

# Monitoramento de nós de pontes estruturadas com treliças planas por sensores ópticos

Guilherme Ébias\*, Júlia Bittencourt<sup>†</sup>, Felipe Barino<sup>‡</sup>, A. Bessa dos Santos<sup>§</sup>

Departamento de Circuitos, Universidade Federal de Juiz de Fora

\*guilherme.ebias@engenharia.ufjf.br, <sup>†</sup>julia.bittencourt@engenharia.ufjf.br,

<sup>‡</sup>felipe.barino@engenharia.ufjf.br, <sup>§</sup>alexandre.bessa@engenharia.ufjf.br

**Resumo**—Neste trabalho apresenta-se o uso de um sensor LPFG como alternativa para monitoramento e previsão de possíveis anormalidades em nós de suporte de pontes estruturadas com treliças planas, através do efeito da birrefringência induzida na fibra provocada por uma carga lateral, pela análise de sua intensidade e ângulo de aplicação.

**Palavras-chave**—sensores ópticos, redes de período longo, treliças, pontes, forças bidirecionais, birrefringência

## I. INTRODUÇÃO

Com o crescente aumento da estatística de desastres naturais e seus consequentes impactos na edificação humana, como o recente caso do rompimento da barragem de Brumadinho, buscam-se maneiras de averiguar e deliberar com maior precisão a resistência que tais composições oferecem a determinadas cargas [1].

Normalmente, a situação costuma ser tratada com o uso de Strain Gages [2], sensor que quando fixado a superfície do corpo de interesse, sofre a mesma deformação que ele, alterando sua resistência. Entretanto, os mesmos são muito instáveis, com uma faixa limitante de temperatura de operação, além de apresentarem baixa sensibilidade.

Dessa forma, o monitoramento do exposto por sensores de fibra óptica se apresenta como uma alternativa atraente [3], uma vez que essas fibras fornecem, dentre outras vantagens, pequeno tamanho e peso, imunidade a interferência elétrica, uma melhor capacidade de informação a maiores distâncias, resistência a corrosão, fadiga estática e são inoxidáveis [4]. As chamadas Redes de Período Longo em Fibra (LPFGs ou somente LPGs) e as Redes de Bragg (FBG), são redes de difração escritas dentro da própria fibra por meio da modulação periódica de seu índice de refração. As LPFGs são estruturas mais simples e de fabricação mais fácil, podendo ser feitas até mesmo manualmente por técnicas de ponto a ponto, que realizam as modulações de índice por meio de arco elétrico [5] gerado por uma máquina de fusão. Seu uso como sensor ocorre pois o comprimento de onda central da banda de rejeição do m-ésimo modo de propagação (fato este que permite considerá-la um filtro rejeita-faixa), denotado por  $\lambda_{res}^m$ , é função de parâmetros que podem variar com o ambiente, como o índice de refração do núcleo  $n_{eff,co}$ , da casca  $n_{eff,cl}$  e o período  $\Lambda$  da LPG [6] [7]:

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

Baseado nisso, este trabalho propõe um sensoriamento por fibra óptica através de sensores de Redes de Período Longo em nós de suporte de pontes estruturadas com treliças planas, a fim de verificar se este nó suportaria uma força específica em uma direção estipulada e manter uma medição contínua para monitorar possíveis acontecimentos atípicos. Evento este que é validado pelo efeito da birrefringência induzida pela força bidirecional aplicada no sensor LPFG [8].

Entretanto, sabe-se que LPGs são sensíveis também a variações de temperatura além da deformação, o que leva o sensor a apresentar uma sensibilidade cruzada, prejudicial a interpretação dos resultados. Porém, na literatura já existem propostas eficientes para solucionar este problema [9]. Dessa forma, um modelo fácil para resolução dessa questão é a utilização de 2 fibras em série, fazendo com que a primeira fibra seja sensível à temperatura com o mesmo coeficiente de sensibilidade da segunda, porém não sensível a deformação. Já a segunda fibra será sensível à temperatura e deformação, o objeto de análise. Logo, analisando a resposta obtida por cada fibra, é possível excluir o efeito térmico e considerar somente as variações de deformações, que é o interesse do exposto. [10].

