

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Bernardo Caroli de Souza

Medição de CO_2 usando fibras ópticas microestruturadas

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Orientador: Arthur Martins Barbosa Braga
Coorientador: Sully Milena Mejia Quintero

Rio de Janeiro
Dezembro de 2018

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Nilzo e Eliane, minhas irmãs, Mariana e Gabriela, e meu querido sobrinho, Felipe, todo o amor do mundo a vocês que sempre me apoiaram, deram conselhos, me educaram e me auxiliaram na formação do meu caráter. Minha caminhada até aqui não foi fácil e tenho total certeza que terei o apoio de vocês em todas as etapas a seguir.

Agradeço à todos os professores, desde o Colégio Santo Agostinho até os da PUC-Rio. Hoje, posso dizer que carrego comigo dois dos diplomas mais valorizados desse país, e isto é graças ao esforço dos dedicados mestres que já passaram pela minha vida.

À Sully Quintero, minha coorientadora e supervisora do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, local em que tive o prazer de trabalhar. Sully, meu mais sincero muito obrigado pela ajuda durante toda essa etapa de desenvolvimento do presente trabalho, sou muito grato por suas palavras de carinho e pelos seus conselhos. Não é fácil alcançar o seu posto sendo mulher e estrangeira, te admiro muito por isso.

Aos meus companheiros no LSFO, em especial Isabel, Hugo e Guilherme. Obrigado pela amizade que formei com todos e por terem mantido um ambiente de trabalho que, certamente, jamais terei igual.

Agradeço aos meus amigos do Poker por serem minha válvula de escape nos finais de semana, não teria chegado até aqui sem as piadas diárias dos senhores, as viagens já feitas, os churrascos com cerveja ruim e, principalmente, as idas a festas seja no Rio, em São Paulo ou em qualquer outro lugar do mundo. Vocês são os melhores amigos que alguém poderia ter, que venham muitos anos de amizade.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador, Arthur Braga, pela oportunidade de trabalhar no LSFO, levarei esse aprendizado para sempre em meu coração.

Ao professor Marcos Sebastião de Paula Gomes, por ter financiado minha bolsa durante todo o desenvolvimento do projeto.

Finalmente, agradeço à Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela qualidade no ensino durante todo o meu curso, sou imensamente grato por ter estudado em uma universidade extremamente respeitada no âmbito nacional.

Resumo

Sensor de detecção de CO_2 baseado em fibra óptica microestruturada

O monitoramento do Dióxido de Carbono na atmosfera é de extrema importância para a vida no planeta. Tendo isso em mente, o objetivo principal do presente trabalho é fabricar um sensor de CO_2 a partir da absorção da luz propagada na fibra de cristal fotônico. Em um segundo momento, após a familiarização com os equipamentos da montagem experimental, foi iniciada a calibração do sensor com a injeção e retirada do gás a diferentes concentrações, sempre alternando com a injeção de gás Nitrogênio, de modo a estudar o tempo de difusão do CO_2 . Por último, é feita uma análise comparativa dos dados obtidos pelo teste com o database teórico do Hitran. Os resultados permitem apontar a eficiência do sensor e suas possíveis limitações.

Palavras chaves: Gás Dióxido de Carbono. Sensor de CO_2 . Absorção. Luz. Fibra de Cristal Fotônico. Calibração. Gás Nitrogênio. Tempo de Difusão. Hitran.

Abstract

***CO*₂ detection sensor based on microstructured optical fiber**

Monitoring Carbon Dioxide in the atmosphere is extremely important for life on the planet. With this in mind, the main goal of the present work is to fabricate a *CO*₂ sensor from light absorption propagated in the photonic crystal fiber. In a second moment, after the familiarization with the equipments of the experimental set up, the calibration of the sensor was initiated with the injection and withdrawal of the gas at different concentrations, always alternating with the injection of Nitrogen gas, in order to study the diffusion time of the *CO*₂. Finally, a comparative analysis of the data obtained by the test with the theoretical database of Hitran is made. The results allow to indicate the efficiency of the sensor and its possible limitations.

Key-words: Carbon Dioxide Gas. *CO*₂ Sensor. Absorption. Light. Photonic Crystal Fiber. Calibration. Nitrogen Gas. Diffusion Time. Hitran.

Conteúdo

1	Introdução	8
1.1	Motivação do trabalho	8
1.2	Objetivos	8
1.2.1	Geral	8
1.2.2	Específicos	8
1.3	Estrutura do trabalho.....	9
2	Parte A - Revisão Bibliográfica	10
2.1	Dióxido de Carbono	10
2.2	Sensores convencionais.....	10
2.2.1	Para agricultura e refrigeração	11
2.2.2	Na indústria de bebidas	12
2.2.3	Em sistemas OEM	13
2.3	Fibra Óptica	14
2.3.1	Design de uma fibra óptica genérica	14
2.3.2	Tipos de fibra óptica	15
2.3.3	Lei de Snell-Descartes	15
2.4	Fibra de Cristal Fotônico	16
2.4.1	Fibras com núcleo sólido	17
2.4.2	Fibras com núcleo oco	17
2.4.3	HC-2000-01	18
2.5	Sensores de gás baseados em fibras ópticas microestruturadas	19
2.5.1	"Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers", Detecção de gás usando fibras de cristal fotônico com núcleo oco	19
2.5.2	"A gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber (pcf) and its application for the detection of greenhouse gas (ghg): Nitrous oxide (N_2O)", Célula de gás baseada em fibras de cristal fotônico de núcleo oco (PCF) e sua aplicação para a detecção de gases de efeito estufa: Óxido Nitroso (N_2O)	20
2.5.3	"Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser", Sensor de gás baseado em um laser sintonizável de um anel de fibra de érbio dopado	20
2.6	Lei de Beer-Lambert	20
2.7	Transmitância	21
2.8	Hítan.....	22
2.9	Acoplador Óptico	23
2.10	Detectores	24
3	Parte B - Procedimento Experimental	25
3.1	Equipamentos	25
3.2	Montagem experimental	26

4	Parte C - Resultados	29
4.1	Princípio de funcionamento	29
4.2	Discussão acerca dos resultados	31
4.3	Conclusão	35

Lista de Figuras

1	Sensor de CO_2 GMP252.....	11
2	Sensor de CO_2 dissolvido para bebidas carbonatadas	12
3	Sensor de CO_2 K30 3%	13
4	Estrutura de uma fibra óptica	14
5	Tipos de fibras ópticas	15
6	Perfil microestrutural das fibras PCF de núcleo sólido e de núcleo oco . .	17
7	Esquema da reflexão interna total em uma PCF	17
8	Esquema de bandgap fotônico em uma PCF	18
9	Perfil microestrutural das fibras PCF HC-2000-01.....	18
10	Esquema do sensor	20
11	Perfil esquemático do conceito de Transmitância	21
12	Curva de Transmitância para 10% de CO_2 e pressão total de 1 atm em um caminho óptico de 74 cm	22
13	Exemplo do funcionamento do Hitran.....	23
14	Montagem experimental do sensor de CO_2	27
15	Modelo da caixa usada no experimento	27
16	Modelo esquemático da caixa Fibra Monomodo-Fibra de Cristal Fotônico .	28
17	Modelo esquemático da caixa Fibra de Cristal Fotônico-Fibra Multimodo .	28
18	Gráfico Transmitância (%) X Comprimento de onda (μm) para diferentes concentrações na região desejada	29
19	Gráfico Normalizado da Transmitância (%) X Comprimento de onda (μm) para diferentes concentrações na região desejada	30
20	Curva Transmitância(%) X Concentração de CO_2 para $2.003\mu m$	30
21	Plotagem da transmitância ao longo do tempo de experimento	31
22	Transmitâncias medidas variando-se as concentrações	32
23	Relação Sinal-Ruído em uma linha de absorção para 15% de CO_2	32
24	Plotagem da variação de concentração ao longo do tempo de experimento	33
25	Variação da transmitância e da concentração ao longo do tempo de expe- rimento	33
26	Reta Transmitância Hitran (%) X Transmitância Medida (%)	34

Lista de Tabelas

1	Propriedades físicas da HC-2000-01	19
2	Propriedades ópticas da HC-2000-01	19
3	Especificações dimensionais das Fibras Monomodo	25
4	Especificações ópticas das Fibras Monomodo quanto a Máxima Atenuação	25
5	Especificações ópticas das Fibras Monomodo quanto a Atenuação X Com- primento de onda.....	26
6	Especificações dimensionais das Fibras Multimodo	26
7	Especificações ópticas das Fibras Multimodo quanto a Atenuação	26
8	Especificações ópticas das Fibras Multimodo quanto a Atenuação X Com- primento de onda.....	26
9	Tabela comparativa entre a Transmitância Medida e a Transmitância do Hitran.....	34

1 Introdução

Tratar de um tema relacionado à emissão do dióxido de carbono desencadeia em debates de vastas grandezas pelo assunto ser de extrema relevância para a vida no planeta. Todos os dias, o CO_2 é emitido em grande escala na atmosfera, seja por queimadas ou fotossíntese, por exemplo. Sendo assim, torna-se interessante a criação de sistemas de detecção de gás imunes a interferências, resistentes a ambientes hostis e seguros quanto aos riscos de incêndios e explosões.

Buscando uma alternativa para os produtos já existentes no mercado, opta-se pela utilização de fibras ópticas como base para os sensores de detecção. Inicialmente, o sensor pode ser reduzido e leve, e, além disso, os mesmos podem ser menos propensos à interferências, bem como, serem extremamente eficazes para longas distâncias, conforme o comprimento de onda utilizado.

1.1 Motivação do trabalho

O Dióxido de carbono (CO_2) é um dos gases mais conhecidos e estudados, visto que, é um dos compostos essenciais para a fotossíntese e, principalmente, é um dos componentes gerados durante a queima de combustíveis fósseis. Atualmente os índices de CO_2 são altos e estão correlacionados com as mudanças climáticas. Sendo assim, o seu monitoramento é de suma importância.

Os sensores de dióxido de carbono são bastante utilizados na área de pesquisa e na indústria, em geral. Em sua maioria, são baseados em princípios elétricos, contudo existem outros baseados em efeitos ópticos, químicos, entre outros.

Com isso, neste trabalho de conclusão de curso é exposta uma análise experimental que visa estudar o desempenho de um sensor de CO_2 , a partir da absorção da luz transmitida por uma fibra óptica de cristal fotônico. O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Processos Atmosféricos e Tecnologia de Aerossóis do professor Marcos Sebastião de Paula Gomes, em parceria com o Laboratório de Sensores a Fibra Óptica, coordenado pelos professores Arthur Braga e Sully Quintero.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O objetivo principal do trabalho é avaliar a utilização de uma fibra óptica de cristal fotônico (PCF) no desenvolvimento do sensor de CO_2 .

