução das Eq. 11 e Eq. 7, e usar este valor na Eq. 12.

V. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

O modulador de comprimento de onda da configuração experimental foi excitado com os seguintes parâmetros: $\lambda_c = 1546$ nm, $A_m = 1,026$ nm e $f = 100$ Hz.

Nos estudos [10-13], o parâmetro a foi obtido por meio da média das larguras do espectro de absorção da LPG ($\Delta\lambda_{LPG}$) e utilizado como parâmetro fixo no modelo matemático. Neste estudo, e de forma a melhorar a faixa dinâmica do modelo matemático, a $\Delta\lambda_{LPG}$ foi considerada variável em função do λ_r da substância conforme Eq. 3.

Assim, para comparar o modelo matemático apresentado neste trabalho com aquele mostrado em [10-13], as medidas experimentais de H_1/H_2 foram realizadas utilizando as substâncias da Tabela I e mostradas na Figura 4 nos pontos marcados por asteriscos. Na Figura 4, a curva vermelha mostra os resultados teóricos quando calculados usando a $\Delta\lambda_{LPG}$ médio como feito nos estudos [10-13] e na curva azul mostra os resultados teóricos quando calculados usando a $\Delta\lambda_{LPG}$ por ajuste polinomial da Eq. 8. Assim, é possível notar na Figura 4 que as medidas experimentais concordam mais fielmente com os resultados teóricos apresentados neste trabalho, ou seja, com a curva azul, mostrando a validade da extensão do modelo matemático proposto.

Nos cálculos teóricos das curvas mostradas na Fig.4 o valor do parâmetro A_d foi estimado usando uma das medidas experimentais de H_1/H_2 e obteve-se $A_d = -1,6416 \cdot 10^{-3}$ nm.

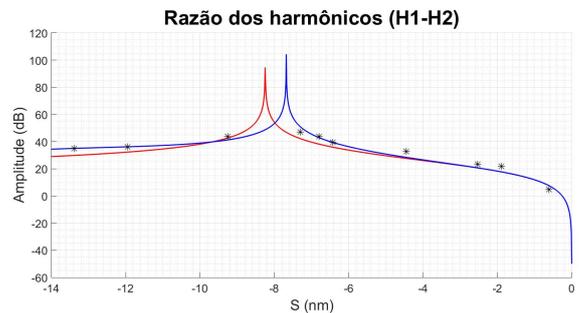


Fig. 4 Razão dos harmônicos experimentais e dos harmônicos teóricos.

A Tabela II apresenta a amplitude experimental dos primeiro e segundo harmônicos, a relação entre eles e em função das substâncias utilizadas

Tabela II Amplitudes experimentais dos harmônicos em dBV

	S	H ₁	H ₂	H ₁ -H ₂
Solução 1	-13,39	-21,72	-56,54	34,82
Solução 2	-11,95	-21,82	-57,90	36,08
Solução 3	-9,25	-18,46	-62,24	43,78
Solução 4	-7,31	-19,20	-66,14	46,94
Solução 5	-6,80	-19,40	-63,26	43,86
Solução 6	-6,43	-20,20	-59,60	39,39
Solução 7	-4,45	-23,70	-56,46	32,76
Solução 8	-2,53	-28,65	-51,83	23,18
Solução 9	-1,89	-30,69	-52,37	21,67
Solução 10	-0,61	-46,30	-50,96	4,65

A. Testes de validação

Para validar experimentalmente o modelo matemático, as amplitudes das componentes harmônicas $V(t)$ devem ser obtidas experimentalmente, conforme Tabela II. Estas amplitudes são comparadas com o modelo matemático apresentado na Eq. 11. Assim, a solução de S da Eq.11 permite calcular o λ_r conhecendo o (λ_c) , na Eq. 7. Adicionalmente, ao substituir o λ_r , proveniente da raiz de S , na Eq. 12, o índice de refração é calculado.

Para validar a interrogação através da Eq. 11 e obter o valor de S , foram adotados os valores já citados $\lambda_c = 1546$ nm, $A_m = 1,026$ nm, $A_d = -1,6416 \cdot 10^{-3}$ nm e as constantes polinomiais A , B , C e D dados na Seção IV. A

Tabela III, mostra os valores de S e λ_r calculados a partir do modelo matemático apresentado na Eq. 11 e Eq. 7, respectivamente.

Tabela III Resultados de S e λ_c conforme modelo matemático proposto.

