

Sensor óptico baseado em fibra óptica de núcleo vazado e curvatura negativa para detecção simultânea de metano, monóxido de carbono e monóxido de nitrogênio

Artur de Araujo Silva, *UFSCar* e Carlos Alberto De Francisco, *UFSCar*

Resumo—Este trabalho demonstra o potencial para aplicação das fibras de núcleo vazado e curvatura negativa (HC-NCF) como sensores eficientes para monitorar três gases simultaneamente, metano (CH_4), monóxido de carbono (CO) e monóxido de nitrogênio (NO). Com a inserção de orifícios nestas fibras o gás do ambiente pode entrar no núcleo oco, fazendo com que a luz que se propaga na fibra interaja com este gás. Esta interação entre luz e gás, em regiões espectrais onde os gases apresentam alta absorção, permite o monitoramento de baixas concentrações de gases presentes no ambiente, por meio da atenuação da potência luminosa na saída. Os resultados das simulações mostram um comportamento linear da perda em função da concentração de gás para os três gases de interesse. Essa linearidade entre as perdas de propagação e a variação das concentrações de gases no ambiente pode promover sua aplicação na área da saúde e do meio ambiente, para monitorar baixas concentrações de gases com alta velocidade e precisão.

Palavras Chave—Fibras Ópticas, Fibras ópticas de núcleo oco, Sensores Ópticos, Fibras Ópticas Microestruturadas.

I. INTRODUÇÃO

O Desenvolvimento de sensores eficientes capazes de detectar qualquer substância prejudicial à saúde e ao meio ambiente tem atraído a atenção de muitos pesquisadores nas últimas décadas. Uma das principais demandas nessa área são sensores que permitem detectar diferentes tipos de gases em baixa concentração, com alta velocidade e alta precisão [1]. Tais sensores são fundamentais em áreas importantes como saúde e meio ambiente, pois monitoram processos de combustão e emissão de poluentes em diversos setores. Isso é demonstrado pelo crescente interesse de reguladores federais e estaduais em detectar e quantificar as emissões de vários gases de indústrias baseadas em petróleo, como o metano (CH_4), que pode contribuir para intensificação de mudanças climáticas, uma vez que o potencial de aquecimento global deste gás é 21 vezes maior do que o dióxido de carbono. A emissão de (CH_4) também representa uma redução na eficiência energética de plantas e um risco de explosões que pode levar a eventos catastróficos [2].

Um segundo gás que requer monitoramento eficiente é o monóxido de nitrogênio (NO), muito comum em ambientes industriais que envolvem processos de combustão. Este gás pode ser nocivo a saúde se inalado em concentrações acima

de 100 ppm. Além disso o 'The National Institute for Occupational Safety and Health' (NIOSH) estipula que o limite seguro de exposição ao gás NO seja de 25 ppm. Ainda em ambientes industriais envolvendo processos de combustão, o monóxido de carbono (CO), um gás incolor, inodoro e extremamente inflamável, pode ser encontrado devido a combustão incompleta de combustíveis fósseis. Tal gás entra na lista dos mais importantes de serem monitorados, uma vez que a sua exposição aguda e crônica está associada ao aumento do risco de eventos cardiopulmonares adversos, podendo levar a morte [3].

Neste contexto, novos métodos de detecção e sensores que permitam monitorar esses três diferentes gases são de grande interesse científico e tecnológico. Os sensores semicondutores e os eletroquímicos são algumas das classes de sensores que se destacam como eficientes para detecção de gases. O primeiro deles permite detectar gases em baixas concentrações, porém, são prejudicados com mudanças de umidade no ambiente e sensibilidade cruzada para outros gases [4]. Já os sensores eletroquímicos apresentam uma boa seletividade, porém possuem um tempo de vida relativamente baixo [5].

Em particular, o advento das fibras ópticas foi responsável por uma revolução na área de sensoriamento, pois permitiram a criação de novos sensores de alta sensibilidade baseados na orientação da luz e sua interação com os gases presentes no ambiente [6]. Levando isso em consideração, vários sensores baseados em fibras ópticas atuam de tal forma que, quando um comprimento de onda específico é transmitido por um meio gasoso, parte de sua energia é absorvida, reduzindo a potência transmitida. Tais sensores de absorção óptica direta apresentam tanto uma alta sensibilidade quanto uma alta seletividade, com garantida durabilidade e facilidade de detecção. Diversos trabalhos na literatura exploram essa técnica de detecção empregando diversos tipos de fibras, desde convencionais [4] até fibras complexas, como a de cristal fotônico [6]. Uma limitação das fibras ópticas convencionais para aplicação em sensoriamento de gases é sua janela de transparência ($0,5\mu m - 2,0\mu m$), cobrindo porção relativamente pequena das linhas de absorção das moléculas de gás [1]. Além disso, as fibras convencionais não apresentam o núcleo oco, impossibilitando a interação da luz propagante por essa fibra com o gás no ambiente.

Para superar esta dificuldade, este trabalho propõe a utilização das fibras ópticas de núcleo oco e curvatura negativa

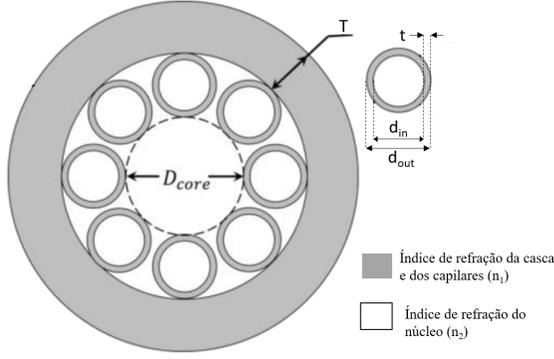


Fig. 1. Representação esquemática da estrutura da fibra HC-NCF, onde d_{out} é o diâmetro externo dos capilares, d_{in} o diâmetro interno dos capilares, D_{core} o diâmetro do núcleo, T a espessura da casca e t a espessura dos tubos capilares. Em detalhe é mostrado as dimensões dos capilares e as cores associadas aos índices de refração do core (n_1) e da cladding (n_2).