1.2.2 Específicos

- **Fabricação:** montar um sistema experimental de modo que a luz e o CO_2 se propaguem paralelamente;

- **Calibração:** traçar um gráfico variando-se a concentração a partir de cilindros padrões com 5%,10%,15% e 20% de CO_2 , isto é, injetamos 5%, deixamos estabilizar e repetimos o mesmo procedimento até 20%, retornando a 5% posteriormente. Assim, podemos traçar a sensibilidade da transmitância pela concentração, por exemplo;
- **Tempo de difusão:** estimar o tempo de difusão do CO_2 ao longo da fibra óptica.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho está subdividido em três partes:

- **Parte A:** demonstração dos conceitos básicos, dentre os quais podemos citar: Dioxido de Carbono, Fibra Óptica, Fibra PCF, Acoplador Óptico e Detectores.;
- **Parte B:** parte responsável pela apresentação do procedimento experimental, desde a familiarização com os equipamentos até a fabricação do sensor, montagem da bancada experimental e explicação de como se deram os testes experimentais;
- **Parte C:** análise da montagem experimental, dos resultados finais e da conclusão.

2 Parte A - Revisão Bibliográfica

2.1 Dióxido de Carbono

O dióxido de carbono é um composto inorgânico, formado por uma molécula de carbono e duas de oxigênio, que contribui para diversos fenômenos importantes para a manutenção da vida no planeta, dentre eles: o **efeito estufa** e a **fotossíntese**.

No efeito estufa, o CO_2 juntamente com outros gases como metano e óxido nitroso, são responsáveis por formar uma camada que retém o calor irradiado pela superfície da Terra, fazendo como que a temperatura no planeta seja mantida, possibilitando a sobrevivência de inúmeras formas de vida animal e vegetal.

Por outro lado, com o passar dos anos, o avanço da tecnologia somado ao aumento do número de pessoas, fez com que o efeito estufa se tornasse no grande causador do aquecimento global, ou seja, o excesso de dióxido de carbono emitido para a atmosfera em decorrência da expansão do número de indústrias, trouxe graves consequências, como por exemplo, o derretimento das geleiras e o aumento do nível do mar.

Já a fotossíntese é um fenômeno natural que garante autossuficiência em termos de nutrição à maioria dos seres autotróficos[1], isto é, seres capazes de sintetizar o próprio alimento a partir da matéria inorgânica.

No seu tipo mais comum, os reagentes são CO_2 e H_2O e os produtos $C_6H_{12}O_6$ (glicose), O_2 e H_2O .



2.2 Sensores convencionais

Sensores de dióxido de carbono são dispositivos que medem a presença do mesmo em líquidos e gases. Eles vêm sendo utilizados em diferentes campos tanto no âmbito da pesquisa, quanto no âmbito industrial, de modo a mensurar a quantidade de CO_2 em um ambiente, além de serem capazes de monitorar a qualidade do ar internamente[2]. Por outro lado, trabalhar com dióxido de carbono apresenta certos desafios, visto que o mesmo é de difícil detecção.

A fins de ilustração, foram selecionados três tipos diferentes de sensores disponíveis no mercado, com as suas respectivas aplicabilidades:

2.2.1 Para agricultura e refrigeração



Figura 1: Sensor de CO_2 GMP252
[3]

O sensor de dióxido Vaisala CARBOCAP foi fabricado para medir a concentração de CO_2 na agricultura e refrigeração, principalmente. Ele é um interferômetro que opera na região do infravermelho.

Suas características são:

- **Modelo:** GMP252;
- **Fabricante:** Vaisala;
- **Apropriado para ambientes severos e úmidos;**
- **Faixa de temperatura operacional:** -40 a 60 °C;
- **Faixa de medição:** 0 a 10000 ppm ou até 30000 com precisão reduzida.

2.2.2 Na indústria de bebidas



Figura 2: Sensor de CO_2 dissolvido para bebidas carbonatadas
[4]

O InPro 5500i foi projetado para medições de CO_2 no processo de fabricação de cervejas e bebidas carbonatadas. O sensor se utiliza do método da condutividade térmica para determinar o nível de dióxido de carbono nos líquidos.

Suas características são:

- **Material:** aço inoxidável 316L;
- **Fabricante:** METTLER TOLEDO;
- **Faixa de operação:** 0 a 1000000 ppm;
- **Faixa de pressão:** 0 a 10000 ppm;
- **Faixa de temperatura operacional:** 0 a 50 °C;
- **Sem peças móveis para redução da taxa de falhas e maior tempo de atividade operacional;**
- **Manutenção simples com design higiênico da tampa de membrana.**

2.2.3 Em sistemas OEM



SE-0118
CM-0049

Figura 3: Sensor de CO_2 K30 3%
[5]

Além disso, alguns sensores que são produzidos com a finalidade de servirem como componentes de um sistema. É o caso dos sistemas OEM ou *Original Equipment Manufacturer*.

O sensor de dióxido de carbono da figura 3 foi fabricado de modo a monitorar altos níveis de CO_2 encontrados em tanques de armazenamento ou aplicações biológicas. Ele é um transmissor analógico cujo sinal é direcionado para duas saídas simples: OUT1 e OUT2. Enquanto a primeira saída fornece medições mais gerais, a segunda é responsável por medições mais exatas. Além das leituras de CO_2 , o sensor é capaz de nos informar o status das saídas e modificar os intervalos de saída a qualquer momento.

Suas características são:

- **Modelo:** SE-0118/CM-0049;
- **Fabricante:** CO_2 Meter;
- **Expectativa de vida do sensor:** mais de 15 anos;
- **Faixa de medição:** 0 a 100000 ppm;
- **Faixa de precisão:** 0 a 300 ppm;
- **Sem necessidade de manutenção.**

2.3 Fibra Óptica

Fibra óptica é um filamento flexível, com diâmetro típico de $125\mu m$ e fabricado do vidro ou plástico, sem interferência eletromagnética (caráter dielétrico). As fibras são responsáveis pela condução de luz, imagens e impulsos condicionados, com baixas perdas, tendo um papel muito importante no nosso dia a dia. A transmissão da luz se dá de maneira que um feixe lançado na extremidade da fibra percorre a mesma através de reflexões sucessivas, isso é possível graças à diferença de índice de refração entre o núcleo da fibra e o seu revestimento interno. A partir dessas características e do ângulo de incidência (medida de desvio de um ângulo formado entre o feixe de luz que incide sobre o objeto e a normal), ocorre a reflexão total da luz dentro do núcleo, assim ela permanece no mesmo durante todo o trajeto a ser percorrido.

2.3.1 Design de uma fibra óptica genérica

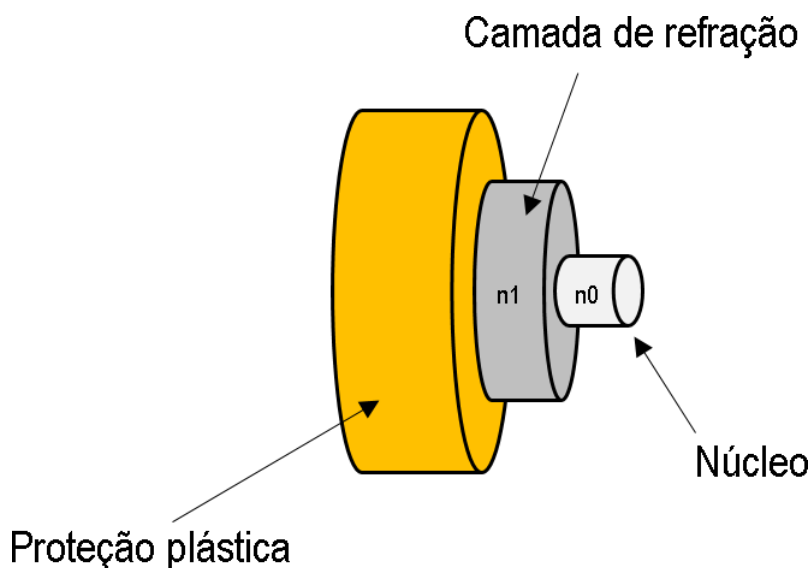


Figura 4: Estrutura de uma fibra óptica

Uma fibra óptica simples tem as seguintes camadas:

1. **Revestimento/Proteção Plástica (Jacket):** proteção externa utilizada para evitar o desgaste natural ou para que qualquer outro tipo de problema devido ao tempo interfira no sistema;
2. **Camada de refração (Cladding):** camada que cobre a fibra. Parte mais importante no processo de transmissão de luz, é responsável pela propagação de todos os feixes, por ter índice de refração menor do que o núcleo.
3. **Núcleo (Core):** parte onde acontecem os pulsos de luz, é no núcleo que a luz viaja por grandes distâncias.

2.3.2 Tipos de fibra óptica

As fibras ópticas são classificadas da seguinte maneira quanto ao modo de propagação:

- **Multimodo (MMF – Multiple Mode Fiber):** fibras com núcleo de, geralmente, $50\mu m$. Garantem a propagação de vários modos ao mesmo tempo, fazendo com que sejam utilizadas em curtas distâncias;
- **Monomodo (SMF – Single Mode Fiber):** diferentemente das fibras multimodo, as fibras monomodo possuem, geralmente, um núcleo de $10\mu m$. Trabalham com apenas um modo de luz, pois possuem uma maior banda passante e menor dispersão, por isso, são utilizadas em longas distâncias entre os transmissores.

Por dispersão entende-se como o processo físico em que a luz é forçada a desviar de sua trajetória devido a discordâncias no meio em que ela passa.

