

Simulação de sensor de temperatura à fibra óptica baseado em Lossy Mode Resonance

Simulation of fiber optic temperature sensor based on Lossy Mode Resonance

RESUMO

Gustavo Fraga Gehring
gehring@alunos.utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Uilian José Dreyer
uiliandreyer@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Jean Carlos Cardozo da Silva
jeancs@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Ignacio Del Villar
ignacio.delvillar@unavarra.es
Universidad Pública de Navarra, Navarra, Pamplona, Espanha

Carlos Ruiz Zamarreño
carlos.ruiz@unavarra.es
Universidad Pública de Navarra, Navarra, Pamplona, Espanha

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

Este artigo propõe uma modelagem teórica de um sensor de temperatura à fibra óptica baseado no fenômeno de Lossy Mode Resonance (LMR). O estudo do sensor é verificado através de simulações. A configuração do sensor possui como material revestido na casca da fibra o dióxido de estanho (SnO₂), com dimensões nanométricas. A influência da temperatura foi analisada através da adição do coeficiente termo-óptico (TOC) tanto para o material revestido quanto ao núcleo da fibra. A análise do espectro de transmissão mostrou que o sensor é capaz de apresentar deslocamentos em relação aos comprimentos de onda ressonantes causados pela variação da temperatura. Além do sensoriamento de temperatura, a estrutura modelada abre portas para a adição de mais um sensor responsável pelo monitoramento de concentração de gases.

PALAVRAS-CHAVE: Detectores ópticos. Ressonância. Modelagem.

ABSTRACT

This article has the purpose of a theoretical modeling of a fiber optic temperature sensor based on Lossy Mode Resonance (LMR). The study of the sensor was investigated using simulations. The structure of the sensor, at the cladding of the fiber optic, has SnO₂ layer as coated material (thin film), with nanometric dimensions. Temperature influences was analysed with the addition of thermo-optic coefficient (TOC). The analysis of transmission spectra showed that the sensor is capable of present shift of resonance wavelength caused by temperature variations. Besides temperature sensing, the modeling geometry could ally another sensing parameter at fiber optic, responsible for gas detection.

KEYWORDS: Optical detectors. Resonance. Modeling.



INTRODUÇÃO

A presença de sensores está correlacionada ao aumento da qualidade da produção industrial. Monitorar condições em que sistemas operam auxiliam na análise e tomada de decisões buscando o desenvolvimento. Parâmetros como concentração de gases, temperatura, índice de refração, entre outros, são campos onde os sensores atuam. Destaca-se no campo dos sensores os baseados em fibra óptica (SFO), as vantagens desses sensores incluem: serem compactos e robustos, alta sensibilidade e imunidade à interferência eletromagnética (YIN; RUFFIN; YU, 2008, p. 2). Nota-se o importante uso de SFO em aplicações industriais, principalmente em sistemas de comunicações, controle e instrumentação.

A fibra óptica é um guia de onda (estrutura que direciona a propagação de ondas) de configuração cilíndrica fabricada com materiais dielétricos (isolantes) (TRONCO; AVILA, 2007, p. 12), tem por estrutura básica o núcleo central (*core*) por onde a luz se propaga e é revestida pela casca (*cladding*). Grandezas físicas, biológicas e químicas conseguem alterar parâmetros da luz dentro da fibra óptica. Dentre esses parâmetros destaca-se o comprimento de onda, polarização e intensidade. A presença de sensor capaz de detectar mudanças nas características da luz dentro desta guia de onda devido a grandezas externas é conhecido como sensor em fibra óptica.

