

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA  
FACULDADE DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**Manuella Cruz de Oliveira**

**Sensores a Fibra com Rede de Período Longo e Tapers revestidos com óxido  
de grafeno aplicados na medição de CO<sub>2</sub>**

Juiz de Fora  
2022

**Manuella Cruz de Oliveira**

**Sensores a Fibra com Rede de Período Longo e Tapers revestidos com óxido de grafeno aplicados na medição de CO<sub>2</sub>**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Juiz de Fora

2022

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Cruz de Oliveira, Manuella.

Sensores a Fibra com Rede de Período Longo e Tapers revestidos com óxido de grafeno aplicados na medição de CO<sub>2</sub> / Manuella Cruz de Oliveira. -- 2022.

66 f.

Orientador: Alexandre Bessa dos Santos

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2022.

1. Fibras Ópticas. 2. Óxido de Grafeno. 3. CO<sub>2</sub>. 4. LPG. 5. Sensores. I. Bessa dos Santos, Alexandre, orient. II. Título.

**Manuella Cruz de Oliveira**

**Sensores a Fibra com Rede de Período Longo e Tapers revestidos com óxido de grafeno aplicados na medição de CO2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas Eletrônicos

Aprovada em 26 de agosto de 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Alexandre Bessa dos Santos** - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero**

Universidade Federal Fluminense

**Prof. Dr. André Luis Marques Marcato**

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 13/07/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Bessa dos Santos, Professor(a)**, em 26/08/2022, às 18:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

Documento assinado eletronicamente por **Andres Pablo Lopez Barbero, Usuário Externo**, em 08/09/2022, às 14:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do



[Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)

---



Documento assinado eletronicamente por **Andre Luis Marques Marcato, Professor(a)**, em 22/09/2022, às 08:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.](#)

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj ([www2.uffj.br/SEI](http://www2.uffj.br/SEI)) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **0867223** e o código CRC **A5EF499C**.

---

*A minha família pelo apoio.*

*Aos meus amigos pela confiança.*

## **Agradecimentos**

A toda a minha família e amigos, pelo encorajamento e apoio. Ao professor Alexandre Bessa pela orientação e principalmente, pela paciência, sem a qual este trabalho não se realizaria. Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica pelos seus ensinamentos e aos funcionários do curso, pelas contribuições ao longo desses anos.

*“O estudo é a valorização da mente ao  
serviço da felicidade humana”.*

*François Guizot*

## Resumo

As fibras ópticas, em seu âmbito geral, vêm ganhando cada vez mais visibilidade. Isso acontece porque através do material que são constituídas,  $\text{SiO}_2$ , é possível transmitir informações utilizando os raios de luz, sem qualquer interferência eletromagnética. Hoje, sabemos que inúmeras aplicações nos ramos da medicina, prestação de serviços de internet, TV e telefonia (sistemas de telecomunicações), sistemas automobilísticos, cabos submarinos, dentre outros, utilizam as fibras ópticas. No entanto, nos últimos anos o interesse científico em melhorar seu desempenho vem aumentando, sendo o estudo do revestimento desse material uma opção para atingir esse objetivo. Neste trabalho será abordado o revestimento da fibra com o óxido de grafeno para construção de sensores. O grafeno é um material formado por uma única camada de carbono dispostas em uma rede hexagonal que pode ser obtido do grafite. Esse material é estável à temperatura ambiente, leve, fino, rígido, impermeável e sua condutividade pode ser controlada dinamicamente alterando a tensão de polarização aplicada. Quando combinado com grupos funcionais de oxigênio, forma-se o óxido de grafeno. No âmbito desse trabalho, foi criado um sistema de sensoriamento de medição de dióxido de carbono, baseado em (OLIVEIRA, 2019), utilizando uma LPG (Rede de Período Longo) com aplicação de *tapering* (afunilamento da fibra) e *coating* de óxido de grafeno para melhoria da sensibilidade do sensor a variações externas. O objetivo final é analisar as melhorias proporcionadas pelo óxido de grafeno no desempenho dos sensores a fibra. Os *softwares* utilizados para as simulações e análises serão descritos e detalhados ao longo do trabalho.

**Palavras-chave:** Fibras Ópticas, Óxido de grafeno,  $\text{CO}_2$ , LPG, Sensores, *Coating*, *Tapering*.

# Abstract

The optical fibers in general are gaining more visibility and that happens because through the material they are made of,  $\text{SiO}_2$ , is possible to transmit information using the light, without the electromagnetic interference. Nowadays, several applications in the medicine area, internet services, TV and telephony (telecommunications systems), automotive systems, submarines cables use fiber optics. Because of that, in the last years the scientific interesting in improve their performance are increasing, with the study of the fiber's coating a option to achieve this goal. In this paper will be discussed the fiber coating with the graphene oxide to develop sensors. The graphene is a material composed by one single carbon layer arranged in hexagonal grid that can be obtained by graphite. This material is stable to environment temperature, light, thin, rigid, waterproof and its conductivity can be control dynamic changing the polarization tension applied. When combined with oxygen groups, we have the graphene oxide. In this research was developed a sensing system of graphene oxide measurement, based in (OLIVEIRA, 2019), using a LPG (Long Period Grating) with tapering application and graphene oxide coating to improve the sensor sensibility to external variations. The main goal is analyse the improvements provided by graphene oxide in the fiber optical sensors. The software used for the simulations and analysis will be described throughout this paper.

**Keywords:** Optical fibers, Graphene oxide,  $\text{CO}_2$ , LPG, Sensors, Coating, Tapering.

## Lista de Figuras

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Espectro de uma LPG. . . . .  | 16 |
| 2.2  | Esquemático de uma LPG com marcações. . . . .   | 16 |
| 2.3  | Espectro detalhado de uma FBG. . . . .  | 18 |
| 2.4  | Grafeno em folhas. . . . .  | 19 |
| 2.5  | Óxido de Grafeno. . . . .   | 21 |
| 2.6  | Processo de tapering no centro de uma fibra óptica. . . . .   | 22 |
| 2.7  | Processo de tapering no final de uma fibra óptica. . . . .  | 23 |
| 2.8  | Software OptiGrating. . . . .   | 25 |
| 2.9  | Software Optisystem. . . . .  | 26 |
| 2.10 | Desktop Software Matlab. . . . .  | 27 |
| 2.11 | Estrutura programa em Python. . . . .   | 28 |
| 3.1  | Afunilamento de uma fibra óptica. . . . .   | 30 |
| 4.1  | Espectro LPG utilizada para as medições. . . . .  | 33 |
| 4.2  | Deslocamento do comprimento de onda de ressonância do segundo vale para o índice de refração na faixa de 1-1.4. . . . . | 33 |
| 4.3  | Diferença dos comprimentos de onda de ressonância da LPG. . . . .   | 34 |
| 4.4  | Resultados rede neural - Treino. . . . .  | 36 |
| 4.5  | Resultados rede neural - Teste. . . . .   | 36 |
| 4.6  | Resultados rede neural - Consolidado. . . . .   | 37 |
| 4.7  | Espectro prático com GO. . . . .  | 38 |
| 4.8  | Espectros sem tapering. . . . .   | 39 |
| 4.9  | Variação de tapering vs distância vales. . . . .  | 40 |
| 4.10 | Variação de tapering (88% - 100%). . . . .  | 41 |
| 4.11 | Variação de tapering (70% - 82%). . . . .   | 42 |
| 4.12 | Divisão banco de dados para utilização da função <i>fitcknn</i> . . . . .   | 43 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.13 | Diferença das potências dos vales revestida pelo óxido de grafeno (GO) com e sem CO <sub>2</sub> . . . . . | 45 |
| 4.14 | Esquemático rede neural. . . . .   | 47 |
| 4.15 | Resultados obtidos rede neural - Treino. . . . .   | 48 |
| 4.16 | Resultados obtidos rede neural - Teste. . . . .  | 48 |
| 4.17 | Resultados obtidos rede neural - Consolidado. . . . .  | 49 |
| 4.18 | Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Treino. . . . .                                 | 49 |
| 4.19 | Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Teste. . . . .                                  | 50 |
| 4.20 | Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Consolidado. . . . .                            | 50 |
| 6.1  | Construção grades via software Optigrating. . . . .  | 57 |
| 6.2  | Parâmetros iniciais da fibra. . . . .  | 58 |
| 6.3  | Parâmetros dos modos da fibra. . . . .   | 59 |
| 6.4  | Parâmetros da grade. . . . .   | 60 |
| 6.5  | Parâmetros do sensor. . . . .  | 61 |

## Lista de Tabelas

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Propriedades do Grafeno . . . . .   | 19 |
| 2.2  | Concentrações CO <sub>2</sub> . . . . .   | 24 |
| 4.1  | Variações de RI e comprimento de onda de ressonância do 2 <sup>o</sup> vale do espectro                   | 34 |
| 4.2  | Relação entre temperatura e RI em relação às diferenças dos comprimentos<br>de onda ressonantes . . . . . | 35 |
| 4.3  | Especificações LPG . . . . .  | 38 |
| 4.4  | Resultados Classificador k-vizinhos (100% raios núcleo e casca) . . . . .                                 | 43 |
| 4.5  | Resultados Classificador k-vizinhos (88% raios núcleo e casca) . . . . .                                  | 43 |
| 4.6  | Resultados Classificador k-vizinhos (74% raios núcleo e casca) . . . . .                                  | 44 |
| 4.7  | Resultados classificação <i>python</i> . . . . .  | 44 |
| 4.8  | Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (100%<br>raios núcleo e casca) . . . . . | 46 |
| 4.9  | Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (88%<br>raios núcleo e casca) . . . . .  | 46 |
| 4.10 | Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (74%<br>raios núcleo e casca) . . . . .  | 46 |