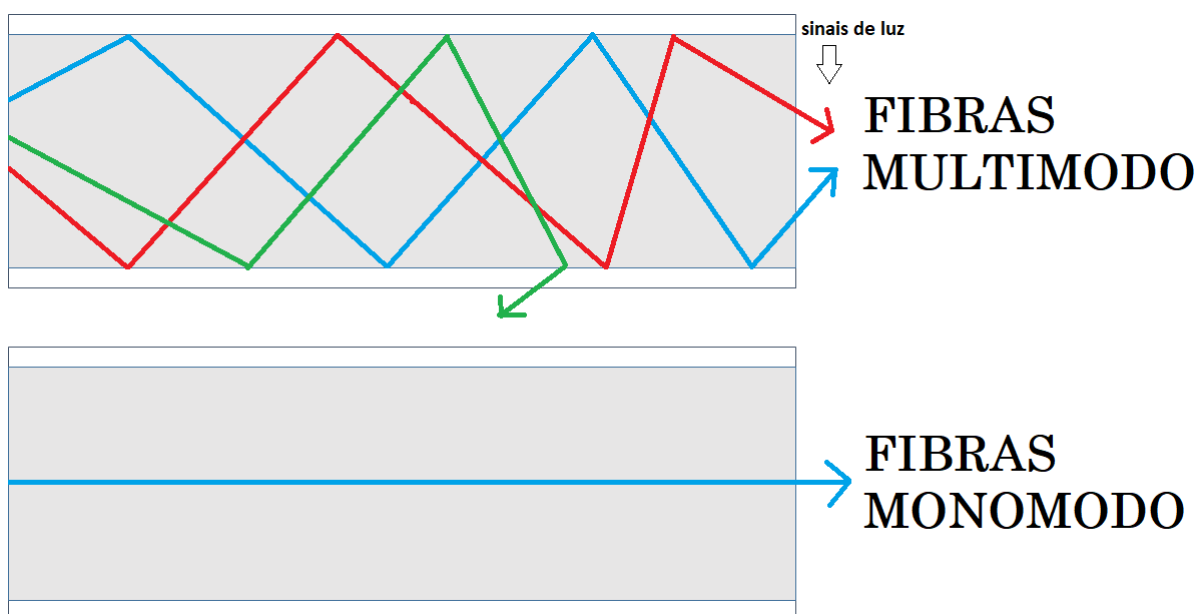


Figura 5: Tipos de fibras ópticas

2.3.3 Lei de Snell-Descartes

A lei de Snell-Descartes ou lei de refração, [6] é uma expressão matemática em homenagem aos cientistas Willebrord Snellius (1580-1626) e René Descartes (1596-1650) muito usada em ótica, que nos dá o desvio angular que um feixe de luz sofre ao passar para um outro meio com índice de refração diferente do qual ele estava percorrendo, isto é, a lei é o retrato da relação entre os ângulos de incidência e refração, quando uma onda (no nosso caso, a luz) passa pela fronteira de dois meios diferentes (núcleo e revestimento interno).[7]

$$n_0 \cdot \sin \theta_i = n_1 \cdot \sin \theta_r \quad (1)$$

Na expressão (1), temos que:

- n_0 : índice de refração do núcleo;
- θ_i : ângulo de incidência;
- n_1 : índice de refração da camada de refração;
- θ_r : ângulo de refração.

Buscando a reflexão total da luz, o ângulo de incidência (θ_i) tem que ser maior do que o ângulo crítico (θ_{crit}). O ângulo crítico é o maior ângulo de incidência possível que ainda resulta em um raio refratado. Para que isso ocorra, sabendo que $n_0 > n_1$, que $\theta_r = 90^\circ$ ($\sin 90^\circ = 1$) e se utilizando da equação (1), temos que:

$$\theta_i = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_0} \right) > \theta_{crit} \quad (2)$$

A partir deste fator, podemos manter a luz dentro do núcleo por todo o trajeto.

2.4 Fibra de Cristal Fotônico

As fibras de Cristal Fotônico são uma nova classe que vêm revolucionando diversas áreas de atuação ao longo dos anos, dentre elas, telecomunicações, medicina, metrologia, desenvolvimento de sensores, melhora da eficiência de emissores de luz e de dispositivos para guiamento de luz, e dispositivos ópticos não-lineares (construção de componentes e circuitos ópticos similares aos eletrônicos que existem hoje). Isso tudo se deve ao físico irlandês Philip Russel, que, em 1995[8], fez a primeira demonstração prática deste tipo de fibra.

Uma das principais vantagens do uso das fibras de cristal fotônico é a grande versatilidade quanto ao design, isto é, há a facilidade na mudança das características primordiais da fibra, como a dimensão do furo ou a disposição dos mesmos, de modo a obtermos uma fibra com propriedades opostas[9]. Por outro lado, há certa desvantagem no uso das mesmas, na questão da atenuação, que é superior à das fibras ópticas convencionais.

Baseado nos quesitos supracitados e, dentre os diversos tipos de fibras ópticas, a fibra de cristal fotônico foi a escolhida para o desenvolvimento do sensor, as mesmas se fazem interessantes, pois, graças aos seus microfuros, é possível que a luz e o CO_2 se propaguem paralelamente.

As PCFs são subdivididas em dois grupos [10]:

- Fibras com núcleo **sólido**: guiam a luz por reflexão interna total (RIT);
- Fibras com núcleo **oco**: guiam a luz por bandgap fotônico.

Na figura 6 vemos um perfil esquemático dos dois tipos mais comuns das fibras de cristal fotônico.

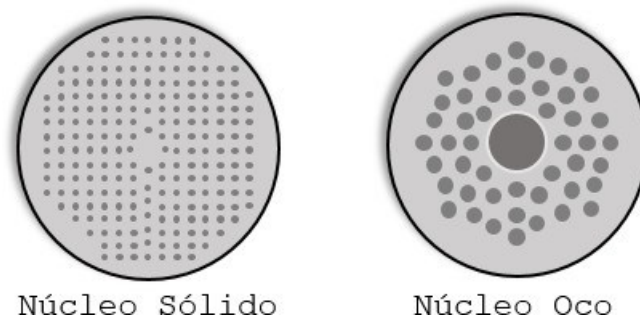


Figura 6: Perfil microestrutural das fibras PCF de núcleo sólido e de núcleo oco

2.4.1 Fibras com núcleo sólido

Nas fibras convencionais, conseguimos o guiamento por RIT (índice de refração do núcleo maior que o da casca: $n_0 > n_1$) a partir da dopagem do núcleo com germanio.

Por outro lado, nas fibras ópticas de cristal fotônico, o guiamento é alcançado inserindo os microfuros de ar na casca, pois, assim, diminuiremos o índice da casca no seu valor médio (n do vidro/material da fibra + n do ar), fazendo com que a luz se propague por reflexões sucessivas.

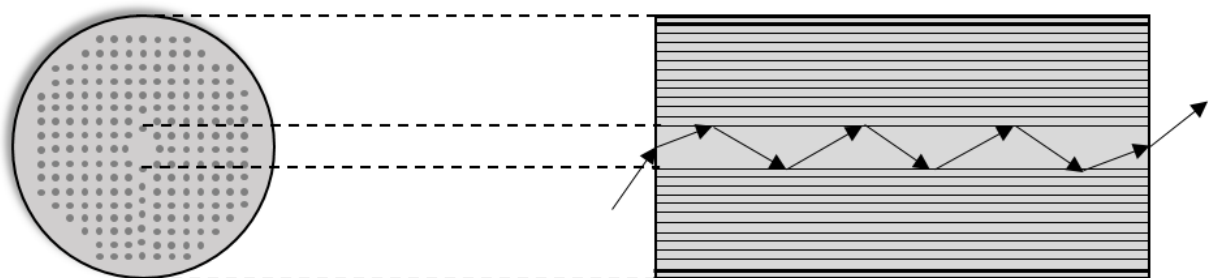


Figura 7: Esquema da reflexão interna total em uma PCF

2.4.2 Fibras com núcleo oco

As fibras com núcleo oco apresentam barreiras periódicas [11] que podem ser representadas por bandas de energia ou intervalos de frequência proibidas para a propagação da luz (*Photonic Band Gap* ou bandgap fotônico), independente de sua direção.

A luz se propaga de maneira que ela cruza as diferentes camadas do elemento, com os respectivos índices de refração n , ocorrendo refração no meio e reflexão limitada nas interfaces entre os materiais distintos.

A onda final é a superposição das ondas refletidas com a onda inicial (ou incidente). Logo, a onda resultante não se propaga ao longo de todo o material, conforme visto na

figura 8 abaixo.

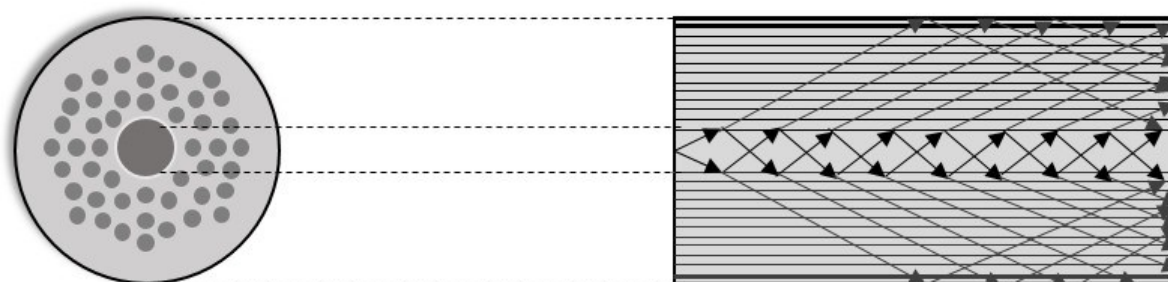


Figura 8: Esquema de bandgap fotônico em uma PCF

2.4.3 HC-2000-01

Para o presente trabalho, foi escolhida a **HC-2000-01**, uma fibra de núcleo oco com um revestimento de furos de ar e sílica no seu entorno.

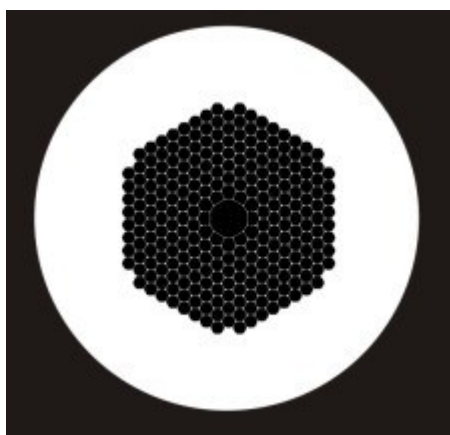


Figura 9: Perfil microestrutural das fibras PCF HC-2000-01
[12]

Dentre as suas principais aplicações podemos citar:

- giroscópios a fibra óptica;
- lasers pulsados (pulso de entrega e / ou compressão);
- espectroscopia de gás;
- comunicação de baixa latência.