(Hollow Core Negative Curvature Fibers, HC-NCF), como sensores ópticos de absorção direta. O ponto forte dessa proposta é que as fibras HC-NCF apresentam um núcleo oco e são capazes de garantir concomitantemente um confinamento eficiente da luz e sua interação com gases adequados que possam ser injetados em seu interior. Desta forma, tais fibras possibilitam um meio eficiente tanto para estudar as interações da luz com fluidos, quanto para construir novos sensores. Outra vantagem das HC-NCF é que elas permitem o guiamento da luz na região espectral do infravermelho médio (mid-IR), que é limitado pela sílica nas fibras convencionais. Atualmente, as fibras HC-NCF já são utilizadas em diversas aplicações voltadas para transmissão de pulsos ultrarrápidos de laser na faixa de femtossegundos [7], aplicações em Terahertz [8], espectroscopia e processamento de materiais [9] e lasers baseados em fibras [10]. No entanto, com relação à área de sensoriamento, poucos estudos podem ser encontrados na literatura mostrando a aplicação das fibras HC-NCF como sensores eficientes [11].

II. DISPOSITIVO

As fibras HC-NCF são constituídas por diversas formas, no entanto, todas possuem um núcleo vazado e paredes com curvatura negativa. Em particular, a fibra HC-NCF explorada nesse trabalho (Fig. 1) possui um núcleo vazado com diâmetro $D_{Core}[\mu m]$ e oito tubos capilares que circulam o núcleo, formando a curvatura negativa. Cada um dos capilares possui diâmetro externo $d_{out}[\mu m]$, diâmetro interno $d_{in}[\mu m]$ e espessura $t[\mu m]$. Todos os capilares são envolvidos por uma casca exterior com espessura $T[\mu m]$.

Particularmente, o confinamento da luz nas fibras HC-NCF não acontece por reflexão interna total como nas fibras ópticas convencionais. Nesse tipo de fibra, o confinamento da luz ocorre pelo efeito anti-ressonante [9], como descrito pelo modelo de guia de onda refletivo anti-ressonante (anti-resonant reflecting optical waveguide, *ARROW*). Nesse tipo de modelo, os guias de onda do tipo *ARROW* possuem uma camada de alto índice de refração na casca em torno do

núcleo funcionando como um ressoador Fabry-Perot, capaz de gerar uma reflexão que incrementa o confinamento da luz no núcleo do guia, constituído por um índice de refração menor. Quando o comprimento de onda da luz propagante no núcleo corresponde a um comprimento de onda ressonante da cavidade Fabry-Perot, ele acaba vazando através da casca. Já os comprimentos de onda que são refletidos pela casca acabam sendo confinados no núcleo da fibra HC-NCF, sendo chamados de anti-ressonantes [9]. O comprimento de onda anti-ressonante λ_{anti} previsto pelo modelo *ARROW* pode ser calculado pela eq. (1).

$$\lambda_{anti}[\mu m] = \frac{4t[\mu m]}{(2m + 1)} \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (1)$$

Nessa eq. (1), $t[\mu m]$ representa a espessura dos tubos capilares (Fig. 1), n_2 o índice de refração da casca, n_1 o índice de refração do núcleo e m é um número inteiro que representa a ordem da ressonância. De forma similar, o comprimento de onda ressonante $\lambda_{res}[\mu m]$ pode ser obtido pela eq. (2).

$$\lambda_{anti}[\mu m] = \frac{2t[\mu m]}{m} \sqrt{n_2^2 - n_1^2} \quad (2)$$

A HC-NCF explorada neste trabalho (Fig. 1) foi escolhida, pois apresenta baixa perda de confinamento na região do espectro onde os três gases de interesse possuem fortes raias de absorção. Esta fibra tem um núcleo vazado com diâmetro $D_{Core} = 119\mu m$ e oito tubos capilares que circulam este núcleo, formando a curvatura negativa. Estes capilares têm diâmetro externo de $d_{out} = 63\mu m$ e diâmetro interno de $d_{in} = 51\mu m$ e uma casca externa de espessura $T = 20\mu m$ [12].

Considerando a situação em que um modo de baixa perda se propaga na fibra HC-NCF com alto confinamento na região oca, a presença de um gás nessa região deverá ocasionar uma forte mudança nesse meio, modificando as características de propagação desse modo. Se o gás presente na região oca possuir um alto coeficiente de absorção para o comprimento de onda confinado no núcleo da fibra, qualquer alteração na concentração deste gás deverá resultar em uma forte alteração na potência transmitida da luz ao longo da fibra. Desta forma, pode-se relacionar a perda de potência na saída da fibra, gerada pela absorção do comprimento de onda propagante, com a concentração de determinado gás presente no interior da fibra.

Para utilizar essa relação entre a potência transmitida e a concentração de gás no núcleo como um sensor óptico de concentração de gás, é fundamental garantir a entrada do gás no neste núcleo. A solução apresentada nesse trabalho é realizar pequenos furos perpendiculares ao comprimento da fibra, como sugerido em [11] e demonstrado no esquemático da Fig. 2. A Fig. 2(a) apresenta uma vista frontal de uma fibra HC-NCF, sem a presença dos furos laterais. A Fig. 2(b) apresenta a vista frontal na região onde está presente um furo, e a flecha indica a direção de entrada do gás que será monitorado. A Fig. 2(c) apresenta uma vista isométrica da fibra, incluindo os furos planejados. Essa estrutura é exatamente a que será empregada nas simulações da próxima seção.