## **Lista de Abreviações**

PPEE Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

UFJF Universidade Federal de Juiz de Fora

# Conteúdo

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Lista de Figuras</b>   | <b>6</b>  |
| <b>Lista de Tabelas</b>   | <b>8</b>  |
| <b>Lista de Abreviações</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1 Introdução</b>   | <b>12</b> |
| <b>2 Revisão Bibliográfica</b>  | <b>14</b> |
| 2.1 Sensores a Fibra Óptica . . . . .   | 15        |
| 2.1.1 Redes de Período Longo . . . . .  | 15        |
| 2.1.2 Redes de Bragg . . . . .  | 17        |
| 2.1.3 Grafeno . . . . .   | 18        |
| 2.1.4 Óxido de Grafeno (GO) . . . . .   | 20        |
| 2.1.5 <i>Tapering</i> . . . . .   | 22        |
| 2.2 Revestimento de uma fibra ( <i>coating</i> ) . . . . .  | 23        |
| 2.2.1 Camada externa de CO <sub>2</sub> . . . . .   | 24        |
| 2.3 <i>Softwares</i> . . . . .  | 24        |
| 2.3.1 <i>Optigrating</i> . . . . .  | 24        |
| 2.3.2 <i>OptiSystem</i> . . . . .   | 25        |
| 2.3.3 <i>Matlab</i> . . . . .   | 26        |
| 2.3.4 <i>Python</i> . . . . .   | 27        |
| <b>3 Metodologia</b>  | <b>29</b> |
| 3.1 Revestimento da fibra com óxido de grafeno (GO) . . . . .   | 29        |
| 3.2 Afunilamento da fibra ( <i>tapering</i> ) . . . . .   | 30        |
| 3.3 Medição de gases (CO <sub>2</sub> ) . . . . .   | 30        |
| <b>4 Resultados</b>   | <b>32</b> |
| 4.1 Sensibilidade do espectro em função das variações de índice de refração . . . . .   | 32        |
| 4.2 Espectro prático de uma LPG revestida com óxido de grafeno . . . . .  | 37        |
| 4.3 Simulação LPG revestida com óxido de grafeno . . . . .  | 38        |
| 4.3.1 LPG simulada . . . . .  | 38        |
| 4.3.2 LPG simulada com <i>tapering</i> . . . . .  | 39        |
| 4.3.3 Aplicação do <i>tapering</i> e inversão de potência dos vales . . . . .   | 40        |
| 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO <sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO . . . . .                         | 42        |
| 4.4.1 Classificação de sensor a LPG com CO <sub>2</sub> utilizando o <i>software Matlab</i> . . . . .                                       | 42        |
| 4.4.2 Classificação de sensor a LPG com CO <sub>2</sub> utilizando programação em <i>python</i> . . . . .                                   | 44        |
| 4.4.3 Classificação de sensor a LPG com CO <sub>2</sub> utilizando ambos os <i>softwares Matlab</i> e <i>python</i> . . . . .               | 45        |
| 4.4.4 Utilização de rede neural artificial para mensurar a concentração de CO <sub>2</sub> na LPG revestida pelo óxido de grafeno . . . . . | 46        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Conclusão</b>  | <b>51</b> |
|          | <b>Bibliografia</b>   | <b>53</b> |
| <b>6</b> | <b>Anexos</b>   | <b>57</b> |
| 6.1      | Construção e medição de sensores utilizando o <i>software Optigrating</i> . . . . | 57        |
| 6.1.1    | Construção das grades . . . . .   | 57        |

# 1 Introdução

É de se observar que com o passar dos anos, as fibras ópticas têm ganhado cada vez mais aceitação e visibilidade em inúmeras aplicações cotidianas. Devido as suas características, sendo a principal delas no âmbito deste trabalho, a imunidade a interferências eletromagnéticas, ela vem se tornando uma das mais relevantes opções para aplicações em sistemas de sensoriamento (MARTINS, 2016).

Diferentes pesquisas vêm sendo conduzidas utilizando as fibras ópticas com materiais eletrônicos para construção de importantes sensores. Recentes avanços na área científica permitem combinar a habilidade de transmissão de gigabits de informações na velocidade da luz combinada com as recentes melhorias e reduções de custos em componentes optoeletrônicos para construção dos sensores a fibra óptica. (FIDANBOYLU; EFENDIOĞLU, 2009). Nesse âmbito, vários estudos de aplicações utilizando os sensores a fibra óptica são encontrados. (POSSETTI, 2009) propôs estudos utilizando esses tipos de sensores para análise da qualidade da gasolina, (ASCORBE et al., 2015) estudaram a medição das perdas em linhas de transmissão, (DELGADO et al., 2016) realizaram estudos voltados para investigação da concentração de dióxido de carbono em diferentes ambientes e (WU et al., 2014) propuseram pesquisas para detecção de gases de alta sensibilidade.

Além de dispositivos construídos e pesquisas citadas referentes às aplicações das fibras ópticas em sistemas de sensoriamento, a combinação desses componentes com diferentes materiais vem permitindo um ganho ainda maior e resultados cada vez mais positivos. Nesse cenário torna-se necessário introduzir o grafeno e o óxido de grafeno. O grafeno, material obtido do grafite e formado por uma única camada de carbono, apresenta propriedades excepcionais que permitem a sua combinação com diferentes compostos para o aperfeiçoamento de diversas aplicações. A combinação desse material com grupos funcionais de oxigênio permite o crescimento de estruturas químicas em sua superfície e conseqüentemente uma fácil funcionalização com orgânicos ou estruturas biológicas. A vantagem de utilizar as fibras ópticas como sensores e o óxido de grafeno como interação

com outras espécies pode ser uma combinação grandiosa para nova gerações de dispositivos de sensoriamento. (MARTINS, 2016)

Neste trabalho, um estudo inicial dos sensores a fibra óptica como sensores de medição de CO<sub>2</sub> foi realizado e publicado na conferência - LAWOFSS 2019, Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors - e como sequência do trabalho pretende-se apresentar um estudo da medição de diferentes gases no meio ambiente através do índice de refração (RI). Como em alguns casos, medir a concentração de determinados gases, como o CO<sub>2</sub>, é um trabalho complexo em virtude do seu baixo índice de refração, faz-se necessário a utilização de um sensor a fibra óptica revestido com o óxido de grafeno.

O trabalho em questão será apresentado da seguinte maneira:

Capítulo 1 introduz as motivações e a estrutura da dissertação.

O Capítulo 2 apresentará uma revisão bibliográfica dos tópicos abordados ao longo do trabalho: introdução sobre as fibras ópticas, os sensores, as Redes de Período Longo, as Redes de Bragg, o Grafeno, o Óxido de Grafeno e os *softwares* utilizados. Além disso, nesse capítulo será apresentado ainda alguns temas importantes para o desenvolvimento desse trabalho, como: Fibra Afunilada (*Tapering*) e Revestimento da fibra (*Coating*).

Capítulo 3 apresenta detalhadamente a metodologia da dissertação, com foco na medição do CO<sub>2</sub>, nas técnicas de revestimento com o Óxido de Grafeno e no *tapering*.

O Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados nas simulações realizadas.

O Capítulo 5 conclui a dissertação e discute propostas para trabalhos futuros.

## 2 Revisão Bibliográfica

Até meados de 1950 a comunicação era dominada por sinais elétricos e não existiam meios adequados para uso da luz como portadora de informações. Com base nos estudos de John Tyndall, o físico Narinder Singh Kapany realizou os primeiros experimentos que o levaram à criação de um fio encapsulado capaz de propagar a luz com baixas taxas de perda, dando origem à fibra óptica.

Algumas das principais vantagens destes dispositivos são: alta velocidade de transmissão de dados e a imunidade a interferências eletromagnéticas o que permite utilizá-los em inúmeras aplicações (CORBOLAN; OLIVEIRA; SANTOS, 2018). De acordo com (DELGADO et al., 2016) com o crescimento da área óptica, os sensores a fibra óptica adquiriram crescente importância no campo das tecnologias de sensores. Esses dispositivos são leves e resistentes a ambientes agressivos (DING et al., 2015), que são os principais recursos necessários para sistemas de detecção de gás, principal objetivo dessa pesquisa. O foco principal deste trabalho é a medição de gases utilizando as Redes de Período Longo (LPG). Autores como (VILLAR et al., 2007), (BAO et al., 2014) e (URRUTIA et al., 2016) realizaram estudos de modificações dos espectros de LPGs e de *coated* LPGs para construção de sensores imunes a diferentes substâncias. Além desses, vários outros pesquisadores propuseram e demonstraram diferentes aplicações utilizando sensores de fibra óptica para detectar espécies gasosas, como (LIU et al., 2009) e (WU et al., 2014). Entre os diferentes tipos de sensores de fibra óptica, as Redes de Período Longo têm sido amplamente utilizadas para a medição do índice de refração externo e, consequentemente, para identificar a concentração de diferentes gases, como o CO<sub>2</sub> (WENBIN; ZHENG TIAN, 2018).