Propriedades físicas	
Diâmetro do núcleo	$15 \pm 1 \mu\text{m}$
Pavimento da camada de refração	$4,8 \pm 0,1 \mu\text{m}$
Diâmetro da região PCF	$90 \pm 5 \mu\text{m}$
Diâmetro da camada de refração	$155 \pm 5 \mu\text{m}$
Diâmetro do revestimento	$275 \pm 30 \mu\text{m}$
Material do revestimento	Acrilato de camada única

Tabela 1: Propriedades físicas da HC-2000-01

Propriedades ópticas	
Comprimento de onda padrão	2000 nm
Atenuação a 2000 nm	< 20 db/km
Dispersão de velocidade de grupo típica a 2000 nm	-20 ps/nm/km
Comprimento de onda operacional	1965-2125 nm
Diâmetro do campo de modo estimado a 2000 nm	11 μm

Tabela 2: Propriedades ópticas da HC-2000-01

2.5 Sensores de gás baseados em fibras ópticas microestruturadas

Diversos artigos propuseram a criação de sensores de gases a partir de fibras ópticas microestruturadas. Dentre os quais podemos citar:

2.5.1 "Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers", Detecção de gás usando fibras de cristal fotônico com núcleo oco

Ritari[13] descreve a sensibilidade de um sensor de gás cujo principal objetivo é estudar as linhas de absorção do acetileno e do cianeto de hidrogênio, com o auxílio de um laser sintonizável como fonte de luz.

O sistema é formado por uma fibra de cristal fotônico de núcleo oco unida a uma fibra monomodo convencional na extremidade da entrada visando o fácil acoplamento e preenchido com gás através da outra extremidade colocada em uma câmara de vácuo.

Na figura 10, vemos um esquema do funcionamento prático do sensor.

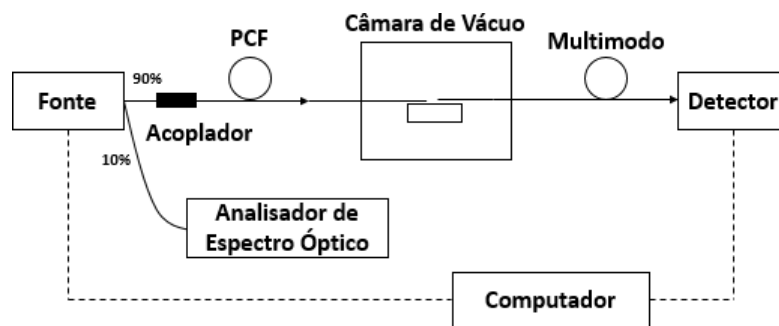


Figura 10: Esquema do sensor

2.5.2 "A gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber (pcf) and its application for the detection of greenhouse gas (ghg): Nitrous oxide (N_2O)", Célula de gás baseada em fibras de cristal fotônico de núcleo oco (PCF) e sua aplicação para a detecção de gases de efeito estufa: Óxido Nitroso (N_2O)

Neste artigo, Valiunas[14] relata que o Óxido Nitroso (N_2O) é detectado através de um fenômeno conhecido como espectroscopia de absorção intracavitária de fibra de laser.

O ensaio experimental é composto por uma célula de gás baseada em uma PCF de núcleo oco, que é usada dentro de uma cavidade de laser de anel de fibra como uma célula de gás intracavidade, cujo comprimento de onda escolhido corresponde à uma das linhas de absorção do gás desejado.

2.5.3 "Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser", Sensor de gás baseado em um laser sintonizável de um anel de fibra de érbio dopado

Zheng[15] descreve neste artigo a dificuldade em se quantificar as emissões de gases de subprodutos industriais, especialmente quando há a presença de diferentes espécies de gases.

É proposto, então, um sistema de detecção espectroscópica do Amoníaco (NH_3) a partir da combinação de uma fibra de cristal fotônico (PCF) com um mecanismo denominado grade de fibra de longo período (LPG), que é, basicamente, uma ferramenta que acopla o modo guiado com os modos da camada de revestimento da PCF. Desta forma, a montagem acima descrita é sincronizada com um laser sintonizável de anel de fibra de érbio dopado, completando-se, assim, o sensor espectroscópico de absorção termoestável.

2.6 Lei de Beer-Lambert

Os gases, de maneira geral, possuem espectros de absorção característicos, isto é, faixas estreitas de comprimentos de onda em que uma substância absorve a luz[16], conforme a estrutura molecular de cada um. Algumas regiões possuem comprimentos de onda exclusivos a apenas um dos gases presentes na atmosfera. Por exemplo, a figura principal

do presente trabalho, o CO_2 , apresenta linhas de absorção em 1954,5 nm, 1997,0 nm e 2003,5 nm. Numa cavidade de comprimento óptico fixo, a absorbância (faixa estreita de comprimentos de onda em que a luz é absorvida) de um feixe é diretamente relacionada com a concentração de um gás, a partir da **Lei de Beer-Lambert**[17].

$$I_{\lambda}(x) = I_o * \exp^{-\alpha(\lambda)x} \quad (3)$$

Nela, é estudada a intensidade da luz transmitida I_{λ} , onde I_o é a intensidade da luz incidente, x é o caminho óptico percorrido pela luz em um meio homogêneo com coeficiente de atenuação α .

2.7 Transmitância

A transmitância é responsável pela atenuação (perda gradual de intensidade de qualquer tipo de fluxo através de um meio) que um feixe luminoso sofre ao se deparar contra outra matéria opticamente ativa.

É a razão calculada a partir da Lei de Beer-Lambert entre a quantidade de luz que passa por determinado meio pela quantidade de luz que incide sobre o meio.

$$T = \frac{I}{I_o} \quad (4)$$

Na figura 11, vemos a intensidade da luz incidente I_o , o meio de comprimento L e a intensidade da luz transmitida I .

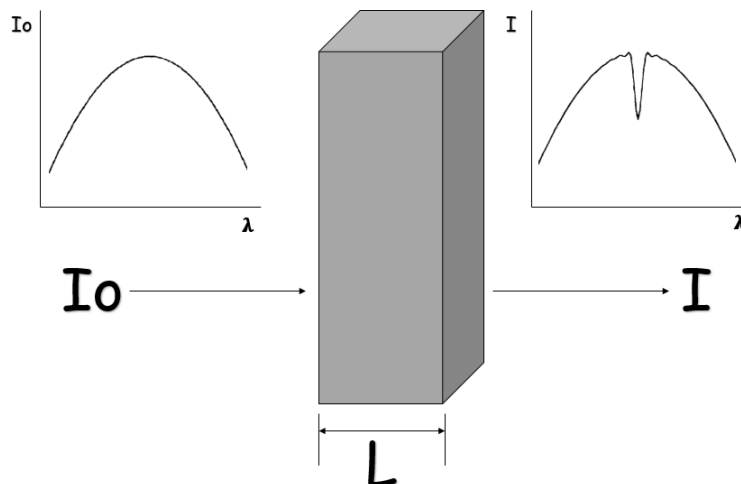


Figura 11: Perfil esquemático do conceito de Transmitância

A figura 12 mostra, a título de ilustração, as linhas de absorção da luz a 10% de CO_2 , pressão total a 1 atm e tamanho do caminho óptico de 74cm, segundo o Hitran (ver seção

2.8).

A região de $1,58\mu\text{m}$ não é boa de ser trabalhada, uma vez que apresenta uma atenuação muito baixa, o que, segundo a Lei de Lambert-Beer, ocasionaria em um aumento do percurso óptico, tendo, como consequência, um aumento significativo nos custos para a realização do projeto.

Já as outras regiões exploráveis indicadas na figura ($1,954\mu\text{m}$ e $2,003\mu\text{m}$) apresentam boas curvas de atenuação. Com isso, a escolha entre elas se dará por opção do operador, dependendo de fatores como aplicação específica e comprimento total da fibra disponível.

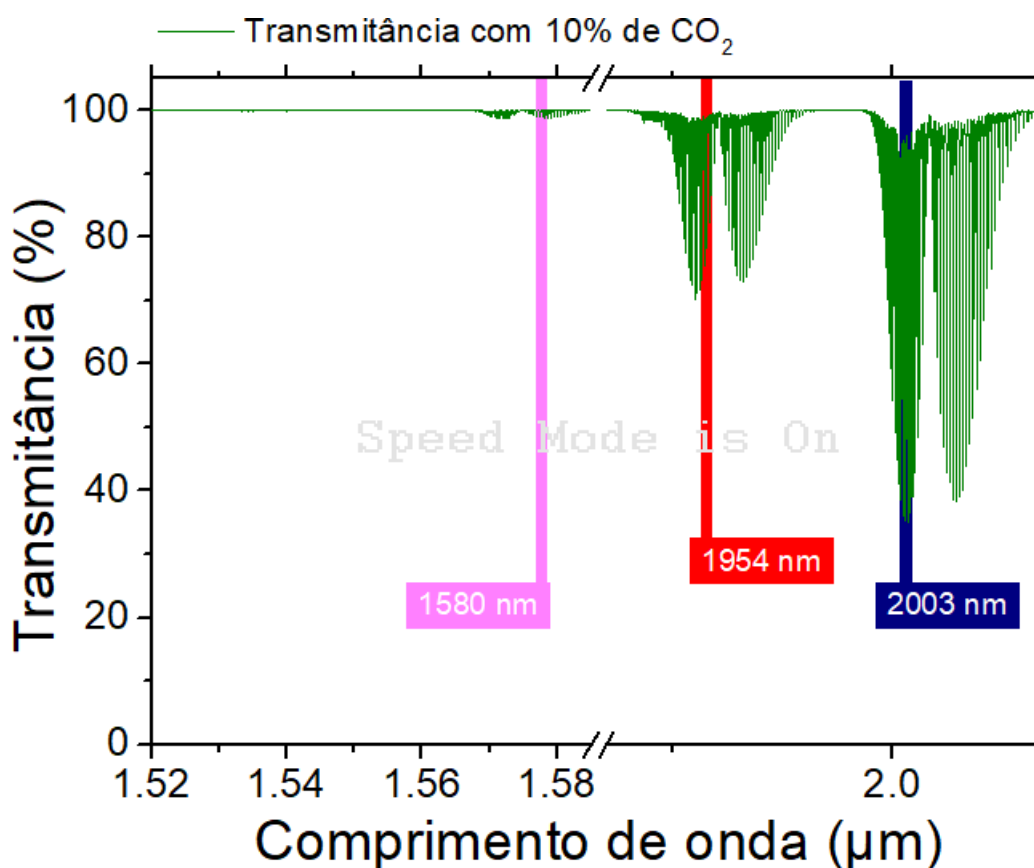


Figura 12: Curva de Transmissão para 10% de CO₂ e pressão total de 1 atm em um caminho óptico de 74 cm

2.8 Hitran

O HITRAN (*High resolution transmission molecular absorption database*) é um banco de dados online de fácil acesso fornecido pela Thorlabs, fruto da compilação de parâmetros espectroscópicos feitos para prever como deveria se comportar a transmissão da luz passando por uma célula de gás[18]. Diferentemente do modelo teórico, um database é feito a partir de experimentos que nos dá um conjunto de dados ideais.