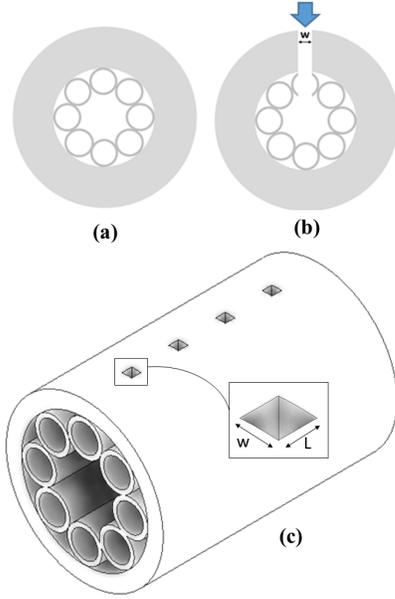


Fig. 2. Vista frontal da estrutura da fibra com curvatura negativa antes da realização dos furos (a) e depois da realização dos furos (b). Esses furos são fundamentais para garantir a entrada de qualquer gás no núcleo da fibra. Em (c) é mostrado detalhes da fibra em uma vista superior.

III. SIMULAÇÃO

As fibras NC-HCF tem uma estrutura relativamente simples quando comparadas com outras fibras de núcleo oco, como as Fibras de Bandgap Fotônico (HC-PBG) e as fibras do tipo Kagome [13], [14], [15]. Diversos métodos como o de Marcatili e Schmelzter [16] o método 'ARROW' [17] e o modelo de modos acoplados [18] são aplicados com frequência para explicar os mecanismos de guiamento dessas fibras. No entanto, a modelagem delas ainda depende fortemente de simulações numéricas. Em particular, nesse trabalho, o COM-SOL Multiphysics é utilizado para demonstrar a eficiência dessas fibras como sensor para alguns tipos de gases de grande interesse. Durante as simulações, para aumentar a praticidade de mudança dos parâmetros físicos da fibra, é realizada uma parametrização. O diâmetro externo dos tubos capilares $d_{out}[\mu m]$ é parametrizado em termos de $D_{Core}[\mu m]$ e o número de capilares N , descrito pela eq. (3).

$$d_{out}[\mu m] = \frac{\sin \frac{\pi}{N}}{1 - \sin \frac{\pi}{N}} D_{Core}[\mu m] \quad (3)$$

Devido à alta absorção de diversos gases na região do infravermelho médio (mid-IR), planeja-se que a fibra tenha baixa atenuação nesta região do espectro. Sendo assim, considera-se que a casca é constituída de fluoreto de índio(III) (InF_3), sendo que a variação do índice de refração da sílica em função do comprimento de onda pode ser estimado utilizando a eq.(4). Os coeficientes de Sellmeier usados para aproximar o índice de refração são mostrados na Tabela I.

$$n(\lambda) = \sqrt{\frac{u_0 \lambda[\mu m]^2}{\lambda[\mu m]^2 - u_3^2} + \frac{u_1 \lambda[\mu m]^2}{\lambda[\mu m]^2 - u_4^2} + \frac{u_2 \lambda[\mu m]^2}{\lambda[\mu m]^2 - u_5^2} + A} \quad (4)$$

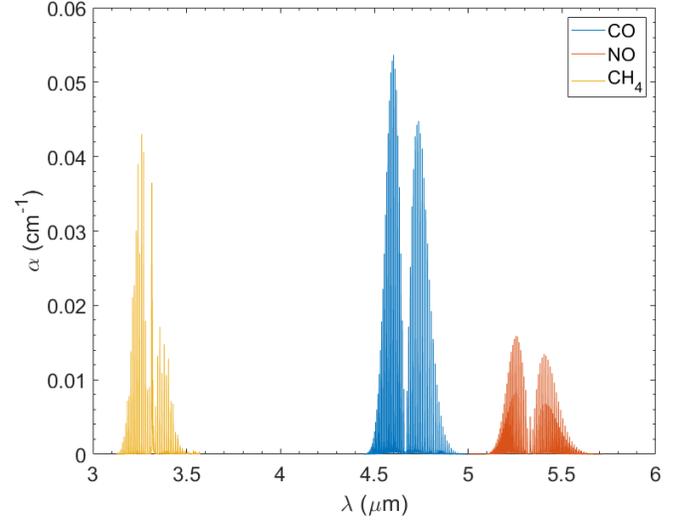


Fig. 3. Espectro de absorção para o infravermelho dos gases CH_4 , CO e NO [19].

Durante a simulação, é considerada uma camada exterior à casca da fibra HC-NCF constituída de ar, apenas para adicionar a condição de contorno camada perfeitamente casada (Perfect Matched Layer, PML) no simulador. Além disso, também considera-se nas bordas exteriores a essa região a condição de dispersão de contorno (Scattering Boundary Condition, SBC). Ademais, na construção da malha de elementos finitos no software o tamanho máximo dos elementos é configurado para ser $1\mu m$.

TABELA I
COEFICIENTES DE SELLMEIER

Coefficientes	Valor
u_0	0,47627338
u_1	0,76936893
u_2	5,01835497
u_3	0,0179549
u_4	0,11865093
u_5	43,6454579
A	1

Para realizar a simulação modal da fibra óptica HC-NCF com a presença de um gás no seu interior, e determinar a transmissão para cada concentração de gás, é fundamental conhecer o coeficiente de absorção $\alpha[cm^{-1}]$. Este coeficiente de absorção se relaciona com o espectro de absorção de um gás pela eq. (5).

$$I[dBm] = I_0[dBm]e^{-\alpha[cm^{-1}]l[cm]} \quad (5)$$

Na eq. (5), $I[dBm]$ é a intensidade da luz transmitida, $I_0[dBm]$ é a intensidade da luz incidente, $\alpha[cm^{-1}]$ é o coeficiente de absorção do gás presente no interior da fibra e $l[cm]$ é o comprimento da célula de gás [4]. O espectro de transmissão dos gases de interesse nesse trabalho é obtido pelas bases de dados [19] e apresentado na Fig. 3.