Destaca-se o revestimento de filmes finos nos guias de ondas com objetivo de modular as propriedades da luz. Através da deposição de materiais (com dimensões nanométricas) na casca da fibra, são introduzidas perdas na transmissão da luz e seu comportamento depende diretamente das características do material depositado. Estas mudanças no comportamento da luz geram ressonâncias eletromagnéticas. Observam-se três categorias de ressonâncias dependentes da permissividade elétrica do material depositado na casca: *Surface Plasmon Resonances* (SPR), *Long Range Surface Exciton Polaritons* (LRSEP) e *Lossy Mode Resonances* (LMR). As duas primeiras categorias não fazem parte deste trabalho e podem ser mais exploradas na literatura (PROBOWO; AGNES e LIU, 2018) e (YANG; BRADBERRY e SAMBLES, 1990). A terceira categoria apresenta a parte real da permissividade positiva e esta é maior em magnitude que ambas às partes imaginárias da permissividade e do material envolta do filme fino (PALIWAL; JOHN, 2015, p. 5361). Neste trabalho são apresentados resultados de simulação utilizando *Lossy Mode Resonances* (LMRs), com objetivo de realizar a modelagem teórica do sensor de temperatura em fibra óptica baseado no fenômeno da LMR. A topologia apresentada conta com a possibilidade de aliar mais um sensor na fibra, responsável pela detecção de gás. Para esta medição, reações entre gás e sensor são observadas no índice de refração do material revestido. Com a variação da concentração de gás, ocorrem deslocamentos nos comprimentos de onda ressonantes da LMR, pode-se observar a resposta do sensor medindo o gás e identificar a relação com sua concentração.

Revestir um substrato com óxidos metálicos que possui ao seu redor interface com outro material dielétrico, onde este último apresenta maior índice de refração que o material revestido (substrato + óxidos metálicos), permite o surgimento de modos de onda, (conhecidos como *lossy modes*), possibilitando a geração do fenômeno *Lossy Mode Resonance*. A maneira como a luz se propaga dentro da fibra denomina-se modo de propagação, a possibilidade de mais de um modo permitido é a existência de diferentes caminhos propagados pela onda. A geração

do fenômeno da LMR é consequência do acoplamento entre modos presentes na guia de onda e um modo específico nos chamados *lossy modes* presentes no filme fino (material que reveste o substrato). É necessário que ocorram duas condições para gerar o fenômeno: (i) sobreposição dos campos dos modos e (ii) os dois modos citados anteriormente necessitam estar em fase (WANG; ZHAO, 2018, p. 49). A condição (ii) representa o princípio de que a parte real da constante de propagação nos *lossy modes* deve ser igual a parte real da constante de propagação do modo do guia de onda.

O método mais conhecido para realizar acoplamento de modos das guias de ondas e modos guiados em filmes finos, utilizando um prisma, é a configuração Krestchmann-Reather, utiliza-se o método de reflexão total atenuada (ATR na configuração) (DELL VILLAR, I et al, 2010, p. 3351). Em resumo, nesta configuração observa-se o surgimento do campo evanescente (parcela do campo elétrico) entre o prisma e o filme fino caso a luz incidente apresente um ângulo maior que o ângulo de reflexão total atenuada (ATR). O acoplamento entre o campo evanescente e os modos do filme fino ocorrem se as condições (i) e (ii) citadas anteriormente forem respeitadas, gera-se então o fenômeno do *Lossy Mode Resonance* (LMR). Nota-se então a transferência de energia dos modos do guia de onda para os *lossy modes*, ocorrendo diminuição na intensidade de luz refletida, este decréscimo ocorre em ângulos e comprimentos de onda específicos chamados de ângulo de ressonância e comprimento de onda ressonante, respectivamente. A configuração Krestchmann-Reather apresenta dificuldades em sua implementação, como dimensão grande e fragilidade em suas partes mecânicas (WANG; ZHAO, 2018, p. 47). Minimiza-se estes problemas adotando fibra óptica como configuração para gerar o fenômeno da LMR.