Nele, o usuário preenche alguns parâmetros de modo a obter os dados necessários. Esses parâmetros são:

- pressão parcial do gás;
- intervalo do comprimento de onda do feixe luminoso que se deseja estudar;
- comprimento da célula que se encontra o gás;
- pressão total;
- temperatura do ambiente;
- intervalo do comprimento de onda em que devemos capturar os dados (em cm^{-1}).

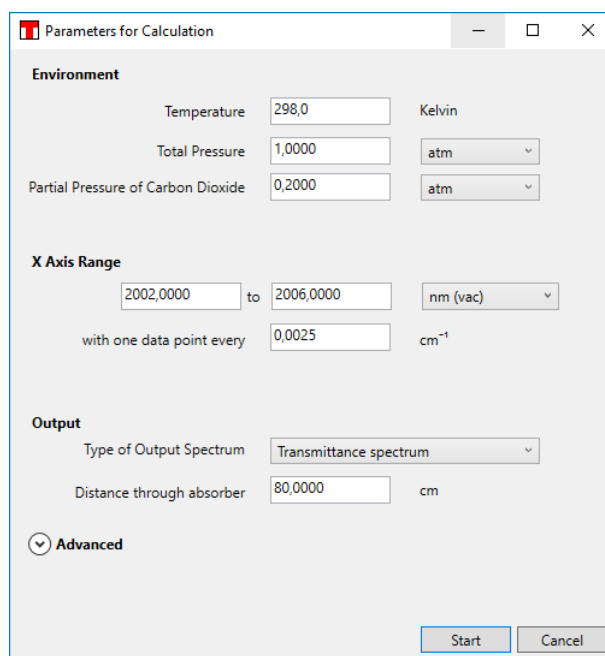


Figura 13: Exemplo do funcionamento do Hitran [19]

2.9 Acoplador Óptico

Um acoplador óptico é um dispositivo usado em sistemas ópticos para dividir o sinal transmitido com uma ou mais fibras de entrada e uma ou várias fibras de saída sem a necessidade de meios físicos. A distribuição de energia da luz pode depender do comprimento de onda e da polarização.

Os acopladores podem ser fabricados de diferentes maneiras, entre elas, fundindo termicamente fibras para que seus núcleos entrem em contato direto. Para o caso de todas as fibras envolvidas serem monomodos, existem certas restrições físicas no desempenho do

acoplador, como, por exemplo, a impossibilidade de combinarmos duas ou mais entradas da mesma frequência óptica em uma saída de polarização única sem perdas excessivas significativas.

2.10 Detectores

Detectores ou sensores são dispositivos capazes de detectar ou perceber um certo fenômeno físico, químico ou biológico. Não podem ser confundidos com transdutores, visto que, enquanto os sensores apenas recebem e informam sobre o estímulo, os transdutores transformam o sinal em outro.

Em um termômetro, por exemplo, o mercúrio que irá se expandir com o aumento da temperatura atua como o detector, enquanto o tubo capilar que contém o mercúrio com uma escala é o transdutor. Assim sendo, um sensor pode ter intrínseco a ele um transdutor. Logo, o termômetro pode ser um sensor de temperatura. Entretanto, um transdutor sozinho não necessariamente é um sensor, pois ele apenas converte um estímulo em outro.

3 Parte B - Procedimento Experimental

3.1 Equipamentos

Os equipamentos necessários para a realização do experimento são os seguintes:

1. Laser sintonizável

- **Fabricante:** IPG Photonics;
- **Modelo:** SFTL-CR-ZNS-2000-100-50;
- **Comprimento de onda central (em nm):** 2000;
- **Intervalo de sintonia (em nm):** 100.

2. Detectores

- **Fabricante:** Thorlabs;
- **Modelo:** PDA10D - InGaAs Amplified Detector;
- **Limites operacionais para comprimento de onda (em μm):** 1,2 a 2,6;
- **Faixa de temperatura operacional (em $^{\circ}\text{C}$):** 10 a 50;
- **Largura da banda máxima (em kHz):** 15000.

3. Fibra Monomodo [20]

Especificações dimensionais	
Onda da fibra	≥ 4 m de raio de curvatura
Diâmetro da camada de refração	$125 \pm 0,7 \mu\text{m}$
Concentricidade Núcleo-Camada	$\leq 0,5 \mu\text{m}$
Não circularidade da Camada	$\leq 0,7 \%$
Diâmetro da camada de proteção	$242 \pm 5 \mu\text{m}$
Concentricidade Proteção-Refrção	$\leq 12 \mu\text{m}$

Tabela 3: Especificações dimensionais das Fibras Monomodo

Especificações ópticas - Máxima Atenuação	
Comprimento de onda (nm)	Valor máximo (db/km)
1310	$\leq 0,32$
1383	$\leq 0,32$
1490	$\leq 0,21$
1550	$\leq 0,18$
1625	$\leq 0,20$

Tabela 4: Especificações ópticas das Fibras Monomodo quanto a Máxima Atenuação

Especificações ópticas - Atenuação X Comprimento de onda		
Range (nm)	λ de Referência (nm)	Diferença Máx α (db/km)
1285-1330	1310	0,03
1525-1575	1550	0,02

Tabela 5: Especificações ópticas das Fibras Monomodo quanto a Atenuação X Comprimento de onda

4. Fibra Multimodo [21]

Especificações dimensionais	
Diâmetro do Núcleo	$50 \pm 2,5 \mu\text{m}$
Diâmetro da camada de refração	$125 \pm 1 \mu\text{m}$
Concentricidade Núcleo-Camada	$\leq 1,5 \mu\text{m}$
Não circularidade da Camada	$\leq 1 \%$
Não circularidade do Núcleo	$\leq 5 \%$
Diâmetro da camada de proteção	$242 \pm 5 \mu\text{m}$
Concentricidade Proteção-Refração	$\leq 12 \mu\text{m}$

Tabela 6: Especificações dimensionais das Fibras Multimodo

Especificações ópticas - Atenuação	
Comprimento de onda (nm)	Valor máximo (db/km)
850	$\leq 2,3$
1300	$\leq 0,6$

Tabela 7: Especificações ópticas das Fibras Multimodo quanto a Atenuação

Especificações ópticas - Atenuação X Comprimento de onda			
Raio do Mandril (nm)	Número de Turnos	Atenuação induzida (db)	
		850 nm	1300 nm
15	2	$\leq 0,1$	$\leq 0,3$
7,5	2	$\leq 0,2$	$\leq 0,5$

Tabela 8: Especificações ópticas das Fibras Multimodo quanto a Atenuação X Comprimento de onda

5. Fibra PCF - HC-2000-01

- Conforme descrito na subseção 2.4.3, página 19

3.2 Montagem experimental

O procedimento experimental mostrado na figura 14 é composto por um laser sintonizável acoplado a uma fibra óptica monomodo, esta está conectada a um acoplador

óptico (50/50), que divide o sinal de luz igualmente entre as duas fibras. No braço de cima está o detector 1, que informa a natureza do sinal sem a atuação do CO_2 e, no braço de baixo, temos um sistema formado pela caixa da figura 16, a fibra de cristal fotônico, a caixa da figura 17 e a fibra multimodo, seguida do detector 2. Ambos os detectores estão conectados ao computador, para que seja visualizado o sinal óptico e o histórico de concentração do CO_2 .

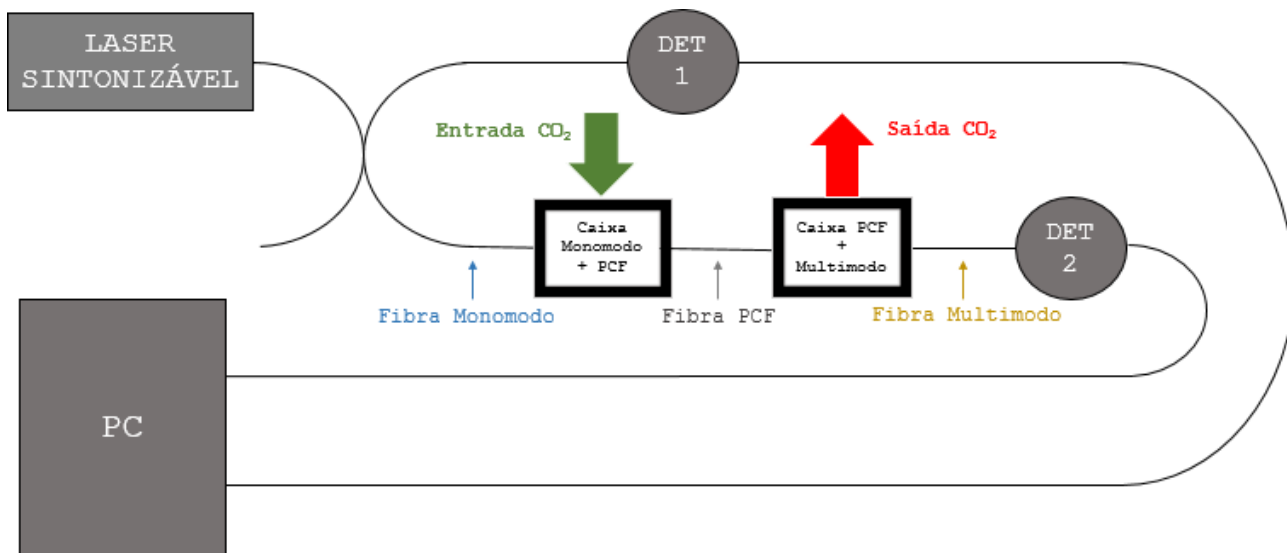


Figura 14: Montagem experimental do sensor de CO_2

O perfil da caixa que permitiu que o gás entrasse em contato com os microfuros presentes na fibra de cristal fotônico é mostrado na figura 15. A mesma foi concebida com o auxílio de uma impressora 3D.