IV. RESULTADOS

Antes de avaliar o comportamento da HC-NCF com a presença dos gases de interesse, um estudo acerca do material que compõe a fibra é realizado. Sabendo que as fibras ópticas convencionais possuem uma janela de transparência limitada pela absorção da sílica na região do infravermelho médio [1], então foram feitas simulações que comparam o desempenho de uma HC-NCF com as mesmas dimensões, porém com materiais diferentes. Os materiais utilizados foram SiO_2 , amplamente utilizado nas fibras ópticas convencionais, e InF_3 que possui uma janela de transparência muito ampla e constituem fibras ópticas especiais para operar no infravermelho médio.

Os resultados da simulação podem ser observados nas Tabelas II e III, onde são mostrados o índice efetivo calculado e a perda de confinamento para cada comprimento de onda de interesse para uma fibra de SiO_2 e InF_3 , respectivamente. Analisando a Tabela II nota-se que para o comprimento de onda $\lambda = 5263nm$ a utilização de SiO_2 é inviável, devido a perda extremamente alta do dispositivo. Sendo assim, nas próximas simulações é considerado apenas o material InF_3 que compõe a HC-NCF.

TABELA II
ÍNDICE EFETIVO E PERDA PARA UMA FIBRA DE SiO_2

$\lambda(nm)$	Gás	Índice Efetivo	Perda (dB/m)
3260.2	CH4	$0,9998 - j1,9918 \times 10^{-8}$	0,3334
4595	CO	$0,9995 - j1,3080 \times 10^{-7}$	1,5536
5263	NO	$0,9996 - j1,0841 \times 10^{-5}$	112,420

TABELA III
ÍNDICE EFETIVO E PERDA PARA UMA FIBRA DE INF_3

$\lambda(nm)$	Gás	Índice Efetivo	Perda (dB/m)
3260.2	CH4	$0,9998 - j1,6709 \times 10^{-8}$	0,2797
4595	CO	$0,9996 - j3,5191 \times 10^{-9}$	0,0418
5263	NO	$0,9995 - j1,5272 \times 10^{-9}$	0,0158

As simulações modais foram conduzidas para os três gases propostos neste trabalho, e para cada gás é necessário a seleção de uma raia de absorção. As raias são selecionadas por sua força de absorção e pela ausência de outros gases na mesma região, para evitar sensibilidade cruzada e garantir ao sensor monitorar os três gases simultaneamente.

A. Metano

Para o gás CH_4 o comprimento de onda selecionado é $\lambda = 3260,2nm$ devido a forte absorção que esse gás apresenta ao redor desse comprimento de onda. Primeiramente uma simulação sem a presença de gás no interior da fibra é conduzida, para determinar a perda da HC-NCF em $3260,2nm$. O resultado da simulação é um índice efetivo de $neff = 0,999823922729895 - j1,6726694851062177 \times 10^{-8}$, o que representa uma perda de $0,28dB/m$. Um gráfico da intensidade do campo elétrico obtido na simulação é mostrada na Fig. 4.

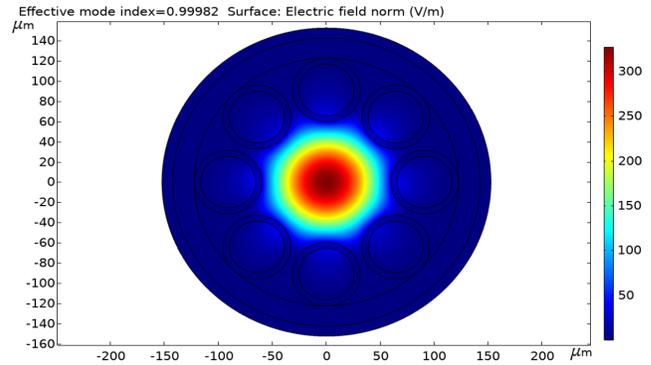


Fig. 4. Modo de propagação da HC-NCF com $D_{core} = 116\mu m$ para $\lambda = 3260,2nm$.

Usando o coeficiente de absorção presente na Fig. 5 [19], a simulação modal é realizada com a presença de gás no interior da HC-NCF. Desta forma, é possível a obtenção de um gráfico de perda de propagação em função da concentração, como mostrado na Fig. 6. Analisando este gráfico, nota-se um comportamento linear da curva de perda em função da concentração indo de 1000 ppm até 1 ppm, que pode ser aproximado pela função $f(x) = 0,0037x + 0,2799$.

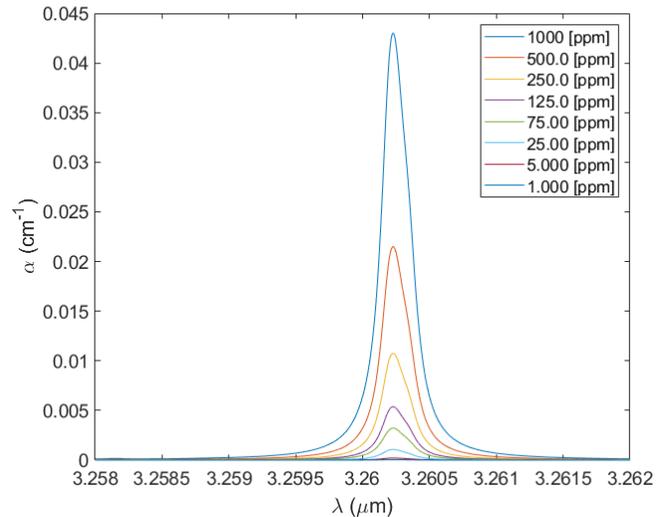


Fig. 5. Coeficiente de absorção de CH_4 para diferentes concentrações.

B. Monóxido de Carbono

Para o gás CO o comprimento de onda de operação selecionado é $\lambda = 4595nm$. De forma similar ao realizado para o CH_4 aqui também é feita uma simulação sem a presença de gás para determinar a perda da fibra em $\lambda = 4595nm$ sem a presença de gás. O resultado da simulação é um índice efetivo de $neff = 0,9996200314903954 - j3,5134967794735914 \times 10^{-9}$, o que representa uma perda de $0,041dB/m$. Como exemplo, um gráfico da intensidade do campo elétrico obtido na simulação é mostrado na Fig. 7.