Para observar o comprimento de onda ressonante, e com isso onde ocorre a diminuição na intensidade da luz refletida, utilizou-se o método da interrogação espectral (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242). Neste método, existe um comprimento de onda específico da luz incidente na fibra onde o índice de refração efetivo do campo evanescente iguala-se com o índice efetivo de um *lossy modes*, resultando no acoplamento máximo entre o campo evanescente e *lossy modes*. O comprimento de onda ressonante é bastante sensível a variações dos índices de refração ao redor do filme fino (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242). Sabe-se que a variação de temperatura altera o comportamento do índice de refração dos materiais. Com isso, se a temperatura do ambiente ao redor do sensor varia, ocorrem mudanças no índice de refração do material depositado resultando em mudanças no comprimento de onda ressonante. Utiliza-se este fenômeno para simular o sensor de temperatura.

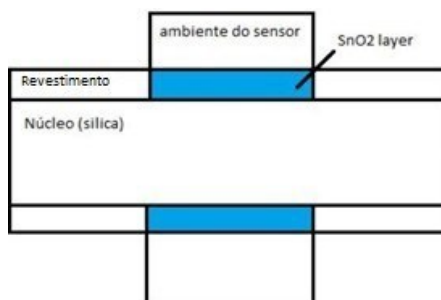
Com o intuito de realizar a modelagem teórica do sensor de temperatura em fibra óptica baseado em LMR, seguiu-se os mesmos passos apresentados na referência (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242). O material utilizado para o revestimento (como filme fino) é o dióxido de estanho (SnO_2). O efeito da temperatura na resposta do sensor foi estudado com a inserção do coeficiente termo óptico (GHOSH; ENDO; IWASAKI, 1994, p. 1339) nas análises. Pode-se observar mudanças nos vales referentes aos comprimentos de onda ressonantes gerados pela LMR, estas mudanças são importantes para aplicações que necessitam entender a variação de temperatura em sistemas de medição.

MATERIAL E MÉTODOS

Objetivou-se realizar a modelagem teórica do sensor de temperatura em fibra óptica baseado em LMR utilizando SnO_2 como material revestido. Foi-se usado o método de reflexão total atenuada (ATR) em conjunto com a configuração Krestchmann nas simulações, no software MATLAB. A metodologia utilizada para as simulações encontra-se em (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242), os mesmos passos apresentados na referência foram seguidos para o cálculo dos parâmetros de interesse, como Potência transmitida normalizada e coeficiente de reflexão para a luz não polarizada. Utilizou-se o método da transferência de matriz para um sistema de multicamadas, a fim de obter o coeficiente de reflexão na simulação. A razão no cálculo destes coeficientes foi determinar através do método da interrogação por comprimento de onda (espectral) (PALIWAL; JOHN, 2015, p. 5362), a curva de transmissão em resposta à diferentes temperaturas submetidas neste, além disso, reconhecer o comprimento de onda ressonante na forma de onda.

A estrutura do sensor modelado é apresentada na Figura 1. Pode-se observar que o material utilizado como filme fino (*coating*) é o dióxido de estanho (SnO_2), como citado anteriormente. Considerou-se o núcleo da fibra óptica formado pela sílica (SiO_2). No que diz respeito à parte “ambiente do sensor” na Figura, existe esta camada para simular diferentes índices de refração nela, com finalidade de verificar a resposta do sensor em relação a variações (neste artigo, ocasionadas pela mudança de temperatura na camada) desse parâmetro. A propagação da luz ocorre através do núcleo da fibra, sendo inserida e recebida em suas extremidades.

Figura 1 – Esquemático do sensor modelado



Fonte: Autoria própria (2020).

Para determinar da influência da temperatura no sensor, realizou-se a adição do coeficiente termo óptico (GHOSH; ENDO; IWASAKI, 1994, p. 1339) na modelagem. Este coeficiente representa a variação do índice de refração do revestimento em resposta à temperatura. A Eq. (1) que relaciona o índice de refração com a temperatura é,

$$n_t = n_r + (T - R) \cdot \frac{dn}{dT}, \quad (1)$$

em que n_t é o valor do índice de refração na temperatura T , n_r é o valor do índice de refração na temperatura R (ambiente), T é temperatura, R é temperatura ambiente (considerou-se aqui 273 K) e (dn/dT) é o coeficiente termo óptico (geralmente em K^{-1}).