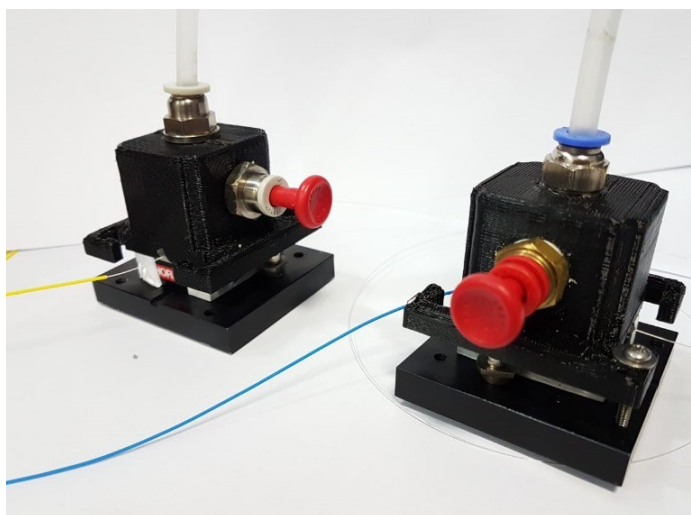


Figura 15: Modelo da caixa usada no experimento

Na figura 16, é exibida a primeira caixa, na qual o CO_2 é injetado pelo canal localizado na parede superior da mesma, entrando em contato direto com a luz que é propagada na

aproximação entre a fibra monomodo convencional e a fibra de cristal fotônico. Enquanto na figura 17, é demonstrada a segunda caixa, em que o CO_2 é retirado no exato momento em que ocorre a aproximação da fibra de cristal fotônico com uma fibra multimodo convencional.

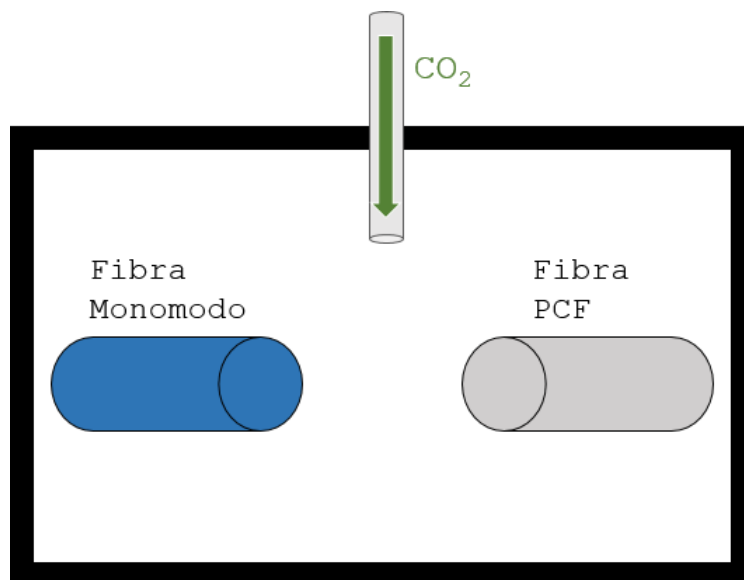


Figura 16: Modelo esquemático da caixa Fibra Monomodo-Fibra de Cristal Fotônico

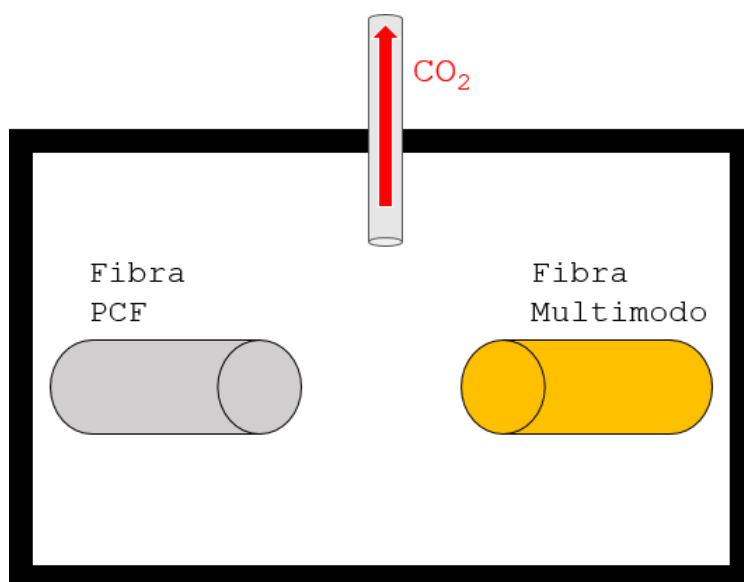


Figura 17: Modelo esquemático da caixa Fibra de Cristal Fotônico-Fibra Multimodo

4 Parte C - Resultados

4.1 Princípio de funcionamento

Para simular a absorção da luz, foi utilizado o *database* Hitran de modo a avaliar as diferentes concentrações do CO_2 . Na figura 18, são apresentadas as curvas de transmitância para concentrações de 5%, 10%, 15% e 20%, fornecidas pelo Hitran. Porém, tanto o ponto mínimo quanto os máximos em ambos os lados das curvas diminuem conforme aumentamos a concentração, logo, por consequência, para que não ocorra erros na análise da eficiência do sensor, as curvas foram normalizadas, como visto na figura 19, para que a linha de 100% de transmitância fosse considerada como base.

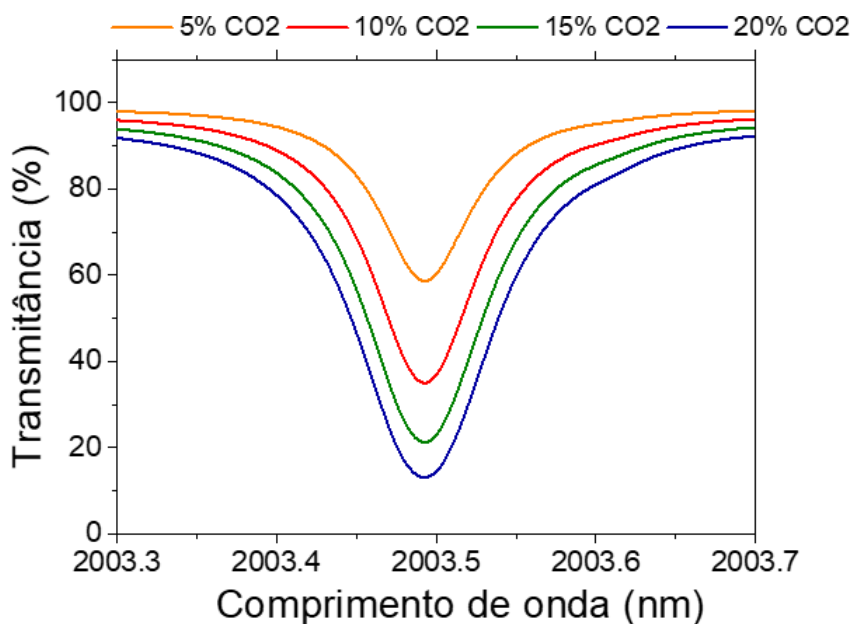


Figura 18: Gráfico Transmitância (%) X Comprimento de onda (μm) para diferentes concentrações na região desejada

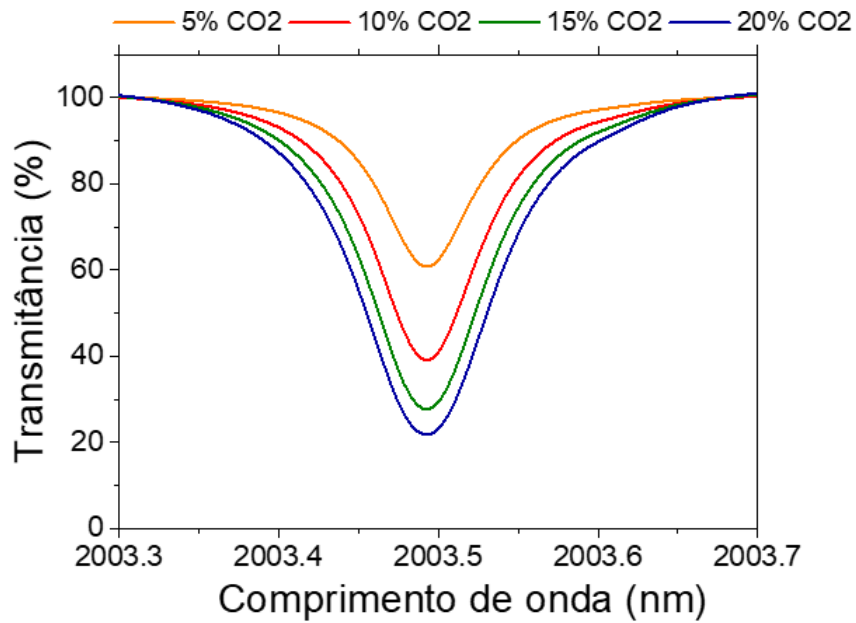


Figura 19: Gráfico Normalizado da Transmitância (%) X Comprimento de onda (μm) para diferentes concentrações na região desejada

Os vales de transmissão normalizados deram origem à figura 20, que mostra a curva exponencial da transmitância pela concentração em um percurso óptico de $74cm$.