A partir dos coeficientes de absorção da Fig. 8, é possível realizar a simulação modal com a presença de gás CO no

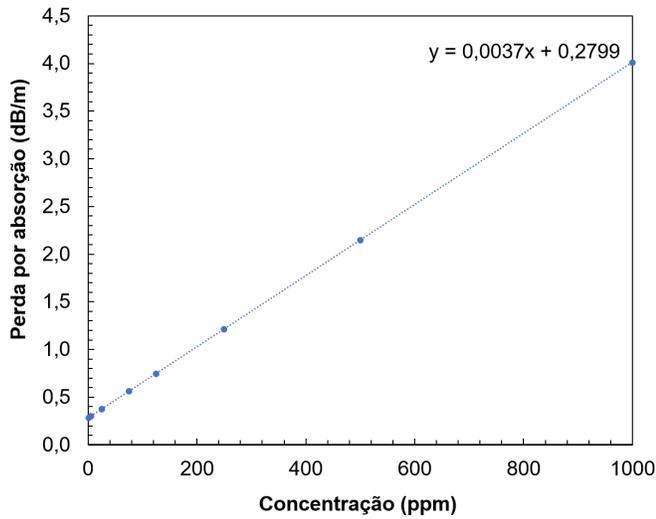


Fig. 6. Perda por absorção em função da concentração de gás CH_4 .

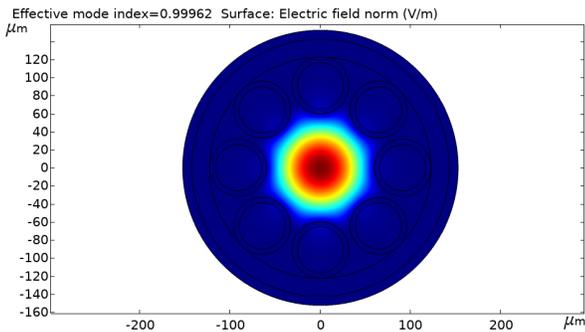


Fig. 7. Modo de propagação da HC-NCF com $D_{core} = 116\mu m$ para $\lambda = 4595nm$.

interior da HC-NCF. Variando a concentração de CO no interior da fibra e medindo a perda resultante, um gráfico de perda de confinamento em função da concentração de gás CO é construído. Este gráfico é mostrado na Fig. 9 e possui comportamento linear que pode ser aproximado pela função $f(x) = 0,0046x + 0,0411$.

C. Monóxido de Nitrogênio

Para o gás NO o comprimento de onda de operação selecionado é $\lambda = 5263nm$. O mesmo procedimento que foi feito para os gases anterior é feito agora para o NO. O resultado da simulação sem a presença de gás para $\lambda = 5263nm$ é um índice efetivo de $n_{eff} = 0,999472046905758 - j1,526264771678304 \times 10^{-9}$, o que represento uma perda de $0,016dB/m$. Um gráfico da intensidade do campo elétrico obtido na simulação é mostrada na Fig. 10.

Sabendo os coeficientes de absorção para cada concentração de gás NO, presentes na Fig. 11, é possível realizar uma simulação variando a concentração e medindo a perda para determinar uma curva de caracterização de perda em função da concentração de gás NO. Esta curva é mostrada na Fig. 12 e pode ser aproximada por uma reta $f(x) = 0,0014x + 0,0163$.

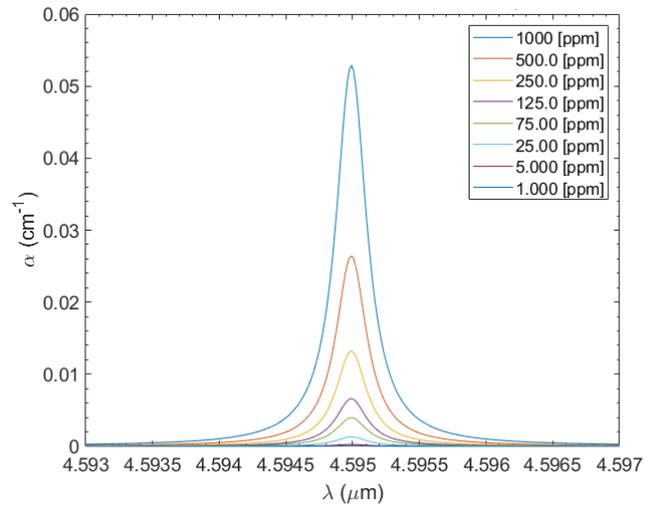


Fig. 8. Coeficiente de absorção em $\lambda = 4595nm$ de CO para diferentes concentrações.

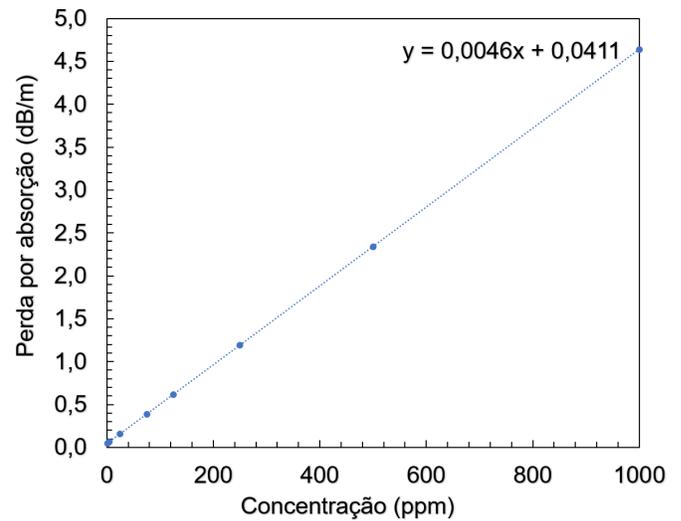


Fig. 9. Perda por absorção em função da concentração de gás CO em $\lambda = 4595nm$.