Os coeficientes termo óptico para o SnO_2 e para o núcleo da fibra de sílica fundida (SiO_2) são apresentados na Quadro 1, (RISTIC, Davor et al, 2015, p. 215306-4) e (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242) respectivamente. As especificações dos sensores de temperatura em Fibra Óptica baseado no fenômeno da LMR são apresentados no Quadro 2.

Quadro 1 – Coeficientes termo ópticos utilizados

	SnO_2	SiO_2
Coeficiente termo óptico (dn/dT)	$1,91 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$	$1,28 \cdot 10^{-5} [\text{K}^{-1}]$

Fonte: Autoria própria (2020).

Quadro 2 – Especificações para sensor A e B de temperatura na F.O.

	Sensor A	Sensor B
Índice de refração do meio envolta do sensor	1,421	1,436
Diâmetro do núcleo	400 μm	400 μm
Comprimento da região do sensor	40 mm	40 mm
Espessura da camada de SnO_2	100 nm	100 nm
Abertura Numérica	0,39	0,39

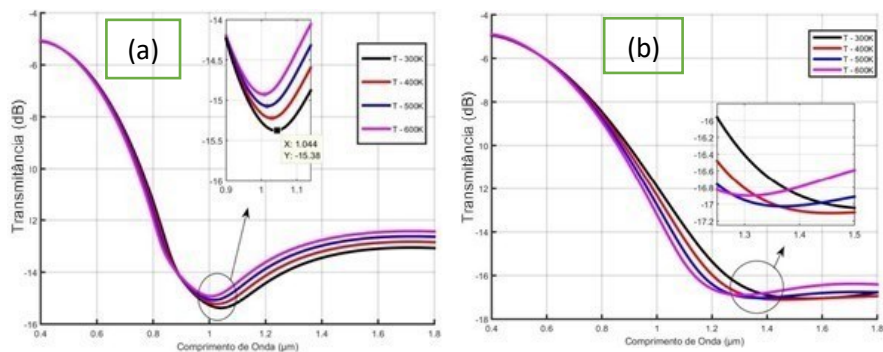
Fonte: Autoria própria (2020).

A Sensibilidade do sensor de temperatura proposto é encontrada em relação ao meio envolta do sensor, nesta simulação podendo apresentar valores para o sensor A e B. Nos sensores LMRs, a sensibilidade para alterações na temperatura é definida como a variação do comprimento de onda ressonante em relação a variação de temperatura no sensor (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

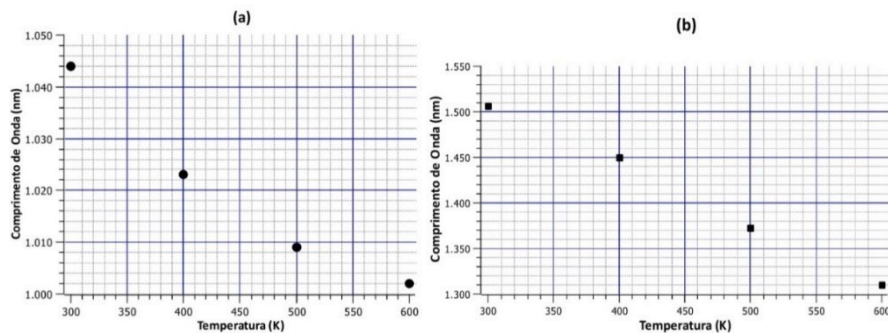
As respostas dos sensores, com parâmetros apresentados no Quadro 1 e Quadro 2, foram investigados através de simulações. Optou-se em analisar o espectro de transmissão (transmitância em [dB] – relacionado com potência normalizada) em resposta ao comprimento de onda, variando à temperatura na região do sensor de 300 K à 600 K com passos de 100 K.

Figura 2 – Espectro de transmissão referente ao sensor (a) A e B (b)



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 3 – Sensibilidade a temperatura dos sensores (a) A e B (b)



Fonte: Autoria própria (2020).