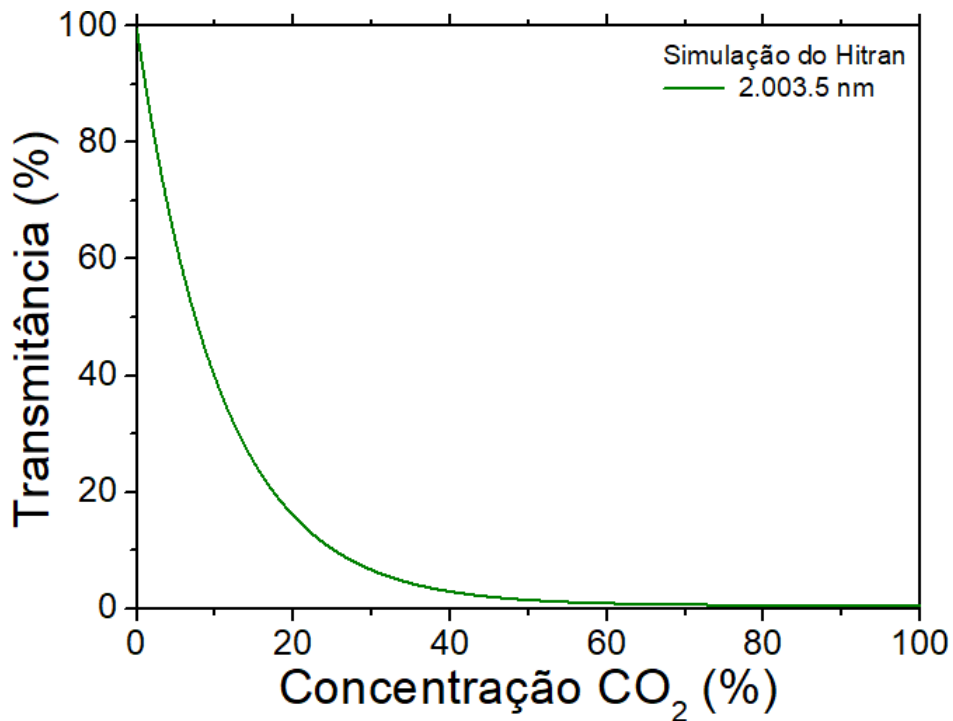


Figura 20: Curva Transmitância(%) X Concentração de CO_2 para $2.003\mu m$

A curva acima é caracterizada pela seguinte expressão:

$$T = 99,01 * \exp \left[\frac{-C}{10,73} \right] + 0,58 \quad (5)$$

Onde T é a transmitância normalizada e C é a concentração de CO_2

4.2 Discussão acerca dos resultados

Primeiramente, deve-se informar que visando qualificar o desempenho geral do sensor, foi feita a calibração do mesmo com a injeção de CO_2 a concentrações de 5%, 10%, 15% e 20%, intercalada com a de outro gás, o gás Nitrogênio (N_2), de modo a "limpar" o sistema e assim, estimar o tempo de difusão do gás.

A figura 21 mostra a transmitância a 2003, 5nm durante os ciclos de gás citados acima (assinalados na figura com a cor cinza), bem como, o tempo de resposta do sistema de aproximadamente 10 minutos.

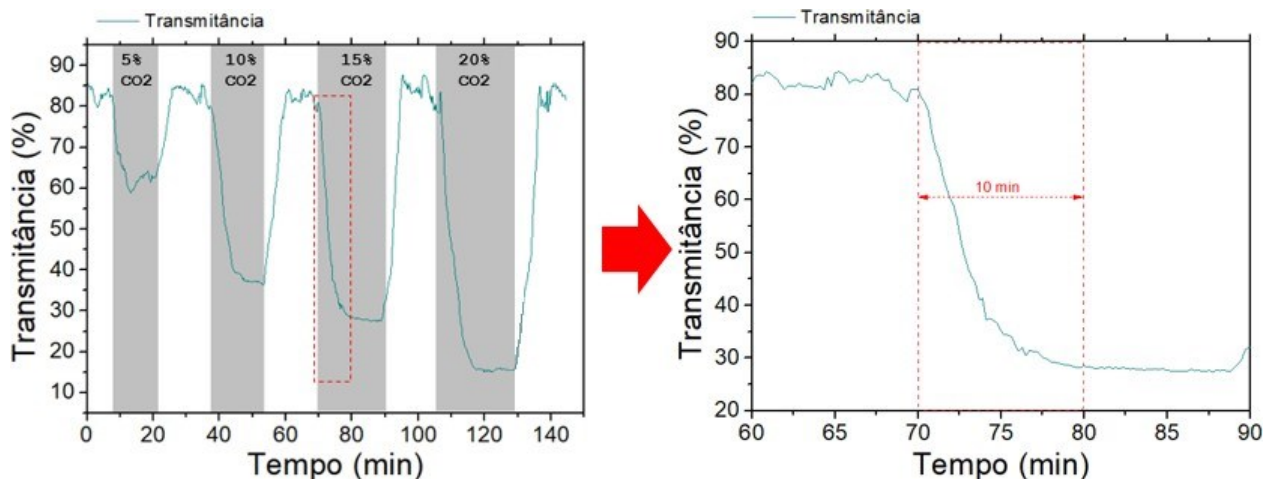


Figura 21: Plotagem da transmitância ao longo do tempo de experimento

É notório que o desvio padrão decresce conforme aumentamos a concentração do CO_2 . A figura 22 mostra o comportamento da transmitância medida para diferentes concentrações, fazendo com que entendamos o porquê do desvio padrão diminuir ao passo que aumentamos a concentração do CO_2 . O vale de transmissão para 20% tem largura menor se comparado ao de 5%, por exemplo, conseqüentemente, o desvio padrão será menor, uma vez que a transmitância é calculada pela média dos valores do sinal presente no vale de transmissão.

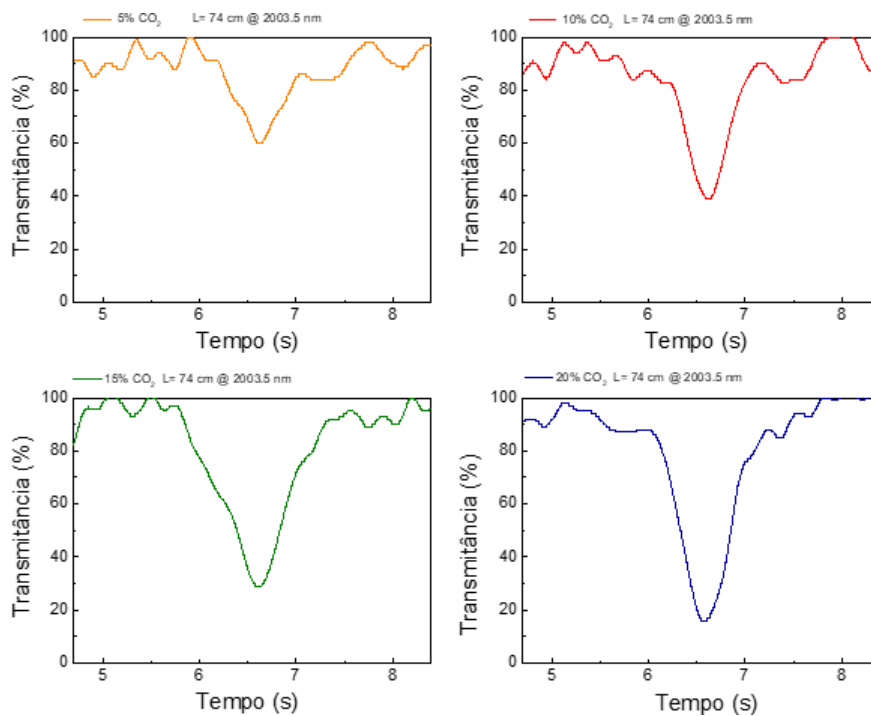


Figura 22: Transmitâncias medidas variando-se as concentrações

A parte superior das curvas representam o ruído da medição, enquanto a inferior representa o sinal propriamente dito, ou seja, a parte que é conveniente, como mostrado na figura 23.

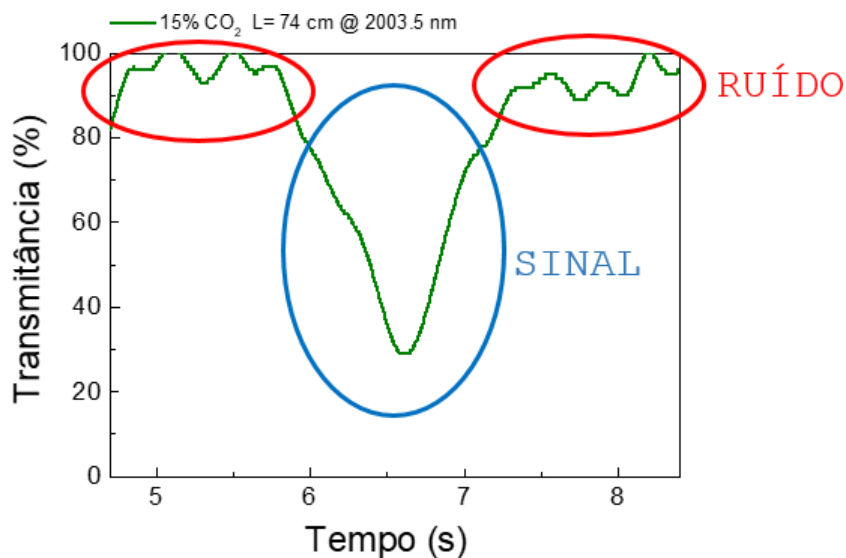


Figura 23: Relação Sinal-Ruído em uma linha de absorção para 15% de CO₂

Analisando novamente a figura 20, vemos que há uma relação de proporcionalidade entre a transmittância e a concentração. Com isso, munidos da expressão 5, invertamos

os valores de modo a encontrar o gráfico do comportamento da concentração de CO_2 ao longo do tempo de experimento, mostrado na figura 24.

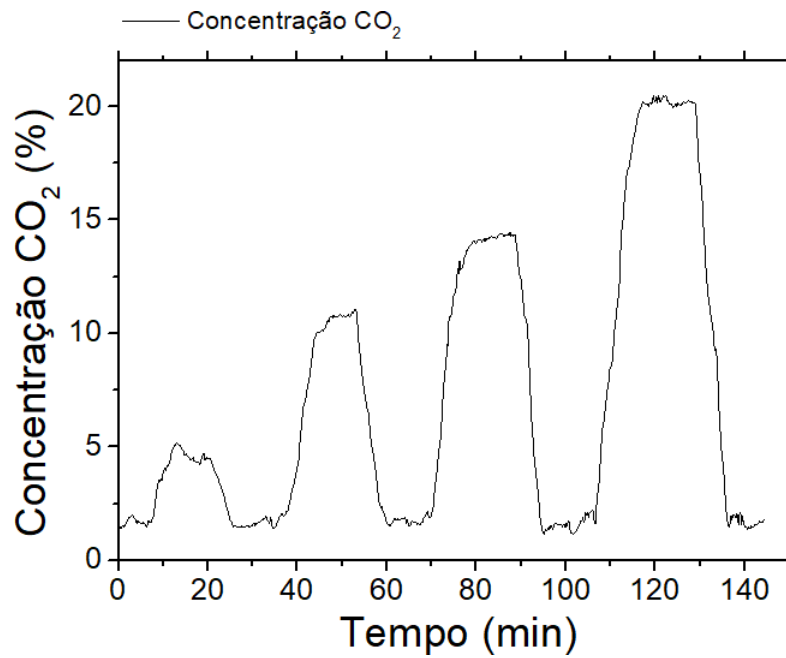


Figura 24: Plotagem da variação de concentração ao longo do tempo de experimento

Como mencionado anteriormente, a transmitância e a concentração são inversamente proporcionais, o que é comprovado, a título de curiosidade, na figura 25, na qual a transmitância está em verde e a concentração em preto.