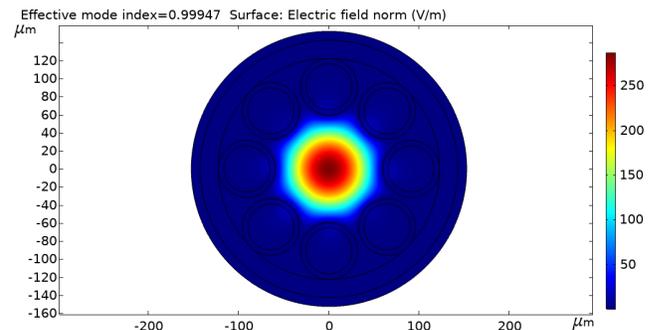


Fig. 10. Modo de propagação da HC-NCF com $D_{core} = 116\mu m$ para $\lambda = 5263nm$.

Pelo fato de o estudo desenvolvido neste trabalho ser

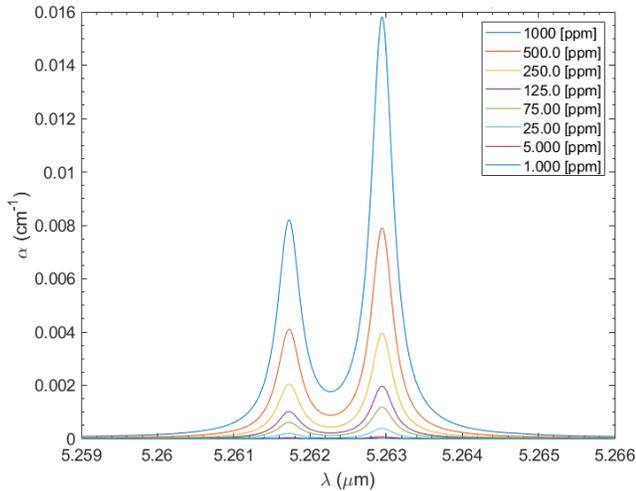


Fig. 11. Coeficiente de absorção em $\lambda = 5263nm$ de NO para diferentes concentrações.

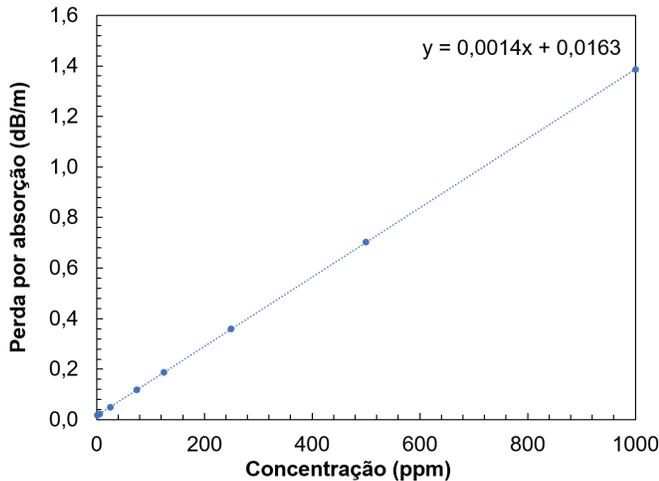


Fig. 12. Perda por absorção em função da concentração de gás NO em $\lambda = 5263nm$.

majoritariamente teórico e realizado por meio de simulações, é importante destacar alguns detalhes que podem ocorrer em sua implementação prática. Primeiro, a presença de furos perpendiculares à fibra para a entrada de gás pode causar efeitos semelhantes às fibras com grade de longo período (Long Period Grating, LPG), que precisam ser consideradas quando o sensor for fabricado. Além disso, a presença de furos na fibra óptica também pode criar cavidades Fabry-Perot adicionais, considerando as duas arestas do revestimento da fibra e dos furos. Os furos para a entrada de gás também podem influenciar o sensor mudando sua resposta do tempo, uma vez que o tamanho desses orifícios influenciará a difusão do gás no núcleo da fibra. Em [20], foi demonstrado que o aumento de micro canais para entrada de gás perpendicular à fibra óptica favorece a rápida difusão do gás para o seu interior. Dessa forma, o projetista deve se atentar na escolha da estrutura da HC-NCF e dimensão dos furos, evitando a

TABELA IV
PERDA DE CONFINAMENTO DA HC-NCF EM 5 PPM DE CH₄, CO E NO

Gás	Concentração (ppm)	Perda (dB/m)
CH ₄	5	0,2984
CO	5	0,0646
NO	5	0,0227

ocorrência dos efeitos do LPG e permitindo a resposta o mais rápido possível para o sensor.

V. MÉTODOS DE INTERROGAÇÃO

Observando os resultados obtidos para perda em função de concentração de gás CH₄, CO e NO nas Fig. 6, 9 e 12, respectivamente, é possível dizer que as curvas apresentaram um comportamento linear. Sendo assim, a HC-NCF utilizada nas simulações apresenta grande potencial para detecção deste gases. Além disso, o fato de operar no infravermelho médio faz com que o sensor seja extremamente sensível, pois apresenta valores mensuráveis de perda para baixas concentrações como mostra a Tabela IV.

A. Caminho Óptico de Referência

Para realizar a detecção simultânea dos três gases de interesse é proposto a configuração experimental da Fig. 13, baseado em [21]. Esta configuração consiste na utilização de três fontes de luz centradas em $\lambda_1 = 3260nm$, $\lambda_2 = 4595nm$ e $\lambda_3 = 5263nm$, estas fontes de luz precisam ter uma largura de linha suficientemente fina para que o comprimento de onda esteja posicionado em somente uma raia de absorção de um gás específico. Posteriormente os sinais provenientes destas três fontes de luz são multiplexados e acoplados em um 'beam splitter'. Na saída do 'beam splitter' uma pequena parte da potência óptica é conduzida para um caminho óptico de referência e a outra parte é levada à HC-NCF para entrar em contato com os gases no ambiente. Após a passagem pela HC-NCF e pela referência os sinais são demultiplexados e comparados. Comparando o sinal proveniente da célula de gás com um sinal de referência é possível mitigar flutuações de potência da fonte de luz [21].