As curvas de transmissão dos sensores A e B, com suas respectivas especificações são apresentadas na Figura 2. É possível observar que o aumento da temperatura ocasiona o deslocamento das curvas da LMR para as regiões de menor comprimento de onda. A variação de temperatura modifica as propriedades dos parâmetros presentes no sistema modelado. Para o núcleo da fibra, considerou-se formado por sílica, que possui coeficiente termo óptico (TOC *thermo-optic coefficient*) positivo, pode-se concluir pela Eq. (1) que com o aumento da temperatura o índice de refração do núcleo da fibra aumenta devido ao sinal deste coeficiente. Além disso, o valor do índice de refração do material revestido (SnO₂) também aumenta com o acréscimo de temperatura (TOC positivo). Os efeitos desencadeados devido a existência destes fatores são percebidos no deslocamento das condições de ressonâncias. Em (PALIWAL; JOHN, 2014, p. 3242) o mesmo método de simulação foi utilizado para modelagem teórica do sensor de temperatura, entretanto o material revestido na casca da fibra foi o óxido de índio e estanho (ITO), este material tem por característica possuir valor negativo para o coeficiente termo óptico. Em razão disto, as curvas aproximam-se com o aumento da temperatura (índice de refração do material revestido diminui). O comportamento oposto é visto na Figura 2. As curvas da LMR tendem a afastarem-se com o aumento do comprimento de onda, fator observado pelo SnO₂ possuir TOC positivo.

A Sensibilidade encontrada para ambos sensores propostos foi aproximadamente 11,67 pm/K conforme resultado apresentado na Figura 3 (a) e (b). Este valor é superior se comparado a outros modelos de sensores de

temperatura utilizando outros fenômenos de ressonâncias, por exemplo a Ressonância de Plasmon de Superfície Localizado (SRIVASTAVA; GUPTA, 2010, p. 1748). Na Figura 3 pode-se observar a sensibilidade em relação à temperatura dos sensores. Nota-se que quanto mais baixas as temperaturas, os valores de picos da potência transmitida estão localizados em comprimentos de ondas maiores. Para a Figura 3 (b), considerou-se a faixa espectral de (1,30 μm à 1,51 μm).

Aplicação do sensor de temperatura baseado em LMR em ambiente industrial é descrito em (SÁNCHEZ; et al, 2016, p. 4537). Neste artigo, o sensor realiza o monitoramento online no nível de degradação de óleo lubrificante em equipamento utilizado para geração de energia com fontes renováveis, considerou-se o nível de degradação como função da temperatura. Em relação à detecção de gás, foi-se utilizado sensor em fibra óptica baseado em LMR na detecção de Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) (USHA; MISHRA; GUPTA, 2015, p. 196), a obtenção dos bons resultados é ligada a possibilidade de no fenômeno da LMR ser possível controlar as propriedades das nanopartículas variando os parâmetros presentes nos Quadro 1 e Quadro 2. A rotina de modelagem apresentada neste artigo pode permitir otimizar o design dos sensores postos em prática, como os citados anteriormente. Além disso, compreender melhor o funcionamento dos sensores e sistemas aplicados.

CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu o estudo do sensor de temperatura à fibra óptica baseado no fenômeno de *Lossy Mode Resonance* (LMR) com revestimento de dióxido de estanho (SnO_2) como filme fino. Foi apresentado o esquemático referente ao sensor simulado, o equacionamento do efeito da temperatura no sensor, a análise do espectro de transmissão em relação ao comprimento de onda. A análise mostrou que o sensor é capaz de perceber variações de temperatura em ambientes próximos, sofrendo variações em seu espectro de transmissão e sensibilidade. Além disto, a estrutura modelada abre portas para a adição de outro sensor com função de detecção na concentração de gás. Esse é um resultado importante já que aplicações envolvendo sensores de temperatura e gás são demandados em ambientes industriais, a medição da degradação de lubrificantes e detecção da concentração de Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) são aplicações dos sensores em fibra óptica baseado em LMR. Permite-se fazer uso das simulações e análises deste trabalho para otimizar o design e obter maior compreensão do funcionamento de possíveis sensores aplicados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES, à FINEP e a Fundação Araucária pela concessão da bolsa e apoio financeiro ao laboratório.