Este conjunto é formado por treliças planas isostáticas com o design denominado Pratt [11]. O nó de base da ponte sofrerá com o efeito de uma força de intensidade  $F$  e ângulo  $\theta$ , força essa que pode ser oriunda de algum elemento que passe pelo vão abaixo da ponte ou outro item que esteja atravessando a própria estrutura. Esta carga, ao incidir no nó da treliça, também será transmitida ao sensor LPG, causando uma deformação na fibra com correlação a intensidade  $F$  e ângulo  $\theta$ . A partir desta deformação, é possível avaliar e medir a tensão gerada (Ver Figura 1).

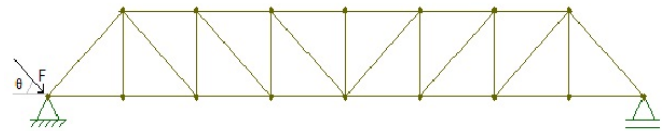


Figura 1: Carga aplicada sobre o nó da estrutura

Para estudar este conjunto, foram realizadas simulações de aplicações de forças e ângulos diversos. Com o primeiro fator variando de 0 a 1kg e o segundo de 0 a 360°, ambos com

13 valores escolhidos, totalizando um banco de dados de 156 situações distintas. As intensidades das forças utilizadas para simulação foram normalizadas para facilitar os cálculos, o entendimento da aplicabilidade e para se adaptar às condições ofertadas para desenvolvimento no LITel.

O trabalho foi simulado conforme a configuração experimental representada na Figura 2 para testar a LPG em diferentes cenários de carga transversal, variando sua intensidade e ângulo de aplicação. De uma maneira geral, a Fonte de Luz de Banda Larga (BBS), com comprimento de onda central próximo de 1550 nm, é usada junto com o Analisador de Espectro Óptico (OSA) para adquirir e visualizar os espectros durante estes testes. Neste modelo, a luz da fonte é polarizada usando um polarizador de fibra e o estado de polarização pode ser ajustado pelo controlador de polarização. Ainda, o sensor LPG é colocado com ambas as extremidades fixadas em 2 rotadores de fibra entre o PC e o OSA, que garantem a variação angular da carga aplicada ao sensor.

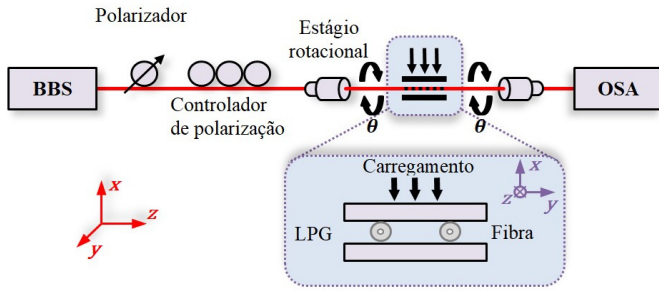


Figura 2: Configuração experimental de uma carga transversal no sensor

## II. METODOLOGIA

### A. Modelo do sensor

A aplicação de uma carga transversal em uma LPFG leva ao aumento da birrefringência na mesma, gerando uma separação de cada modo propagante em dois, cada qual relacionado a um eixo de polarização, aqui chamados de eixos  $x$  e  $y$  [12]. Entretanto, as grades escritas pelo método dito acima, disponíveis para estudo no LITel, já possuem birrefringência, inerente ao processo de confecção [13]. Isto se deve ao fato de a descarga elétrica produzir variações de aproximadamente  $\Delta n \approx 2 \times 10^{-3}$  no índice de refração. Além disso, essa variação não é uniforme por toda a seção transversal, o que possibilita o efeito da birrefringência. Dessa maneira, nos principais eixos de polarização, os comprimentos de onda ressonantes se dão como segue:

$$\lambda_{res}^{max} = \Lambda(\Delta n^{min}) \quad (2)$$

$$\lambda_{res}^{min} = \Lambda(\Delta n^{max}) \quad (3)$$

Por outro lado, a aplicação de cargas laterais, como se propõe neste exposto, induz uma birrefringência que pode ser calculada pela aplicação das equações do efeito foto-elástico,

baseadas na variação do índice de refração para cada eixo de polarização [14]:

$$\Delta n_x = -\frac{n_{eff}^3}{2E}((p_{11} - 2vp_{12})\sigma_x + ((1-v)p_{12} - vp_{11})(\sigma_y + \sigma_z)) \quad (4)$$

$$\Delta n_y = -\frac{n_{eff}^3}{2E}((p_{11} - 2vp_{12})\sigma_y + ((1-v)p_{12} - vp_{11})(\sigma_x + \sigma_z)) \quad (5)$$

Onde  $E$ ,  $v$  e  $p_{ij}$  são o módulo de Young, o coeficiente de Poisson e os componentes do tensor foto-elástico, respectivamente. Como foi utilizada uma fibra de sílica, esses dados são:  $E = 74.52$  GPa,  $v = 0.17$ ,  $p_{11} = 0.121$  e  $p_{12} = 0.27$ .

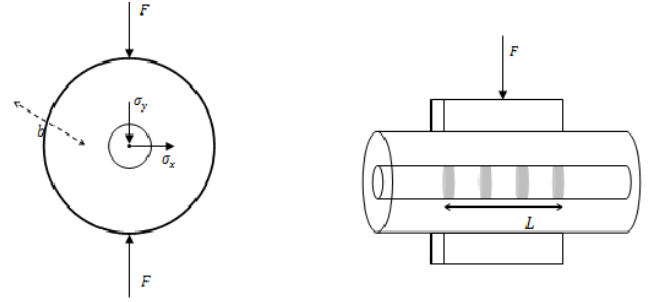


Figura 3: LPFG submetida a uma carga lateral

Analisando a força  $F$  incidente sobre o sensor encapsulado, esta pode ser modelada como uma distribuição de cargas linear e uniforme por todo o comprimento da grade  $L$ . Chamando de  $\theta$  o ângulo que esta força faz com o eixo  $y$  de polarização da fibra de raio  $b$ ,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os estresses causados em cada coordenada, definidos por:

$$\sigma_x = \frac{F}{\pi L b}(\cos(\theta) - 2\sin(\theta)) \quad (6)$$

$$\sigma_y = \frac{F}{\pi L b}(\sin(\theta) - 2\cos(\theta)) \quad (7)$$

Ademais, a variação no período da grade é uma consequência da deformação física:

$$\Lambda = \Lambda_0(1 + \frac{1}{E}(\sigma_z - v(\sigma_x + \sigma_y))) \quad (8)$$

Ao manipular todas as equações expostas de (2) a (7), é possível modelar o efeito das cargas bidirecionais nas LPFGs. A fibra em estudo, a qual o LITel dispõe, é a SMF28, de período  $\Lambda = 470$   $\mu\text{m}$ .

### B. Modelo da Trelça

O uso de treliças na construção civil se deve ao fato de serem estruturas rígidas e estáveis, capazes de sustentar grandes carregamentos utilizando menos materiais, além de serem utilizadas em extensos vãos. Treliças planas [15] [16] são aplicadas para telhados e pontes, em que estas precisam de três graus de apoio para se manterem estáveis e, para

fins de cálculos, todas as forças aplicadas sob a estrutura são analisadas nos nós. Sendo assim, as barras que interligam as conexões podem sofrer reações de tração ou compressão.