## 2.1 Sensores a Fibra Óptica

Os sensores são dispositivos responsáveis por converter determinadas quantidades físicas/ químicas em sinais elétricos para que estes dados possam ser processados, armazenados e transmitidos. Os sensores ópticos em fibra (foco principal deste trabalho) são sensores passivos, imunes a interferências eletromagnéticas e apresentam alta sensibilidade, sendo então ideais para inúmeras aplicações.

Para compor um sensor óptico é importante entender a respeito das grades de fibras ópticas. As grades de fibra são dispositivos que permitem o controle de propriedades da luz dentro de uma fibra óptica. Essas grades consistem em perturbações periódicas das propriedades da fibra, geralmente em seu índice de refração (JAMES; TATAM, 2003). Essas redes podem ser classificadas em Rede de Período Longo (LPG) e as Redes de Bragg (FBG) de acordo com seu período de modulação.

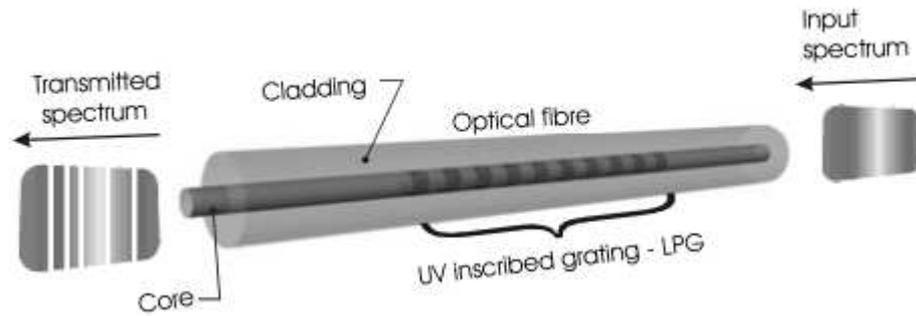
### 2.1.1 Redes de Período Longo

As LPGs são grades que possuem um comprimento na faixa de  $100\mu\text{m}$  a  $1\text{mm}$  e que promovem o acoplamento entre os modos de revestimento e o modo de propagação do núcleo. Nas LPGs tem-se um espectro de transmissão com uma série de bandas de atenuação com centros em comprimentos de onda específicos. Os comprimentos dessas bandas de atenuação são sensíveis ao período da LPG, ao comprimento da LPG e a fatores externos do ambiente, como índice de refração, tensão, temperatura e raio de curvatura. Qualquer modificação nesses parâmetros pode modificar o período das LPGs e/ou os índices de refração efetivo do núcleo e dos modos da casca. (JAMES; TATAM, 2003)

A construção de uma LPG pode ser induzida por deformações físicas do material da fibra ou por uma modulação periódica no índice de refração de uma fibra ao longo de seu comprimento (POSSETTI et al., 2009). Essa modulação periódica pode ser feita em seu núcleo através de técnicas ópticas, químicas, mecânicas ou térmicas. (POSSETTI, 2009).

Para um mesmo comprimento de onda de ressonância ou para uma mesma potência é possível obter diferentes valores de sensibilidade da fibra, possibilitando assim a fa-

Figura 2.1 - Espectro de uma LPG.

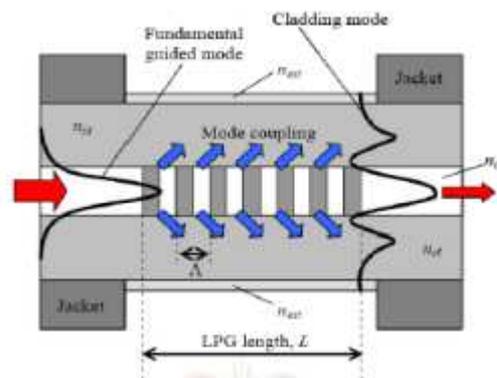


Fonte: Adaptado de (JAMES; TATAM, 2003).

bricação dos sensores e de transdutores de deformações mecânicas (OLIVEIRA, 2019). Estes dispositivos são construídos através de marcações gravadas na fibra. O período de uma fibra é a distância entre duas marcações. Quando há uma diminuição desse período (alteração das marcações) gera-se um vale no espectro óptico. A medida que ocorrem estas variações de período, mudanças no espectro do vale serão observadas e um monitoramento dessas mudanças permitirá a criação dos sensores.

A Figura 2.2 exemplifica o princípio de funcionamento de uma LPG com marcações. O sinal óptico (indicado na esquerda da imagem) representa combinações entre o modo que se propaga no núcleo e os modos que se propagam na casca. Esses modos interagem entre si gerando a curva de atenuação final, obtendo-se assim os sensores (POSSETTI, 2009).

Figura 2.2 - Esquemático de uma LPG com marcações.



Fonte: Adaptado de (SEHGAL; DUA, 2015).

A sensibilidade das LPGs é influenciada pelo período (como mencionado ante-

riormente), pela ordem do modo de revestimento ao qual o acoplamento ocorre e pela composição da fibra óptica. Essa combinação de parâmetros, permite a fabricação de grades que possuem uma grande variedade de respostas para diferentes mensurados.

A transmissão mínima das bandas de atenuação é descrita por:

$$Ti = (1 - \sin^2(kiL)) \quad (2.1)$$

Sendo  $ki$  o coeficiente de acoplamento para o modo de revestimento e  $L$  o comprimento.

Para modelagem de LPGs é importante determinar os índices de refração dos modos de núcleo e casca. Definindo esses dois parâmetros é possível determinar os comprimentos de onda centrais das bandas de atenuação. Por se tratar de uma modulação periódica na fibra, nas LPGs o modo do núcleo se acopla aos modos na casca em comprimentos de onda discretos. Os comprimentos de onda são dependentes da condição de casamento de fase ( $\lambda$ ) (WONG et al., 2019).

$$\lambda^m = (n_{\text{eff}}^{\text{core}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{mcladding}}(\lambda)) * \Lambda \quad (2.2)$$

Além disso, os índices de refração efetivos do núcleo e casca ( $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$ ,  $n_{\text{eff}}^{\text{mcladding}}$ ), a escolha do período ( $\Lambda$ ), a composição da fibra e demais perturbações externas são fatores fundamentais e impactam diretamente no comprimento de onda ressonante.

As LPGs podem ser utilizadas em aplicações de filtragem passa banda e rejeita banda, sensores de temperatura, sensores de medição de índice de refração, sensores químicos, dentre outros (WONG et al., 2019).

### 2.1.2 Redes de Bragg

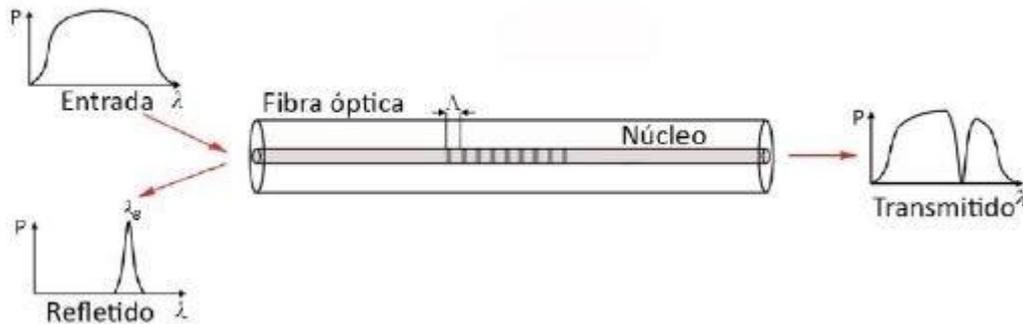
As Redes de Bragg (FBG) são um tipo de distribuição construída em um segmento de fibra óptica (assim como uma LPG) e configurada para um comprimento de onda de ressonância específico da luz. Quando o núcleo da fibra é exposto à luz ultravioleta, esse tipo de rede gravada nas fibras transmite uma parte dos comprimentos de onda de luz e reflete o restante. O comprimento de onda refletido é denominado comprimento de onda de Bragg e depende do período da FBG e do índice de refração efetivo do modo

fundamental (nef), conforme indicado na equação (2.3) (ALBERTO, 2011).

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.3)$$

Nas FBGs há um acoplamento da luz do modo de propagação direta da fibra para um modo de contrapropagação reversa (JAMES; TATAM, 2003). Um sensor baseado em uma FBG atua como um filtro de banda estreita. Neste caso, se uma luz de espectro largo for inserida na fibra, apenas a luz da região estreita (centrada no comprimento de onda de Bragg) será refletida, o restante da luz terminará seu caminho através da fibra óptica. Um sensor FBG irá refletir o mesmo comprimento de onda independente do sentido da luz. Quando a fibra onde a FBG está localizada é sujeita a variações externas de temperatura, tensão e/ou deformação, o comprimento de onda central da FBG muda para um comprimento de onda maior ou menor.

Figura 2.3 - Espectro detalhado de uma FBG.