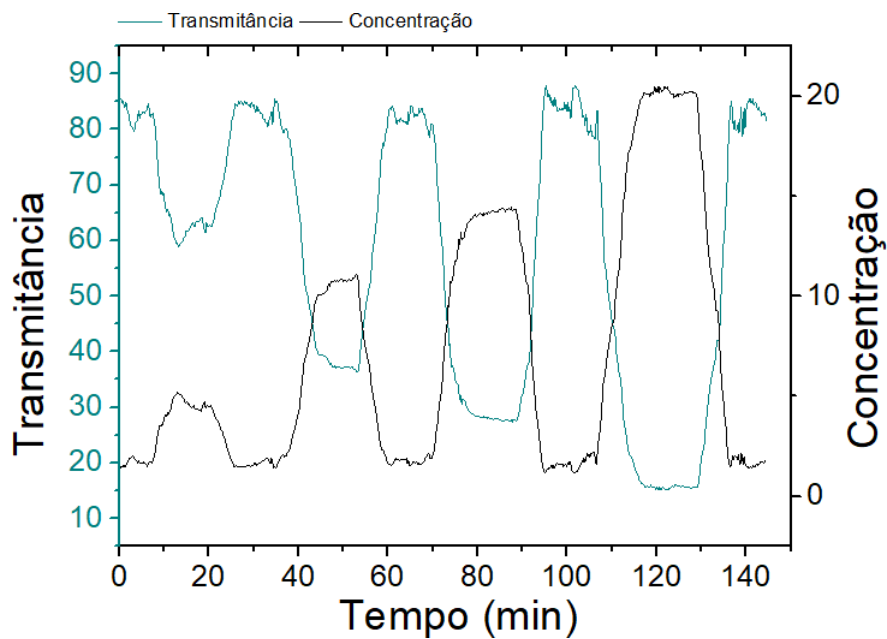


Figura 25: Variação da transmitância e da concentração ao longo do tempo de experimento

A fim de facilitar a compreensão dos gráficos acima expostos, foi criada a tabela abaixo, composta pelas concentrações de CO_2 , o valor da Transmitância normalizada (Hitran), o valor da Transmitância medida no teste e, finalmente, o respectivo desvio padrão.

Transmitância			
Concentração (%)	Hitran normalizado (%)	Medido (%)	Desvio (%)
5	62,84751	62,011	1,548
10	39,76411	37,605	0,923
15	25,02106	28,147	0,675
20	16,11907	15,716	0,621

Tabela 9: Tabela comparativa entre a Transmitância Medida e a Transmitância do Hitran

Para melhor entendimento do funcionamento do sensor, temos a figura 26, onde o eixo das abcissas corresponde à Transmitância fornecida pelo Hitran e o eixo das ordenadas à Transmitância medida durante o teste experimental. Destaca-se também outros dois fatos: que os erros em vermelho representam os desvios padrão para cada concentração de CO_2 e que a reta que melhor representa o desempenho do sensor está indicada em verde ($y = 0,9559 \cdot x + 1,63$).

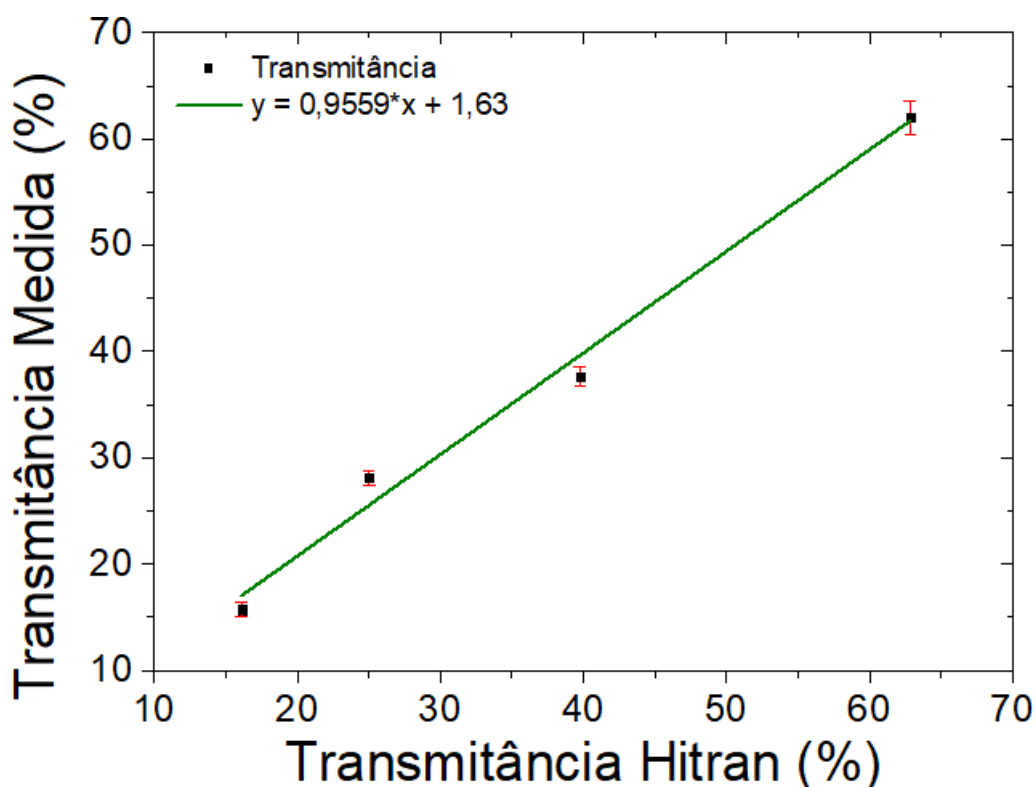


Figura 26: Reta Transmitância Hitran (%) X Transmitância Medida (%)

[22]

4.3 Conclusão

Ao final do presente trabalho, chegamos à conclusão de que a montagem de um sensor de CO_2 baseado em uma fibra de cristal fotônico é efetiva, podendo ser uma alternativa atrativa para a solução de problemas da indústria.

O sensor opera numa faixa que varia entre 2% e 100%, pois há muito ruído para concentrações menores do que 2%, com um tempo de resposta de 10 min. Embora existam diferenças evidentes entre o teórico e o medido presente na figura 26, o mecanismo se apresentou com uma precisão dentro da expectativa, uma vez que possui uma inclinação de 0,9559, ou seja, uma disparidade de 4,41% em relação ao ideal.

Durante o teste, foi analisado o desempenho do sensor na região de comprimento de onda de $2003,5nm$ e caminho óptico L de $74cm$, portanto, para projetos futuros poderão ser feitos testes variando tanto a região de comprimento de onda (optando-se por $1954,5nm$, por exemplo), quanto o tamanho do percurso óptico da fibra de cristal fotônico.

Referências

- [1] José Mariano Amabis and Gilberto Rodrigues Martho. *Biologia das células*. 2004.
- [2] Mecânica Industrial. O que é um sensor de dióxido de carbono. <https://www.mecanicaindustrial.com.br/241-o-que-e-um-sensor-de-dioxido-de-carbono/>, 2018.
- [3] VAISALA. *co₂ probe gmp252*. <https://www.vaisala.com/en/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/gmp252>, 2018.
- [4] METTLER TOLEDO. Sensor de *co₂* dissolvido para cervejarias e fábricas de bebidas carbonatadas. <https://www.mt.com/br/pt/home/products/Process-Analytics/DO-CO2-ozone-sensor/dissolved-carbon-dioxide/beer-CSD-probe-InPro-5500i.html>, 2018.
- [5] CO₂meter. K30 10% *co₂* sensor. <https://www.co2meter.com/collections/10-co2/products/k-30-3-co2-sensor?variant=788193247252>, 2018.
- [6] Voltaire de Oliveira ALMEIDA e Carolina Abs DA CRUZ e Paulo Azevedo SOAVE. *Concepções alternativas em óptica*. 2007.
- [7] Lucio Fassarella. Lei de snell generalizada. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 29(2):215–224, 2007.
- [8] Philip RUSSELL. Photonic crystal fibers. *science*, 299(5605):358–362, 2003.
- [9] Federica Poli, Annamaria Cucinotta, and Stefano Selleri. *Photonic crystal fibers: properties and applications*, volume 102. Springer Science & Business Media, 2007.
- [10] Eliane Moura dos SANTOS et al. Processos relacionados a inserção de fluidos para sensoriamento com fibras de cristal fotônico. 2007.
- [11] Fabíola Azanha Quiñónez et al. *Cristais fotônicos 2 d: projeto e fabricação*. 2006.
- [12] NKT. Hc-2000-01. <https://www.thorlabs.com/drawings/31f134cb851eb546-82D959AE-07C4-4B32-46ADFA4469DFF0B1/HC-2000-SpecSheet.pdf>, 2018.
- [13] Tuomo Ritari, J Tuominen, Hanne Ludvigsen, JC Petersen, Thorkild Sørensen, Theis Peter Hansen, and Harald R Simonsen. Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers. *Optics Express*, 12(17):4080–4087, 2004.
- [14] Jonas K Valiunas, Mario Tenuta, and Gautam Das. A gas cell based on hollow-core photonic crystal fiber (pcf) and its application for the detection of greenhouse gas (ghg): Nitrous oxide (n₂o). *Journal of Sensors*, 2016, 2016.
- [15] Shijie Zheng, Masoud Ghandehari, and Jinping Ou. Photonic crystal fiber long-period grating absorption gas sensor based on a tunable erbium-doped fiber ring laser. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 223:324–332, 2016.

- [16] Gold Book. Absorption lines in compendium of chemical terminology. *International Union of Pure and Applied Chemistry*, 528, 2014.
- [17] Gold Book. Lambert-beer law in compendium of chemical terminology. *International Union of Pure and Applied Chemistry*, 528, 2014.
- [18] Hitran. The hitran database. <http://hitran.org/>, 2016.
- [19] Thorlabs. Thorlabs osa. https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=5276, 2018.
- [20] Corning. Corning smf-28 ultra optical fiber. <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/SMF-28%20Ultra.pdf>, 2014.
- [21] Corning. Corning clearcurve multimode optical fiber. <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/PI146807-14English.pdf>, 2014.
- [22] Sully Milena Mejia Quintero, Luiz Carlos Guedes Valente, Marcos Sebastião de Paula Gomes, Hugo Gomes da Silva, Bernardo Caroli de Souza, and Sergio R.K. Morikawa. All-fiber co2 sensor using hollow core pcf operating in the 2 μ m region. 2018.