	Largura espectral média			Largura espectral por ajuste polinomial	
	S_{Exp}	$S_{Calc.}$	$\lambda_r = \lambda_c - S$	$S_{Calc.}$	$\lambda_r = \lambda_c - S$
Solução 1	-13,39	-10,91	1556,91	-13,60	1559,60
Solução 2	-11,95	-10,52	1556,52	-12,07	1558,07
Solução 3	-9,25	-9,12	1555,12	-8,77	1554,77
Solução 4	-7,31	-7,69	1553,69	-7,10	1553,10
Solução 5	-6,80	-7,46	1553,46	-6,88	1552,88
Solução 6	-6,43	-6,98	1552,98	-6,43	1552,43
Solução 7	-4,45	-5,79	1551,79	-5,40	1551,40
Solução 8	-2,53	-3,19	1549,19	-3,15	1549,15
Solução 9	-1,89	-2,79	1548,79	-2,77	1548,77
Sol. 10	-0,61	-0,44	1546,44	-0,44	1546,44

A Tabela IV, apresenta o cálculo do índice de refração, a partir da introdução do λ_r na Eq. 12, e o erro percentual entre o índice de refração real e o calculado.

Tabela IV Cálculo do índice de refração da substância em função dos λ_r obtidos na tabela anterior.

	Largura espectral média			Largura espectral polinomial	
	n_{Exp}	$n_{Calc.}$	Erro (%)	$n_{Calc.}$	Erro (%)
Solução 1	1,333	1,369	2,69%	1,331	0,14%
Solução 2	1,359	1,373	1,06%	1,354	0,37%
Solução 3	1,384	1,388	0,27%	1,391	0,51%
Solução 4	1,4	1,400	0,01%	1,404	0,29%
Solução 5	1,405	1,402	0,25%	1,406	0,04%
Solução 6	1,414	1,405	0,64%	1,408	0,39%
Solução 7	1,418	1,412	0,41%	1,414	0,26%
Solução 8	1,424	1,424	0,03%	1,424	0,02%
Solução 9	1,429	1,425	0,29%	1,425	0,29%
Sol. 10	1,43	1,431	0,05%	1,431	0,05%

Assim, a Tabela IV valida o modelo matemático em que as amplitudes das componentes harmônicas são calculadas, considerando a variação na largura do espectro de absorção da *LPG*. Uma melhor precisão nos cálculos do índice de refração é obtida ao utilizar a variação na largura espectral de absorção da *LPG*, quando comparada ao modelo matemático em que a variação dessa largura espectral não é considerada.

VI. CONCLUSÕES.

Este estudo demonstrou o aperfeiçoamento da técnica de interrogação apresentada em [10-13] para sensores baseados em *LPG*, usando o princípio de espectroscopia derivativa. A evolução no estudo de [10-13] aqui demonstrada, resultou em melhorias que acarretam maior precisão na interrogação do comprimento de onda de ressonância, e consequentemente, no índice de refração da substância que a *LPG* está submersa. O modelo matemático apresentado é mais simples quando comparado com o previamente publicado em [9]. A razão disso é que as expressões matemáticas das amplitudes dos harmônicos são obtidas por funções matemáticas que não fazem uso de cálculos complexos como integrais e derivadas, facilitando sua implementação em sistemas eletrônicos embarcados. As

amplitudes do primeiro e do segundo harmônicos dependem das características não lineares do espectro de absorção da *LPG*, bem como das distorções introduzidas no segundo harmônico pelo modulador de comprimento de onda. Foi constatado uma melhoria na interrogação do índice de refração quando considerado a variação na largura do espectro de absorção da *LPG*. Um erro máximo de 0,51% foi observado quando consideramos a variação na largura do espectro de absorção enquanto um erro máximo de 2,69% é observado quando não consideramos esta variação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ/INCT/INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), Processo 305307/2015-0 pelo apoio financeiro parcial a este trabalho, à CAPES/DS pelas bolsas concedidas aos alunos de pós-graduação dos programas PPGIO e PPGET e ao apoio institucional da UFF e do CEFET-RJ.

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. Fração, 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.; Ribeiro, 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. 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 Através e Análise dos Harmônicos." *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal Fluminense, pp. 75–179, Niteroi, 2015.
- [13] V. A. Oliveira, A. C. Cascardo, A. P. L. Barbero, V. H. N. Silva, R. M. Ribeiro. "Técnica de Interrogação Auto-Referenciável por Análise Espectral", *Anais do SBRT* 2017.