Para a análise matemática são utilizados três métodos distintos: o Método dos Nós, das Seções ou Gráfico. Neste estudo o método aplicado será o das seções, que é utilizado para encontrar os esforços em apenas alguns nós da estrutura. Um corpo rígido está em equilíbrio quando o somatório de forças em todas as direções e o momento angular são nulos, como demonstrado nas equações abaixo, relacionadas apenas à seção em análise. Para esta situação, a seção A (Figura 4):

$$\sum F_x = 0 \quad (9)$$

$$\sum F_y = 0 \quad (10)$$

$$\sum M_o = 0 \quad (11)$$

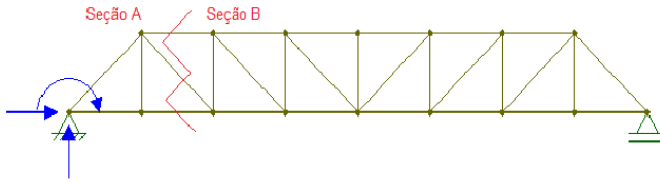


Figura 4: Método das Seções para análise de Treliças

### III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### A. Caracterização

Submeteu-se a LPFG a diferentes cargas, variando-se em 13 intervalos de 0 a 1kg. Ainda, se subordinou o ângulo de incidência da normal da carga com o eixo y de polarização da fibra, comutando-os também em 13 intervalos aleatórios de 0 a 360°. Ao observar tais eventos, nota-se que o aumento da carga exercida sobre o sensor leva a um similar aumento na separação entre os comprimentos de onda ressonantes de x e y. Isso ocorre porque, conforme a força  $F$  cresce, o estresse no eixo x  $\sigma_x$  também se eleva, deslocando o comprimento de onda ressonante em x para a direita, ao passo que  $\sigma_y$  diminui e dispersa o comprimento de onda ressonante deste eixo para a esquerda. Este fenômeno provoca o aumento da birrefringência.

Em contrapartida, ao fixar a força e alternar o ângulo, percebe-se certa periodicidade no vale de ressonância.

#### B. Análise

Ao final desta primeira etapa e, agora, dispondo de todos os pares ordenados de intensidade da força e ângulo de aplicação por comprimento de onda ressonante nos dois eixos de polarização, x e y, tornou-se possível caracterizar como estes estão relacionados e como variam e respondem à mudança de um ou mais parâmetros que incidem sobre a LPFG. A partir disso, mantendo-se fixo o ângulo de incidência em 0°, foram

plotados os espectros resultantes de cada uma das 13 forças simuladas de aplicação. O resultado se deu como o esperado na caracterização. Alguns dos gráficos plotados para tal análise, contendo a transmissão em x, y e a resultante, seguem, sendo que foram escolhidos, dentre as 13 possibilidades de resultante para cada ângulo, um valor baixo (carga de 0.08kg), um médio (carga de 0.67kg) e um alto (carga de 1kg), para facilitar a compreensão do comportamento destas variações:

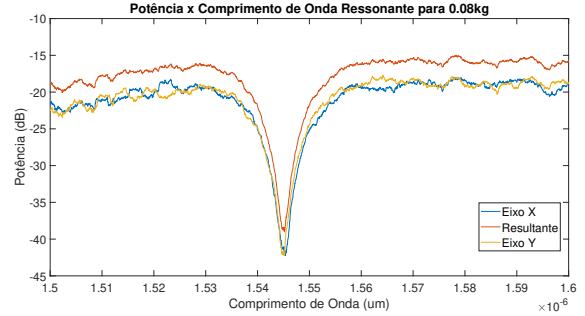


Figura 5: Espectros X, Y e Resultante para 0.08kg

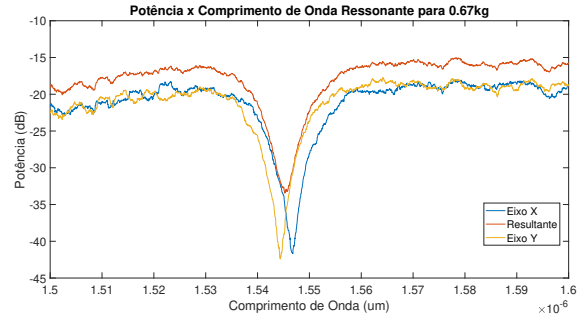


Figura 6: Espectros X, Y e Resultante para 0.67kg

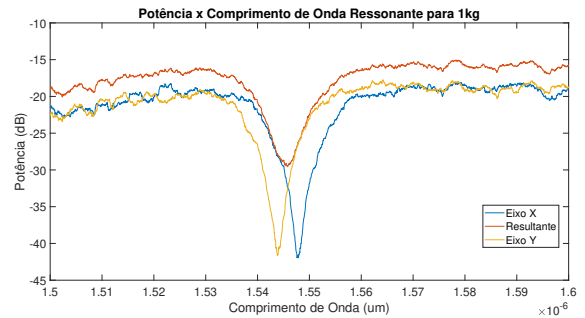


Figura 7: Espectros X, Y e Resultante para 1kg

Observando-os, fica evidente que ao aumentar a intensidade da força exercida, aumenta-se a separação entre os comprimentos de onda ressonante x e y, pois  $\sigma_x$  cresce e  $\sigma_y$  decresce, levando o primeiro para a direita e o segundo para a esquerda e aumentando assim a birrefringência induzida.

Repetindo o procedimento anterior, agora para variações de ângulo em uma dada intensidade de força fixa, confirma-se

portanto o exposto de que esta variável conferiria um comportamento periódico quanto aos vales ressonantes, formando senóides a partir dos comprimentos de onda com os ângulos de incidência da carga, como explicita o gráfico abaixo:

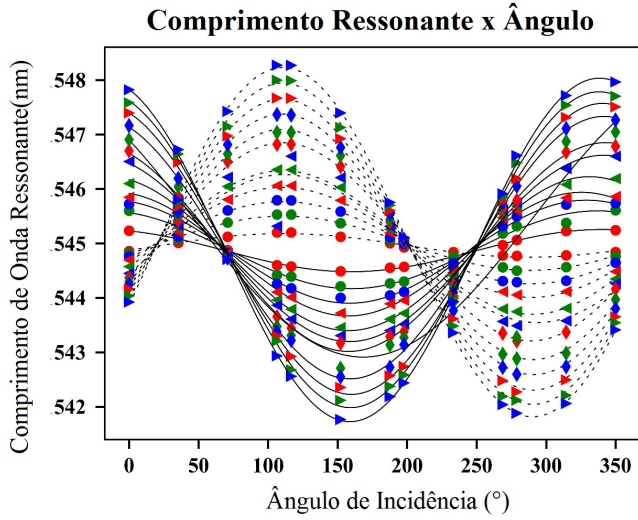


Figura 8: Senóides formadas pelos comprimentos de onda ressonantes relacionados aos ângulos de incidência para forças fixadas

Cada senóide, demarcada por símbolos e cores diferentes, representa um valor de intensidade fixo. Dessa forma, nota-se o comportamento periódico dos comprimentos de onda ressonantes relacionados a cada força, ao variar o ângulo de incidência sobre a LPG.

Por conseguinte, foram criados dois polinômios da forma  $z = f(x, y)$ , sendo  $z$  correspondente à intensidade aplicada sobre o nó no primeiro caso e, no segundo estudo, ao ângulo. Enquanto isso,  $x$  e  $y$  são respectivamente os comprimentos de onda ressonantes nos eixos  $x$  e  $y$ . Ambos os polinômios são de terceiro grau para as duas variáveis, dados por:

$$f(x, y) = p_{00} + p_{10}x + p_{01}y + p_{20}x^2 + p_{11}xy + p_{02}y^2 + p_{30}x^3 + p_{21}x^2y + p_{12}xy^2 + p_{03}y^3 \quad (12)$$

Os coeficientes  $p_{ij}$  encontrados nesta aproximação polinomial, que estão nas tabelas I e II, indicam um fator de qualidade de ajuste para  $R^2$  de 0.9626 para força e de 0.8144 para o ângulo  $\theta$ , o que confere boa confiabilidade para este modelo de estudo aplicado, favorecendo o monitoramento que fora proposto.