Fonte: (DELGADO, 2017).

Atualmente há inúmeras técnicas de fabricação das FBGs: corrosão química, laser UV de 193 nm ou 248 nm de irradiação, litografia, irradiação de laser de 633 nm, dentre outras (SHREE; SANGEETHA; KRISHNAN, 2020). O espectro de uma FBG é demonstrado nas Figura 2.3.

### 2.1.3 Grafeno

O grafeno é na atualidade um dos mais promissores nanomateriais em estudo no mundo, devido às suas excelentes propriedades elétricas, térmicas e ópticas (JESUS; FREIRE; GUIMARÃES, 2012). O termo grafeno foi utilizado pela primeira vez em 1987,

porém a definição original do material foi somente divulgada em 1994 pela IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*). Somente em 2004, alguns pesquisadores conseguiram isolar pequenos fragmentos esfoliados da grafite e após análises de caracterização verificaram que se tratava de uma estrutura de uma única camada de átomos de carbono (GEIM; NOVOSELOV, 2010).

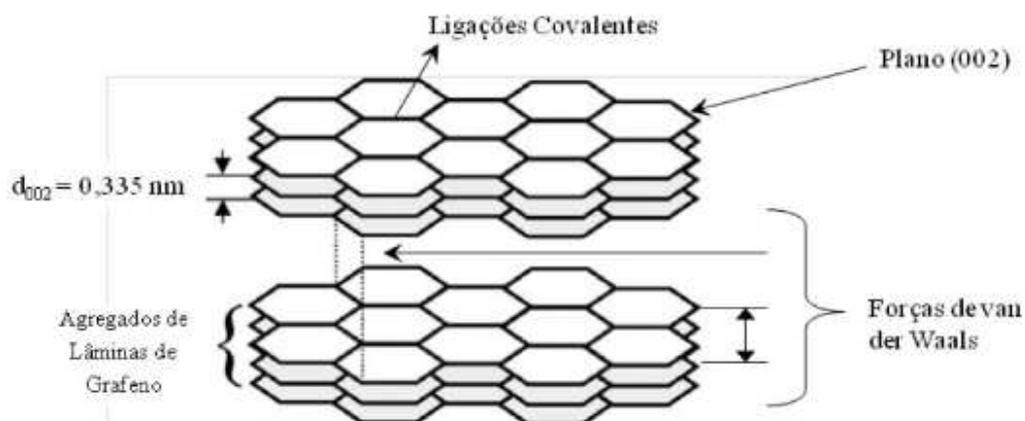
O grafeno é um material formado por uma única camada de átomos de carbono dispostas em uma rede hexagonal, dentre os quais 2 elétrons estão fortemente ligados ao núcleo e 4 estão na camada de valência. Ao se ligarem a outros átomos de carbono, ocorre um processo denominado hibridização e novos átomos são criados (CAMARGOS; SEMMER; SILVA, 2017). As propriedades do grafeno são listadas na tabela a seguir:

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Área da Superfície    | 2.630 m <sup>2</sup> g <sup>-1</sup>                    |
| Mobilidade Elétrica   | 250.000 cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> |
| Condutividade Térmica | 5.000 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>                 |
| Transmitância Óptica  | 97,7%   |

Fonte: Elaborado pelo autor (a).

Atualmente, o grafeno tem sido utilizado não só em sua forma original, composto por uma única folha, mas também em um formato de várias folhas empilhadas, conforme Figura 2.4.

Figura 2.4 - Grafeno em folhas.



Fonte: (CAMARGOS; SEMMER; SILVA, 2017).

Em certas condições, o grafeno se comporta como um semicondutor com ca-

racterísticas melhores que o próprio silício. Além disso, a maioria dos semicondutores utilizados em aplicações atualmente não apresentam uma relação linear entre momento e energia, o grafeno apresenta essa característica. Atualmente, a produção do grafeno é dividida em duas abordagens (MARTINS, 2016):

1) *Top-Down*: esfoliação química ou física da grafite.

2) *Bottom-up*: há diversas técnicas já produzidas. Grafeno produzido em filmes de cobre como carbono e exposto a folhas de metal para obter deposição de superfície, evaporação de sílica em superfícies de wafer de carboneto de silício em altas temperaturas, dentre outras.

Algumas das funcionalidades do grafeno são: resistências térmica e mecânica elevadas, boa condutividade elétrica, alta mobilidade de elétrons, material ideal para spintrônica devido à pequena interação spin-órbita e utilização para fabricar sensores químicos com sensibilidade extraordinária (PEI; ZHANG; SHENOY, 2009).

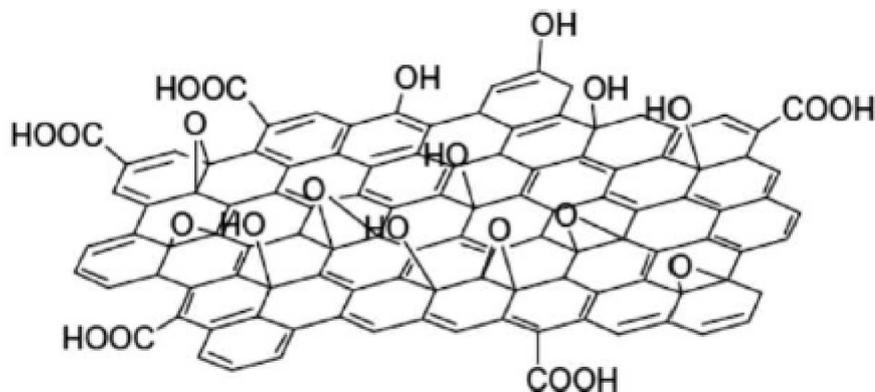
#### 2.1.4 Óxido de Grafeno (GO)

O óxido de grafeno é uma estrutura derivada do grafeno caracterizada pela presença de grupos de oxigênio em sua superfície e folhas de carbono na extremidade. De modo geral, após um processo de expansão, a grafite sofre uma forte oxidação no qual grupos funcionais de oxigênio e defeitos estruturais se formam nas camadas de grafite que se desprendem uma das outras, criando um material intermediário, o óxido de grafeno. Em seguida, o GO é submetido a um processo de redução para a remoção dos grupos funcionais aderidos à ele (MENDONCA, 2016). No entanto, a quantidade, tipo e localização dos grupos funcionais pode variar de acordo com as condições de obtenção, já que as propriedades do GO estão associadas com a natureza dos grupos funcionais e a morfologia do óxido obtido, estas características dependem do grafite de partida e das condições de reação, tais como o tempo de oxidação, a temperatura e dos agentes oxidantes, o que apresenta forte influência sobre a reatividade destes materiais (BOTAS et al., 2013), (SHAMAILA; SAJJAD; IQBAL, 2016).

Esse material foi apresentado pela primeira vez em 1859 onde a reatividade do grafite foi testada adicionando o clorato de potássio (KClO<sub>3</sub>) a ácido de nitrato (HNO<sub>3</sub>).

A introdução do oxigênio nas estruturas de grafite aumenta a distância entre as estruturas de carbono na grafite e enfraquece as interações de Van der Waals entre eles (MARCANO et al., 2010).

Figura 2.5 - Óxido de Grafeno.



Fonte: (CAMARGOS; SEMMER; SILVA, 2017).

A homogeneidade da estrutura do óxido de grafeno está ligada ao seu grau de oxidação, que é determinado pelo processo de produção (CAMARGOS; SEMMER; SILVA, 2017). Atualmente, um dos métodos de preparação do óxido de grafeno mais utilizados é um procedimento simples e de baixo custo da esfoliação química da grafite, que pode ser realizado em larga escala (GONCALVES et al., 2014).

O óxido de grafeno apresenta vantagens em relação ao grafeno como estabilidade em meio aquoso, melhor solubilidade, menor custo e facilidade de interação com outros materiais, o que auxilia na construção de compostos poliméricos (MARTINS, 2016).

Recentemente o óxido de grafeno tem superado a ideia que seria um material intermediário usado somente com o objetivo de produzir grafeno comercial. Ele tem se tornado o alvo de pesquisadores interessados em transformar esse material em ferramenta para aplicações tecnológicas diretas, como a combinação do óxido de grafeno (GO) com as fibras ópticas para composição de sensores. Autores como (AZIZ et al., 2015) desenvolveram um sensor de medição de etanol revestido de óxido de grafeno. (XIAO et al., 2014) propôs um sensor capaz de medir/monitorar a umidade presente no ambiente. (SRI-DEVI et al., 2014) demonstrou uma FBG revestida de GO para construção de sensores bioquímicos.

### 2.1.5 *Tapering*

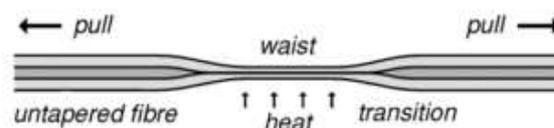
*Tapering* ou fibra afunilada é uma técnica de redução dos diâmetros da casca e/ou do núcleo de uma fibra óptica através de um esticamento e um aquecimento do guia de onda.