REFERÊNCIAS

DELL VILLAR, I et al. Generation of lossy mode resonances with absorbing thin-films. **Journal of Lightwave Technology**. vol. 28, n. 23, p. 3351-3357, 2010. DOI: 10.1109/JLT.2010.2082492.

DELL VILLAR, I. et al. Design rules for lossy mode resonance based sensors. **Applied optics**. vol. 51, n. 19, p. 4298-4307, 2012. DOI: 10.1364/AO.51.004298.

GHOSH, G.; ENDO, M.; IWASAKI, T. Temperature- Dependent Sellmeier Coefficients and Chromatic Dispersions for Some Optical Fiber Glasses. **Journal Of Lightwave Technology**. vol. 12, n. 8, p. 1338-1342, 1994. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/d5a0/cd4568df58a5fcac23e9efd5030e548860f1.pdf>. Acesso em: 20 agosto 2020.

PALIWAL, Nidhi; JOHN, Joseph. Theoretical modeling of lossy mode resonance based refractive index sensors with ITO/TiO₂ bilayers. **Applied optics**, v. 53, n. 15, p. 3241-3246, 2014.

PALIWAL, Nidhi; JOHN, Joseph. Theoretical modelling of lossy mode resonance (LMR) based fiber optic temperature sensor utilizing TiO₂ sensing layer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON FIBER OPTICS AND PHOTONICS, 12., 2014, Kharagur, India. *Proceeding...* Kharagur: The Optical Society, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280697599_Theoretical_modelling_of_lossy_mode_resonance_LMR_based_fiber_optic_temperature_sensor_utilizing_TiO2_sensing_layer. Acesso em: 22 agosto 2020.

PALIWAL, N.; JOHN, J. Lossy Mode Resonance (LMR) Based Fiber Optic Sensors: A Review. **IEEE Sensors Journal**. vol. 15, n. 10, p. 5361-5371, 2015. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2448123.

RISTIC, Davor et al. Thermo optical coeficiente of tin-oxide films measured by ellipsometry. **Journal of Applied Physics**. vol. 118, n. 21, p. 215306, 2015. DOI: 10.1063/1.4937146.

SÁNCHEZ, P. et al. LMR-based optical fiber refractometers for oil degradation sensing applications in synthetic lubricante oils. **Journal of Lightwave Technology**. vol. 34, n. 19, p. 4537-4542, 2016. DOI: 10.1109/JLT.2016.2562701.

SRIVASTAVA, S. K.; GUPTA, B. D. Simulation of a localized surface-plasmon-resonance-based fiber optic temperature sensor. **JOSA A**. vol. 27, n. 7, p.1743-1749, 2010. DOI: 10.1364/JOSAA.27.001743.

TRONCO, T. R.; AVILA, L. F. **Fundamentos de Comunicação Óptica**. 1. ed. 2007. Disponível em: <https://www.ft.unicamp.br/~lfavila/TT503/fundamentos%20de%20comunica%e7%f5es%20opticas.pdf>. Acesso em: 20 agosto 2020.

USHA, S. P.; MISHRA, S. K.; GUPTA, B. D. Fiber optic hydrogen sulfide gas sensors utilizing ZnO thin film/ZnO nanoparticles: A comparison of surface plasmon resonance and lossy mode resonance. **Sensors and Actuators B: Chemical**. vol. 218, p. 196-204, 2015. DOI: 10.1016/j.snb.2015.04.108.

WANG, Q.; ZHAO, W. A comprehensive review of lossy mode resonance-based fiber optic sensors. **Optics and Lasers in Engineering**. vol. 100, p. 47–60, 2018. DOI:10.1016/j.optlaseng.2017.07.009.

YIN, S.; RUFFIN, P. B.; YU, F. T. S. **Fiber Optic Sensors**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.