Tabela I: Coeficientes do polinômio de força

$p_{ij}$	valor	$p_{ij}$	valor
$p_{00}$	+2.29	$p_{02}$	+2.80
$p_{10}$	-0.14	$p_{30}$	+0.02
$p_{01}$	-0.37	$p_{21}$	+0.43
$p_{20}$	+3.04	$p_{12}$	+0.53
$p_{11}$	+3.88	$p_{03}$	+0.23

Tabela II: Coeficientes do polinômio do ângulo  $\theta$

$p_{ij}$	valor	$p_{ij}$	valor
$p_{00}$	+183.90	$p_{02}$	-17.58
$p_{10}$	-35.16	$p_{30}$	-3.27
$p_{01}$	-112.40	$p_{21}$	+3.88
$p_{20}$	-18.25	$p_{12}$	+19.13
$p_{11}$	-49.14	$p_{03}$	+20.78

Dessa forma, para conferir a precisão e a confiabilidade do sistema proposto, substituem-se os valores dos comprimentos de onda ressonantes encontrados nos dois eixos nas 156 simulações realizadas, gerando a força e o ângulo de aplicação estimados. Estes dois são plotados para comparação com os valores reais para essas duas grandezas, através do modelo de regressão linear simples. O resultado é exposto na Figura 9 para a intensidade e na Figura 10 para o ângulo.

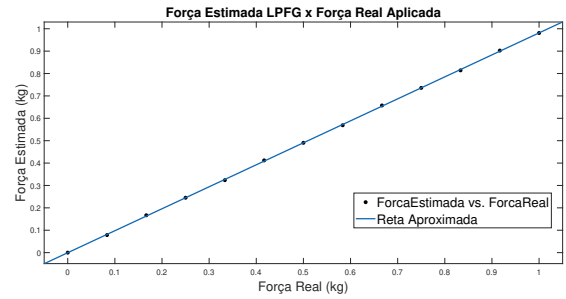


Figura 9: Comparação para Força Estimada e Força Real

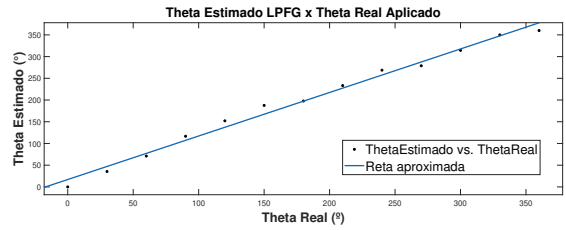


Figura 10: Comparação para Ângulo Estimado e Ângulo Real

Por ambos os gráficos, é notória a precisão do estudo realizado, indicando bom funcionamento para a aplicação proposta. Ainda, em termos numéricos, esta ideia se confirma ao analisar o coeficiente de determinação do modelo, que é uma medida de ajuste do modelo, variando de 0 a 1 sendo que, quanto mais próximo de 1, melhor a relação linear entre as duas grandezas comparadas, isto é, melhor ajuste e precisão das grandezas ao modelo. Para a intensidade da força, Figura 9, este coeficiente se deu no valor de 0.99, ao passo que para o ângulo ficou em 0.92. Portanto, a boa confiabilidade citada do modelo comprova-se por esses valores.

#### IV. CONCLUSÃO

Esse trabalho expõe um estudo sobre a aplicação de sensores ópticos empregados para monitoramento de construções civis. Dessa maneira, buscou-se focar em pontes estruturadas com

treliças planas e a avaliação da intensidade e ângulo de incidência de forças sobre as mesmas, através do Método das Seções para essas estruturas.

O método de simulação obteve resultados satisfatórios para um possível protótipo, ao se aproximar dos atributos reais da fibra e se beneficiar da birrefringência induzida, característica implícita ao material, para atingir os objetivos propostos.

Portanto, foi notória a precisão gerada pelo uso da LPFG, o que a torna uma boa alternativa para monitorar estas composições e eventuais anormalidades que são modeladas como forças bidirecionais. Fixada a intensidade, observou-se um comportamento periódico do efeito do ângulo de aplicação da força no sensor sobre o comprimento de onda ressonante.