Em uma fibra com *taper*, a redução dos diâmetros do núcleo e do revestimento permite que os campos evanescentes espalhem para a região do revestimento e, eventualmente, além do limite externo (LIN et al., 2012). A fibra afunilada permite a interação entre a onda evanescente e o alvo circundante (TIAN et al., 2011). Quando ocorre a modificação da fibra, observa-se a exposição do campo evanescente e a fibra se tornará sensível a influências externas. Para aplicações da fibra como sensores, esse método se torna eficaz pois facilita a interação com o meio circundante, oferecendo benefícios ao medir parâmetros com índice de refração, composição química e parâmetros físicos, tais como deformação, temperatura, dentre outros (JAMES; LEE; TATAM, 2019).

Atualmente a fabricação mais simples das fibras é geralmente obtida aquecendo uma pequena seção da fibra enquanto simultaneamente as duas extremidades da fibra são puxadas. A fonte de calor pode ser radiação a laser de alta potência, descarga de arco, queimador de calor, micro forno e arco eletrônico formado entre um par de eletrodos de uma máquina de emenda por fusão, dentre outros (JAMES; LEE; TATAM, 2019) (SILVEIRA, 2015).

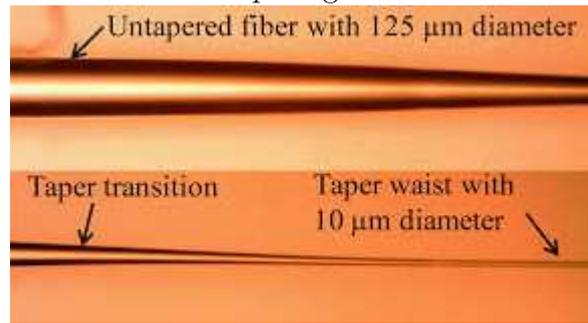
O *tapering* nas fibras pode ocorrer em seus centros (Figura 2.6) ou em suas extremidades (Figura 2.7). Caso o afunilamento ocorra no centro, depois de esticada, a fibra será composta por três regiões: a região central (*taper waist*), onde a fibra apresenta seu menor diâmetro; a região de transição (*transition region*) onde ocorre a diminuição gradual dos diâmetros e a região da fibra onde não há nenhuma alteração (HERNANDEZ, 2016).

Figura 2.6 - Processo de tapering no centro de uma fibra óptica.



Fonte: (LASE; OPTICS; CORPORATION, 2022).

Figura 2.7 - Processo de tapering no final de uma fibra óptica.



Fonte: (LASE; OPTICS; CORPORATION, 2022).

## 2.2 Revestimento de uma fibra (*coating*)

*Coating* é um método utilizado em fibras ópticas capaz de melhorar a sensibilidade das mesmas para fabricação de sensores, além de protegê-las do meio externo. Esse método de revestimento ocorre da seguinte maneira: uma camada externa é adicionada ao redor da fibra de modo a mantê-la mais sensível às variações externas. Essa camada pode ser composta por uma combinação de camadas mais finas de metais, óxidos, ácidos, dentro outros (OLIVEIRA, 2019).

Os sensores de fibra têm recursos de detecção mais inteligentes quando revestidos com materiais de reconhecimento específicos. Diferentes tipos de materiais combinados com diferentes estruturas de fibra podem produzir diferentes medidas (LI et al., 2020). Existem diversas tecnologias utilizadas para aplicar revestimentos ópticos como: pulverização de plasma, deposição por evaporação, pulverização de feixe de íons e deposição de camada atômica. Alguns exemplos de estudos com aplicação do *coating* nas fibras ópticas podem ser citados: (LACQUET; SWART; AMEER, 2014) propuseram um revestimento baseado em sol-gel, (GOUVEIA et al., 2010) construíram um revestimento através da criação de uma camada sensível utilizando compostos químicos como hidrogel de poliuretano e etanol.

### 2.2.1 Camada externa de CO<sub>2</sub>

Para analisar a presença do CO<sub>2</sub> no ambiente, os sensores são revestidos por uma camada externa para que a relação entre comprimento de onda de ressonância e índice de refração seja maior. Para este trabalho, os valores de índice de refração decorrentes do revestimento do CO<sub>2</sub> são provenientes de uma LPG revestida por uma camada química (DELGADO et al., 2016), (GOUVEIA et al., 2010). Neste caso, para identificar a presença dessa substância o sensor é revestido com uma camada sensível ao CO<sub>2</sub> (*coating*), resultando em uma maior variação do comprimento de onda ressonante por índice de refração. A tabela a seguir demonstra a relação do índice de refração para determinadas concentrações de CO<sub>2</sub>.

Tabela 2.2 - Concentrações CO<sub>2</sub>

| CO <sub>2</sub> (%) | Sensitive layer RI |
|---------------------|--------------------|
| 0                   | 1.3558             |
| 10                  | 1.3567             |
| 20                  | 1.3570             |
| 30                  | 1.3571             |
| 40                  | 1.3572             |
| 50                  | 1.3573             |

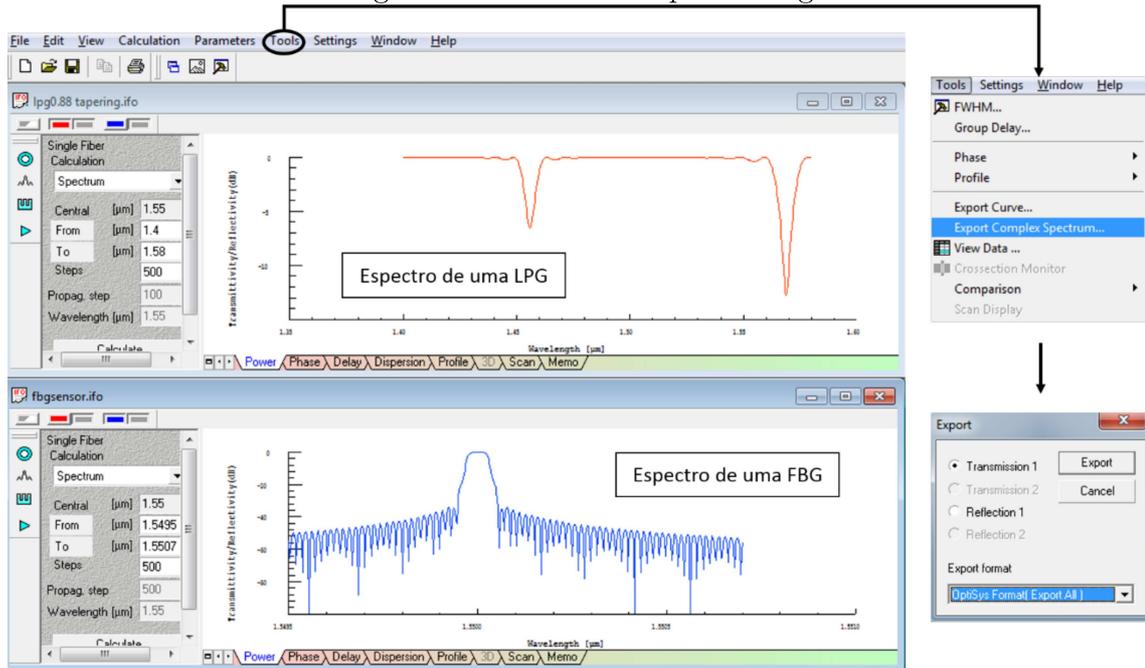
Fonte: (DELGADO et al., 2016).

## 2.3 *Softwares*

### 2.3.1 *Optigrating*

O *OptiGrating* (Figura 2.8) é um *software* de modelagem de grades ópticas. Através dele é possível plotar o espectro de uma LPG (Rede de Período Longo) ou FBG (Rede de Bragg) para realização de simulações definindo todos os parâmetros necessários através de mudanças no período da fibra, índice de refração, raios do núcleo e da casca, dentre outros. Todos esses parâmetros de fibra são parametrizados no *OptiGrating* e em seguida podem ser transferidos para o *OptiSystem*. Os dois *softwares* em conjuntos são utilizados para as simulações de diferentes redes ópticas.

Figura 2.8 - Software OptiGrating.