B. OTDR

O método de interrogação proposto é baseado na utilização de reflectometria óptica no domínio do tempo (Optical Time Domain Reflectometry, OTDR) e na espectroscopia por absorção direta que acontece no núcleo vazado das HC-NCF [2]. Como mostrado na Fig. 14, utilizando uma fibra convencional acoplada a pequenos comprimentos de HC-NCF distribuídos em pontos estratégicos de um gasoduto, é possível identificar tanto um vazamento de gás quanto a posição que ocorre este vazamento, como no ponto A (curva vermelha). Em particular, para os comprimentos de onda utilizados nesse trabalho, é fundamental o uso de uma fibra de InF₃ é necessária, devido a janela de transparência reduzida das fibras convencionais.

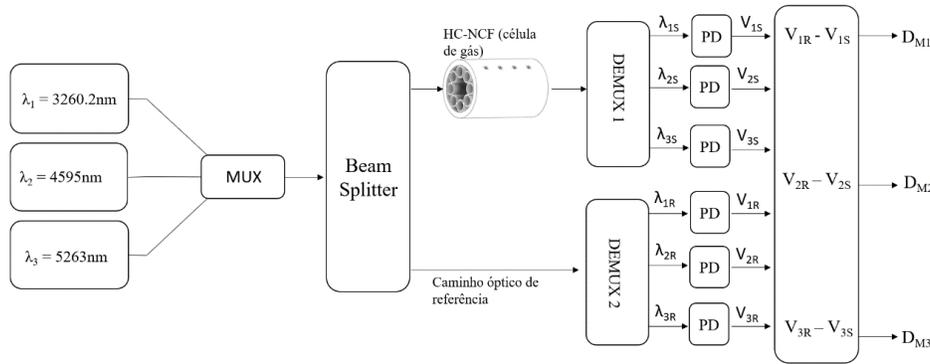


Fig. 13. Diagrama de blocos do sensor de CH₄, CO e NO, onde λ_1 , λ_2 e λ_3 são os comprimentos de onda de absorção dos três gases, respectivamente. MUX é um multiplexador para acoplar os três comprimentos de onda no 'beam splitter'. DEMUX é um demultiplexador usado para separar os três comprimentos de onda. PD são os fotodetectores que vão fornecer a tensão VR e a tensão dos sensores VS.

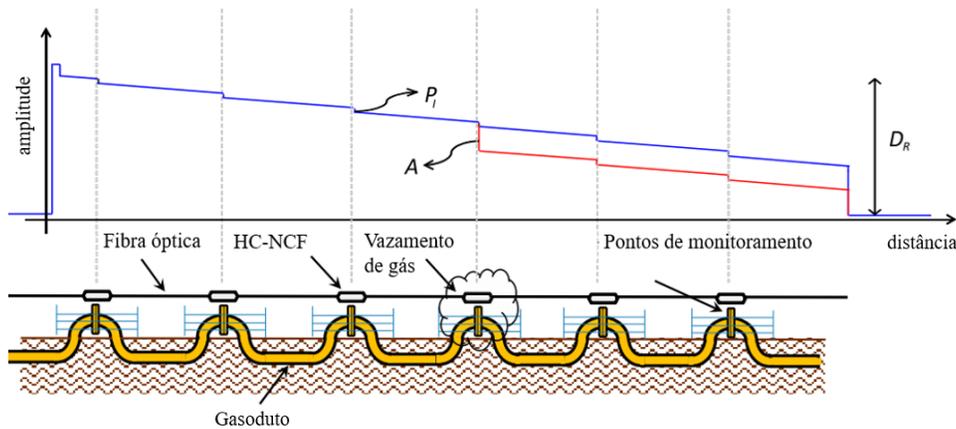


Fig. 14. Sistema de interrogação proposto, onde a curva azul representa uma curva típica de um OTDR e a curva vermelha apresenta a resposta do OTDR quando o sistema é exposto a uma certa concentração de gás.

VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho apresentou um novo sensor óptico baseado em uma única fibra do tipo HC-NCF, possuindo alto potencial para aplicação na detecção simultânea de pequenas concentrações de três gases: ch₄, CO e NO. Esse tipo de detecção somente é possível pois a fibra aqui projetada apresenta baixa perda na região do infravermelho médio e os gases apresentam fortes raias de absorção nesta região do espectro. Além disso, sabe-se que a detecção de pequenas concentrações destes gases é de extrema importância, pois a exposição destes gases pode ser nociva a saúde. Desta forma, a rápida detecção destes gases pode prevenir problemas de saúde. O comportamento da curva de perda de confinamento em função da concentração é linear para os três gases de interesse para faixa de concentração considerada (0 a 1000 ppm). Vale ressaltar que este trabalho pode ser expandido para vários outros gases, sabendo o espectro de absorção do gás desejado, e projetando um HC-NCF de baixa perda em um comprimento de onda que apresenta forte absorção de luz pelo gás de interesse.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Laboratório de Pesquisa em Dispositivos (LPD) da Universidade de Campinas (UNICAMP) e à FAPEMIG pelo apoio computacional.

REFERENCES

[1] F. Yang, W. Jin, Y. Lin, C. Wang, H. Lut, and Y. Tan, "Hollow-Core Microstructured Optical Fiber Gas Sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, no. 16, pp. 3413–3424, 2017. [Online]. Available: <http://jlt.osa.org/abstract.cfm?URI=jlt-35-16-3413>.