Por um modelo de regressão linear, foi possível atestar a precisão do sistema apresentado, em que as retas, tanto para força quanto para ângulo estimados, se ajustaram bem aos pontos das gradezas reais, com coeficientes de determinação de 0.99 e 0.92, respectivamente. Tais valores garantem ótima confiabilidade do modelo proposto, alcançando o objetivo de avaliação desejado.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio da CAPES, CNPq, Inerge-UFJF, PET Elétrica e CPFL Energia.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Hong-yue Liu, Da-kai Liang, Jie Zeng, "Long period fiber grating transverse load effect-based sensor for asphalt pavement pressure field measurements", *Sensors and Actuators A: Physical Journal*, vol. 168, pp. 262-266, 2011.
- [2] Malerba, P. C. C., Guarnieri, F. L., J. Barros, "Aplicação de extensometria através de Strain Gage: elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado,"XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação - Universidade do Vale do Paraíba.
- [3] D. Hou et al., "Fiber sphere-embedded long-period fiber grating for curvature measurement with high sensitivity,"*Optical Engineering*, vol. 57, no. 04, pp. 1, 2018
- [4] Gerd Keiser, "Comunicações por Fibras Ópticas", 4ª edição, AMGH, 2014.
- [5] G. Rego, P. Marques, J. Snatos, e H. Salgado, "Arc-Induced Long-Period Gratings,"*Fiber and Integrated Optics*, vol. 24, no. 3-4, pp. 245-259, 2005.
- [6] X. Shu, L. Zhang, and I. Bennion, "Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 255-266, 2002.
- [7] S. James and R. Tatam, "Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application,"*Measurement Science and Technology*, vol. 14, no. 5, R49-R61, 2003.
- [8] Barino, F. O.; Delgado, F. S. ; Santos, A. B. . Transverse load discrimination in Long-Period Fiber Grating via Artificial Neural Network. *JOURNAL OF MICROWAVES AND OPTOELECTRONICS*, v. 19, p. 1-10, 2020.
- [9] Ke Tian, Gerald Farrel, Wenlei Yang, Xianfan Wang, Elfed Lewis, Pengfei Wang, "Simultaneous Measurement of Displacement and Temperature Based on Balloon-Shaped Bent SMF Structure Incorporating an LPG,"*J. Lightwave Technol*, 4960-4966(2018)
- [10] CCM de Barros, OJ Henrique, BC Ricardo, "Sensor óptico de alta sensibilidade para avaliação de adulteração de combustíveis empregando redes de período longo e fibras ópticas afinadas,"2014
- [11] Dogmar A. de Souza Junior, Francisco A. R. Gesualdo, Livia M. P. Ribeiro, "Avaliação do comportamento mecânico de treliças de madeira do tipo Howe, Pratt e Belga otimizadas pelo método dos algoritmos genéticos" Uberlândia, MG - Brasil: Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- [12] L. Zhang, Y. Liu, L. Everall, J. Williams, and I. Bennion, "Design and realization of long-period grating devices in conventional and high birefringence fibers and their novel applications as fiber-optic load sensors," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 5, no. 5, pp. 1373-1378, 1999.
- [13] B. Seigny, M. Leduc, M. Faucher, N. Godbout, and S. Lacroix, "Characterization of the large index modification caused by electrical discharge in optical fibers," in *Conference on Lasers and Electro-Optics*. Optical Society of America, 2009, p. JTuD72.
- [14] B. L. Bachim and T. K. Gaylord, "Polarization-dependent loss and birefringence in long-period fiber gratings," *Applied optics*, vol. 42, no. 34, pp. 6816-6823, 2003.
- [15] DW Alspaugh, K Kunoo, "Optimum Configurational and Dimensional Design of Trusses Structures,"*Computers and Structures*, vol. 4, pp. 755-770, 1974.
- [16] Z. Pravia, D. Orlando, "Modelos qualitativos de treliças planas: construção e aplicação no ensino da análise e comportamento estrutural,"*Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia*, 29, Porto Alegre, 2001