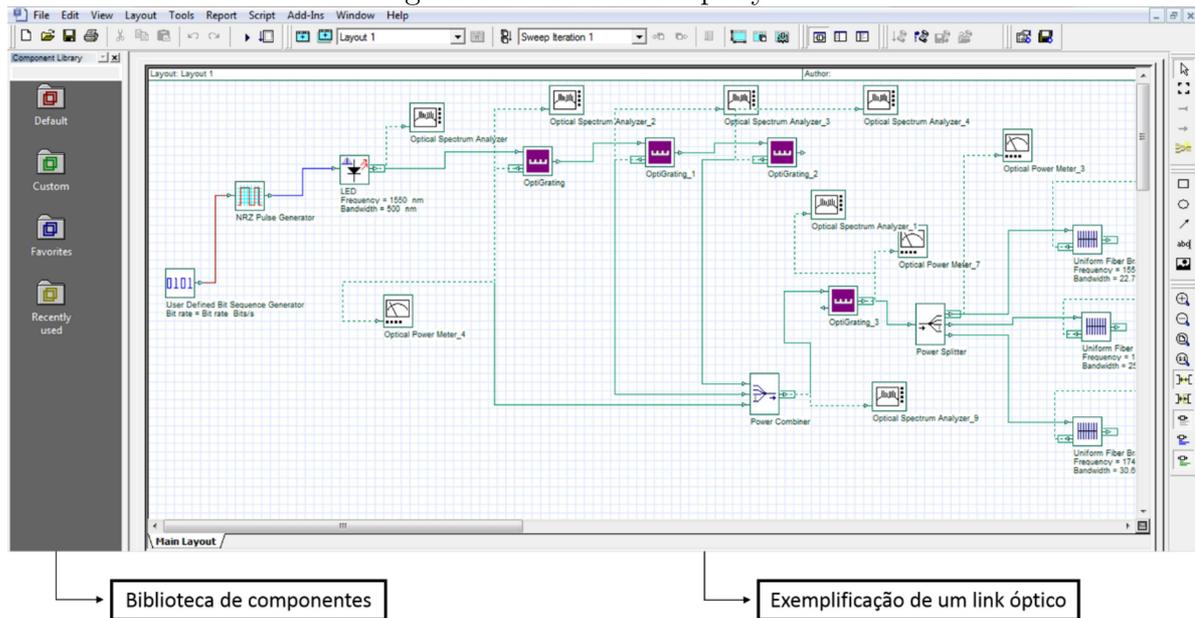


Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

### 2.3.2 OptiSystem

O *OptiSystem* (Figura 2.9) é um *software* de simulação da *Optiwave* bastante utilizado para construção de links ópticos. Através dele é possível modelar um sistema de comunicação óptica realista e interligar esse sistema com diversos outros *softwares*, tais como: *MATLAB*, *OptiGrating*, dentre outros. Esse *software* é composto por dispositivos elétricos e ópticos (passivos e ativos) e, além disso, possui diversas ferramentas gráficas, tais como: osciloscópios, analisadores de espectro, medidores de potência, que permitem analisar e testar diferentes redes ópticas.

Figura 2.9 - Software Optisystem.



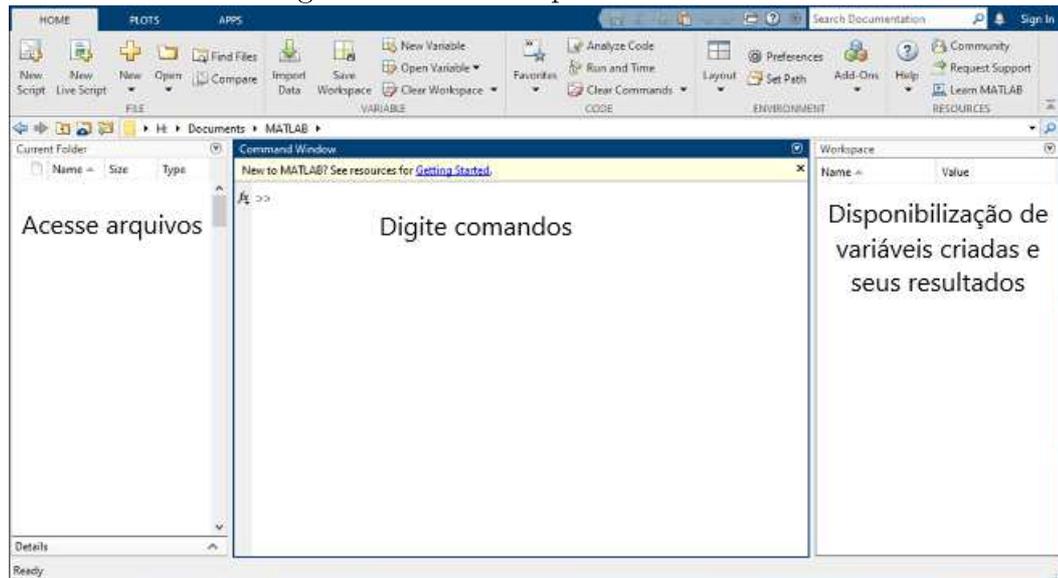
Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

### 2.3.3 Matlab

O *Matlab* é um *software* de análise e desenvolvimento de modelos matemáticos que utiliza uma linguagem de programação expressando a matemática de vetores e matrizes através de um ambiente iterativo. Essa ferramenta permite ao usuário desenvolver códigos de diferentes maneiras: utilização do *Live Editor*, utilização de *toolboxes*, linguagem de blocos através do Simulink e/ou aplicativos disponibilizados no próprio ambiente de trabalho (MATHWORKS, 2022).

Essa plataforma possui uma série de aplicações, tais como: processamento de sinais, imagens e vídeos, aprendizado de máquina (*deep learning and machine learning*), sistemas de medição e controle, sistemas de predições, desenvolvimentos de interfaces gráficas, dentre outros.

Figura 2.10 - Desktop Software Matlab.



Fonte: (MATHWORKS, 2022).

Para este trabalho o *Matlab* foi utilizado como sistema de predição. Utilizando o *Live Editor* foi desenvolvido um código capaz de classificar o banco de dados com e sem a presença do CO<sub>2</sub>. Para essa aplicação utilizou-se a função *fitcknn* (*Fit k-nearest neighbor classifier*) que ajusta o modelo a um sistema de classificação baseado nos k-vizinhos mais próximos com base nas variáveis de entrada do sistema, neste caso os espectros das LPGs.

### 2.3.4 Python

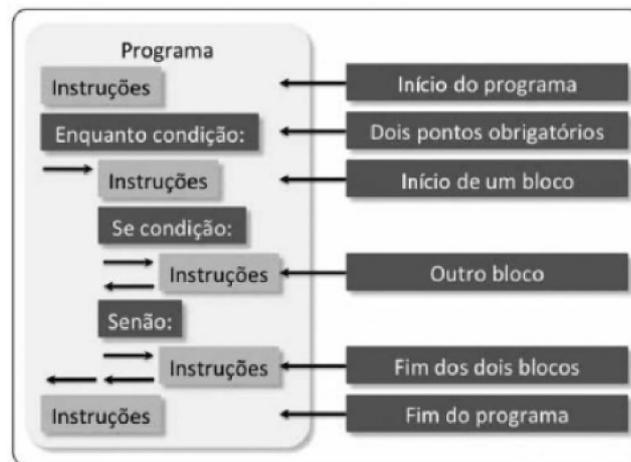
*Python* é uma linguagem de programação desenvolvida nos anos 90 pelo matemático holandês, Guido Van Rossum. Essa linguagem foi desenvolvida a partir de outra linguagem existente na época, denominada ABC. Sua primeira versão foi lançada em 1991 e incluía os conceitos de classes com herança, funções e os tipos fundamentais de dados.

A linguagem utiliza uma programação de alto nível, orientada a objetos, tendo uma sintaxe simplificada e próxima da linguagem humana, tornando-a mais produtiva. Ela inclui estruturas de alto nível como listas e dicionários, módulos disponíveis para uso e *frameworks* que podem ser facilmente adicionados ao código (BORGES, 2014). Uma característica dessa linguagem é a possibilidade de compilação dos códigos em uma plataforma e a execução em outros sistemas. Isso é possível pois a linguagem é interpretada

através de *bytecode* pela máquina virtual *Python* (BORGES, 2014). Além dessa característica, é possível integrar o *Python* a outras linguagens de programação.

Atualmente, sua implementação é mantida pela PSF (*Python Software Foundation*) e a linguagem pode ser utilizada nas mais diversas aplicações, como *web*, *desktop*, servidores, automação, dentre outras. Além disso, por ter uma sintaxe simples e objetiva, a linguagem é de fácil aprendizado, portátil, *open source*, multiplataforma e gratuita. A Figura 2.11 exemplifica a estrutura de um programa em *Python*. Através dela é possível observar a importância da utilização de tabulações e espaços ao longo do código.

Figura 2.11 - Estrutura programa em Python.



Fonte: (BORGES, 2014).

Para este trabalho o *python* foi utilizado para classificar a presença do  $\text{CO}_2$  em um banco de dados utilizando dois diferentes métodos disponíveis: o *MLP Classifier* e o *fit method* combinado com o *predict method*. Além dos métodos de classificação e predição, a função *train test split* também foi utilizada para dividir o banco de dados em dados de treino e teste para posterior classificação.

## 3 Metodologia

Este trabalho apresenta uma nova maneira de mensurar a presença do  $\text{CO}_2$  em LPGs revestidas com o óxido de carbono. Para essa proposta serão utilizados conceitos explicados anteriormente como *coating* (revestimento da fibra) e *tapering* (afunilamento da fibra). Ao final da aplicação desses conceitos e com as simulações realizadas, serão discutidos os resultados da medição da concentração do  $\text{CO}_2$  e a inversão de vales dos espectros simulados.

### 3.1 Revestimento da fibra com óxido de grafeno (GO)

Para revestir a LPG com óxido de grafeno (GO) é importante entender e configurar parâmetros importantes desse composto. Autores como (ESPOSITO et al., 2020) e (DISSANAYAKE et al., 2019) realizaram trabalhos de aplicação do óxido de grafeno revestindo fibras para construção de sensores.