[2] C. Floridaia, J. B. Rosolem, J. P. V. Fracarolli, F. R. Bassan, R. S. Penze, L. M. Pereira, and M. A. C. da Motta Resende, "Evaluation of Environmental Influences on a Multi-Point Optical Fiber Methane Leak Monitoring System," *Remote Sensing*, vol. 11, no. 10, p. 1249, May 2019, ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs11101249. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/10/1249>.

- [3] T.-M. Chen, W. G. Kuschner, J. Gokhale, and S. Shofer, "Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects," *The American Journal of the Medical Sciences*, vol. 333, no. 4, pp. 249–256, Apr. 2007, ISSN: 0002-9629. DOI: 10.1097/MAJ.0b013e31803b900f. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1097/MAJ.0b013e31803b900f>.
- [4] J. Hodgkinson and R. P. Tatam, "Optical gas sensing: a review," *Measurement Science & Technology*, vol. 24, no. 1, 2013. DOI: 10.1088/0957-0233/24/1/012004.
- [5] E. Bakker and M. Telting-diaz, "Electrochemical Sensors," vol. 74, no. 12, pp. 2781–2800, 2002. DOI: 10.1021/ac0202278.
- [6] A. M. Pinto, "Photonic-crystal fibers for sensing applications," in *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*, vol. 2012, 2017, pp. 125–150, ISBN: 9781482228298. DOI: 10.1201/b18074.
- [7] D. G. Ouzounov, F. R. Ahmad, D. Müller, N. Venkataraman, M. T. Gallagher, M. G. Thomas, J. Silcox, K. W. Koch, and A. L. Gaeta, "Generation of megawatt optical solitons in hollow-core photonic band-gap fibers.," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 301, no. 5640, pp. 1702–1704, 2003, ISSN: 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1088387.
- [8] A. L. S. Cruz, V. A. Serrão, C. L. Barbosa, and M. A. R. Franco, "3D Printed Hollow Core Fiber with Negative Curvature for Terahertz Applications," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 14, no. June, pp. 45–53, 2015.
- [9] F. Yu, "Hollow core negative curvature optical fibres," no. November, 2013.
- [10] C. M. Harvey, F. Yu, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, and P. J. Almeida, "Reduced Repetition Rate Yb 3 + Mode-Locked Picosecond Fiber Laser With Hollow Core Fiber," vol. 28, no. 6, pp. 669–672, 2016.
- [11] C. C. Novo, A. Urich, D. Choudhury, R. Carter, D. P. Hand, R. R. Thomson, F. Yu, J. C. Knight, S. Brooks, S. McCulloch, and J. D. Shephard, "Negative curvature fibres: exploiting the potential for novel optical sensors," *Optical Fiber Sensors*, vol. 9634, no. 0, p. 963455, 2015. DOI: 10.1117/12.2186755. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2186755>.
- [12] A. N. Kolyadin, A. F. Kosolapov, A. D. Pryamikov, A. S. Biriukov, V. G. Plotnichenko, and E. M. Dianov, "Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region," *Optics Express*, vol. 21, no. 8, pp. 9514–9519, 2013. DOI: 10.1364/OE.21.009514. [Online]. Available: <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=oe-21-8-9514>.
- [13] F. Benabid, J. C. Knight, G. Antonopoulos, and P. S. J. Russell, "Stimulated Raman scattering in hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber.," *Science (New York, N.Y.)*, vol. 298, no. 5592, pp. 399–402, 2002, ISSN: 1095-9203. DOI: 10.1126/science.1076408.
- [14] F. Benabid and P. J. Roberts, "Linear and nonlinear optical properties of hollow core photonic crystal fiber," *Journal of Modern Optics*, vol. 58, no. 2, pp. 87–124, 2011. DOI: 10.1080/09500340.2010.543706. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/09500340.2010.543706>.
- [15] Y. Wang, F. Couny, P. Roberts, and F. Benabid, "Low loss broadband transmission in optimized core-shape Kagome hollow-core PCF," *Lasers and Electro-Optics (CLEO) and Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), 2010 Conference on*, pp. 4–5, 2010, ISSN: 21622701. DOI: 10.1364/CLEO.2010.CPDB4.
- [16] E. A. J. Marcatili and R. A. Schmeltzer, "Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers," *The Bell System Technical Journal*, vol. 43, no. 4, pp. 1783–1809, 1964, ISSN: 0005-8580 VO - 43. DOI: 10.1002/j.1538-7305.1964.tb04108.x.
- [17] M. Duguay, Y. Kokubun, T. L. Koch, and L. Pfeiffer, "Antiresonant Reflecting Optical Waveguides in SiO₂-Si Multilayer Structures," *Applied Physics Letters*, vol. 49, pp. 13–15, 1986. DOI: 10.1063/1.97085.
- [18] A. W. S. Love and J. D., *Optical Waveguide Theory*. 1993.
- [19] L. S. Rothman, R. R. Gamache, A. Goldman, L. R. Brown, R. A. Toth, H. M. Pickett, R. L. Poynter, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Barbe, N. Husson, C. P. Rinsland, and M. A. H. Smith, "The HITRAN database: 1986 edition," *Applied Optics*, vol. 26, no. 19, pp. 4058–4097, 1987. DOI: 10.1364/AO.26.004058. [Online]. Available: <http://ao.osa.org/abstract.cfm?URI=ao-26-19-4058>.
- [20] W. Jin, H. L. Ho, Y. C. Cao, J. Ju, and L. F. Qi, "Gas detection with micro- and nano-engineered optical fibers," *Optical Fiber Technology*, vol. 19, no. 6, Part B, pp. 741–759, 2013, ISSN: 1068-5200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2013.08.004>. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1068520013001107>.
- [21] E. Vargas-Rodriguez, A. Guzmán Chávez, R. Raja Ibrahim, and L. Eusebio Cardoso-Lozano, *Gas Sensor Design Based on a Line Locked Tunable Fiber Laser and the Dual Path Correlation Spectroscopy Method*. Sep. 2017, vol. 7, p. 958. DOI: 10.3390/app7090958.