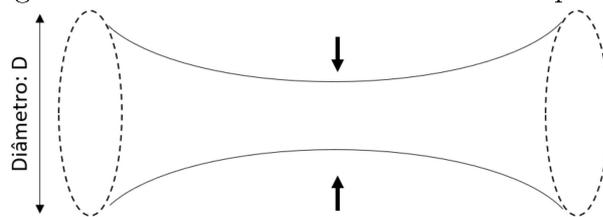
Para este trabalho em específico, resultados práticos de revestimento da LPG com óxido de grafeno (GO) foram realizados através de uma parceria entre os departamentos de pós graduação em Física e pós graduação em Engenharia Elétrica (Laboratório de Instrumentação e Telemetria - Litel) da Universidade Federal de Juiz de Fora. Para deposição do GO a LPG é imersa em uma solução de óxido de grafeno com concentração de 1mg/ml disperso em água deionizada (DI) utilizando a técnica *dip coating* por um período de 1 hora sob um *hot-plate* com temperatura de  $50^\circ\text{C}$ . Após a deposição do óxido, os alunos do grupo de pesquisa do departamentode Física juntamente com os alunos do laboratório Litel desenvolveram um *setup* com um fluxo constante de ârgonio a 100 sccm ( $\text{cm}^3/\text{minuto}$ ) durante 20 minutos para retirada da umidade do ambiente. Com esse fluxo constante, adicionou-se um novo fluxo porém de  $\text{CO}_2$  em uma câmara com a LPG revestida pelo GO. O espectro proposto buscou eliminar toda a umidade do ambiente externo de modo a obter somente o espectro influenciado pelo GO e pelo  $\text{CO}_2$ . Após a definição do espectro prático da LPG revestida com GO, o mesmo foi transferido

para o *Optigrating* e a partir do espectro obtido via *software*, simulações de adição de CO<sub>2</sub> e implementação de *tapering* foram realizadas de maneira a aproximar os resultados simulados dos resultados práticos.

## 3.2 Afunilamento da fibra (*tapering*)

Conforme citado brevemente na seção 2.1.5, o afunilamento em uma fibra óptica pode ser produzido esticando suavemente a fibra enquanto a mesma é aquecida. Neste processo, a fibra quando modificada deixa exposto o campo evanescente, o que a torna sensível a influências externas (MENDES, 2007). Há diferentes técnicas de aplicação de *taper* em fibras ópticas. Aquecimento por chama, utilização de laser, corrosão química por meio de ácido fluorídrico são exemplos de métodos.

Figura 3.1 - Afunilamento de uma fibra óptica.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Para este trabalho, o uso do *taper* permitirá observar maiores variações no espectro quando alterados os índices de refração externos à LPG. Através desse método a variação entre o campo e o meio externo tende a ser maior. Inicialmente serão aplicados diferentes porcentagens de afunilamento no espectro para posterior definição de qual a melhor variação observada de acordo com os classificadores propostos neste trabalho. As melhores respostas serão apresentadas a seguir no capítulo de Resultados.

## 3.3 Medição de gases (CO<sub>2</sub>)

Medir a quantidade de dióxido de carbono em alguns ambientes não é uma tarefa simples e quando em altas quantidades, esse composto pode ser tornar preocupante. Os sensores a fibra óptica têm se mostrado soluções eficazes para a medição de diferentes

gases, dentre eles o CO<sub>2</sub>.

Para este trabalho, o índice de refração será o principal parâmetro utilizado para medição do CO<sub>2</sub>. Isso porque, conforme (ABRAMOV et al., 1999), por se tratar de uma propriedade fundamental, utilizar o índice de refração (RI) é uma maneira eficaz de identificar a presença de uma determinada substância. As LPGs (Redes de Período Longo) mostram-se soluções ideais para essas aplicações, isso porque, conforme equação destacada abaixo, a sensibilidade do índice de refração de uma LPG resulta do índice de refração efetivo ( $n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}$ ) no índice de refração do meio externo (DELGADO, 2017), (ABRAMOV et al., 1999).

$$\lambda^m = (n_{\text{eff}}^{\text{core}}(\lambda) - n_{\text{eff}}^{\text{mcladding}}(\lambda)) * \Lambda \quad (3.1)$$

Sendo:  $\lambda^m$  é o comprimento de onda ressonante do modo de revestimento de ordem m,  $n_{\text{eff}}^{\text{core}}$  e  $n_{\text{eff}}^{\text{cladding}}$  são os índices de refração efetivos do modo de núcleo fundamental e do modo de revestimento de ordem m, respectivamente e  $\Lambda$  é o período da grade (na faixa de dezenas a centenas de micrometros).

Aumentando o índice externo, os comprimentos de onda se alteram para comprimentos de onda mais curtos. Com a variação dos comprimentos de onda é possível realizar a análise das redes como sensores sensíveis à variação de índice de refração.

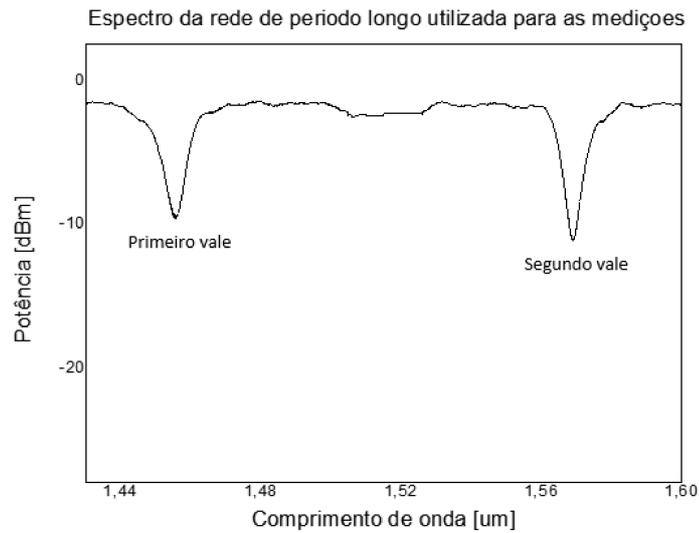
## 4 Resultados

A proposta deste trabalho é apresentar uma nova maneira de identificar a presença do CO<sub>2</sub> utilizando uma LPG revestida com óxido de grafeno (GO), aplicando conceitos apresentados por diferentes autores, como (MARTINS, 2016) e (OLIVEIRA, 2019). Para observar a presença desse gás é importante analisar a resposta espectral da LPG frente às variações de índice de refração externo, uma vez que esse será o parâmetro norteador para toda a pesquisa.

### 4.1 Sensibilidade do espectro em função das variações de índice de refração

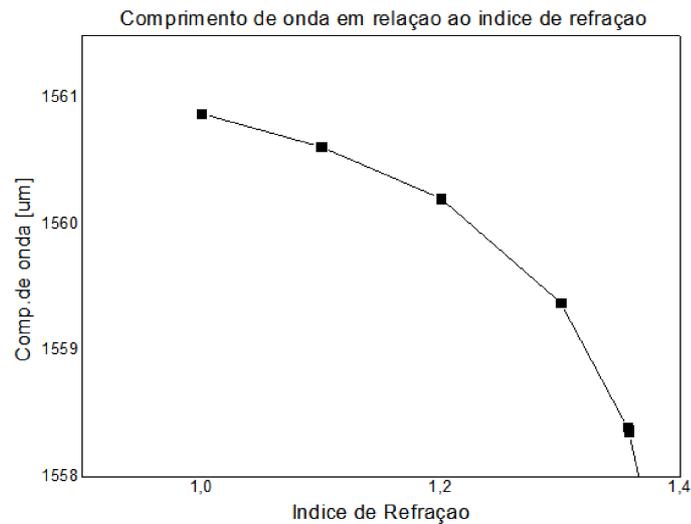
A primeira análise realizada foi a caracterização da LPG em função do índice de refração externo de maneira a medir a concentração de CO<sub>2</sub>. Para essa primeira análise, o espectro utilizado não apresenta revestimento do óxido de grafeno, porém o sensor precisa apresentar uma boa sensibilidade quando ao CO<sub>2</sub>, deste modo os valores de índice de refração em função do CO<sub>2</sub> são decorrentes de um revestimento da LPG através de uma camada química, conforme apresentado em 2.2.1. A caracterização da variação dos comprimentos de onda de ressonância foi realizada considerando uma variação de índice de refração na faixa de 1-1.4 com temperatura constante de 25°C em uma LPG projetada e simulada no *software Optigrating* considerando uma fibra SMF-28 com período de 590 μm e raios de núcleo e casca afunilados para 88% de seus valores originais (Figura 4.1).

Figura 4.1 - Espectro LPG utilizada para as medições.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Figura 4.2: Deslocamento do comprimento de onda de ressonância do segundo vale para o índice de refração na faixa de 1-1.4.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Os valores da Figura 4.2 podem ser observados a Tabela 4.1.

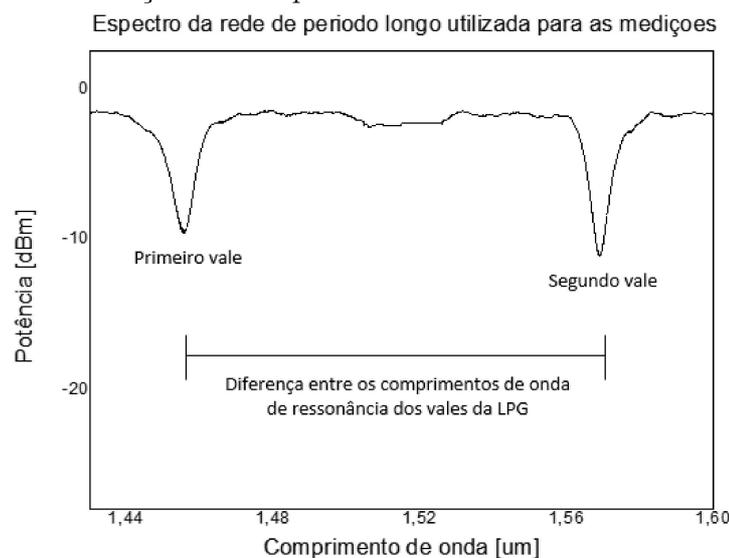
Tabela 4.1: Variações de RI e comprimento de onda de ressonância do 2º vale do espectro

| Sensibilidade RI (%) | Comp. de onda (nm) |
|----------------------|--------------------|
| 1                    | 1560.880           |
| 1.1                  | 1560.614           |
| 1.2                  | 1560.208           |
| 1.3                  | 1559.382           |
| 1.3558               | 1558.3956          |
| 1.3567               | 1558.372           |
| 1.3570               | 1558.3644          |
| 1.3571               | 1558.3616          |
| 1.3572               | 1558.3588          |
| 1.3573               | 1558.3564          |
| 1.4                  | 1556.510           |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Após o entendimento da variação do índice de refração, uma segunda análise foi realizada propondo um sensoriamento baseado no efeito cruzado da concentração do CO<sub>2</sub> e da temperatura do meio externo. Primeiramente, foram realizadas variações da temperatura (22°C - 27°C) e índice de refração da LPG. Após isso, foram medidas as diferenças entre os comprimentos de onda de ressonância, permitindo identificar quando o índice de refração e a temperatura atuam no sensor. O valor deste índice é a concentração de CO<sub>2</sub>.

Figura 4.3 - Diferença dos comprimentos de onda de ressonância da LPG.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Com o valor da diferença do comprimento de onda de ressonância de ambos os

vales é possível estimar o efeito da temperatura na LPG utilizando a equação indicada abaixo:

$$T = 1.2951 * \Delta\lambda - 116.8517 \quad (4.1)$$

Sendo T a temperatura e  $\Delta\lambda$  a diferença entre os comprimentos de onda de ressonância. Considerando o efeito da temperatura, é possível definir o valor do índice de refração através da Tabela 4.2 para temperaturas de 22°C - 27°C, sendo x o valor do índice de refração desejado.

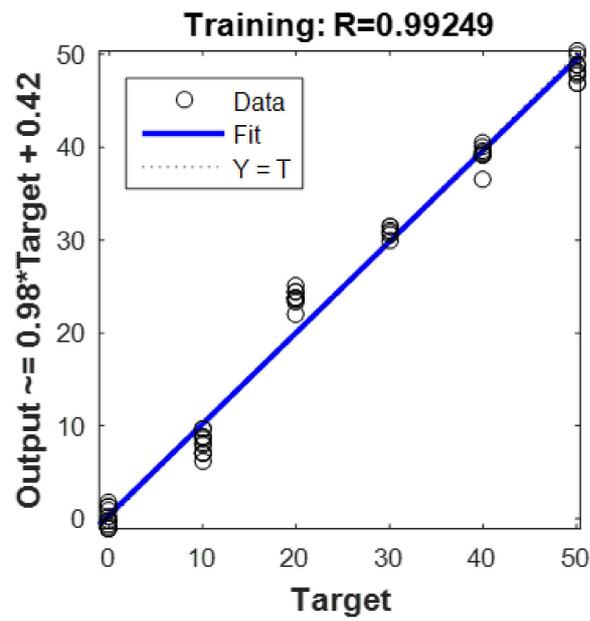
Tabela 4.2: Relação entre temperatura e RI em relação às diferenças dos comprimentos de onda ressonantes

| $\Delta\lambda$ | Temperatura (°C) | Equação característica                    |
|-----------------|------------------|---|
| 107.21-107.24   | 22               | $\Delta\lambda = -18.39088 x + 132.17673$ |
| 107.97-107.99   | 23               | $\Delta\lambda = -18.13681 x + 132.58936$ |
| 108.73-108.77   | 24               | $\Delta\lambda = -18.46254 x + 133.79597$ |
| 109.04-109.08   | 24.4             | $\Delta\lambda = -18.54723 x + 134.21938$ |
| 109.27-109.31   | 24.7             | $\Delta\lambda = -18.28339 x + 134.09296$ |
| 109.50-109.54   | 25               | $\Delta\lambda = -18.5993 x + 134.7541$   |
| 109.74-109.78   | 25.3             | $\Delta\lambda = -18.95114 x + 135.46455$ |
| 109.97-110.01   | 25.6             | $\Delta\lambda = -20.20847 x + 137.40479$ |
| 110.20-110.24   | 25.9             | $\Delta\lambda = -19.25407 x + 136.34364$ |
| 110.44-110.48   | 26.2             | $\Delta\lambda = -18.87948 x + 136.07072$ |
| 110.68-110.71   | 26.5             | $\Delta\lambda = -18.70033 x + 136.06325$ |
| 110.91-110.95   | 26.8             | $\Delta\lambda = -19.25081 x + 137.04687$ |
| 111.07-111.11   | 27               | $\Delta\lambda = -21.06515 x + 139.6685$  |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

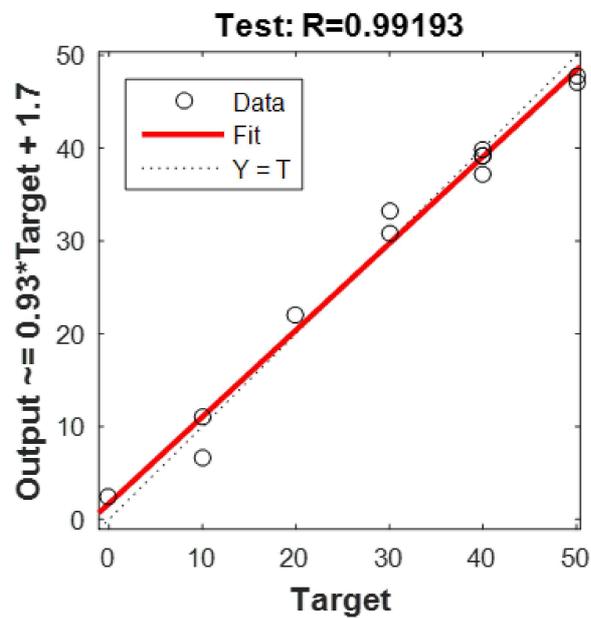
Para comprovação da medição do CO<sub>2</sub>, foram utilizadas redes neurais artificiais, através do *software Matlab*, para realização da estimativa da concentração desse gás em temperatura ambiente. Essa rede é esquematizada com 2 entradas, 13 neurônios, 70% das amostras para treino, 15% para teste, 15% para validação e o algoritmo *Levenberg-Marquardt*. As entradas correspondem às distâncias entre os comprimentos de onda (Figura 4.3) e as diferenças de atenuação em dB entre estes para cada valor de temperatura (variando de 22°C - 27°C).

Figura 4.4 - Resultados rede neural - Treino.



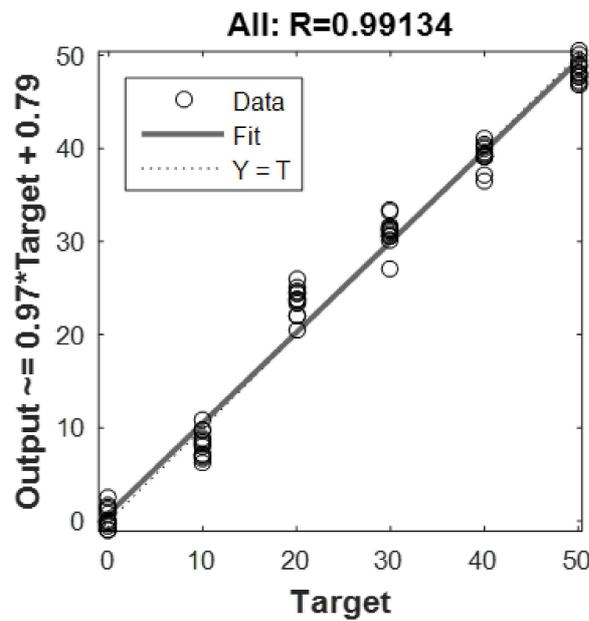
Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Figura 4.5 - Resultados rede neural - Teste.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Figura 4.6 - Resultados rede neural - Consolidado.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Através das Figura 4.5, Figura 4.5 e Figura 4.6 observa-se que utilizando as redes neurais artificiais torna-se possível encontrar as variações de concentração de  $\text{CO}_2$  (utilizando o parâmetro temperatura do ambiente) com um pequeno erro, comprovando a aplicabilidade da rede.

Pela dificuldade de se obter na prática um espectro com dois vales (Figura 4.1), optou-se pela análise do espectro com somente um vale revestido por um novo composto: o óxido de grafeno (elemento capaz de aumentar a sensibilidade da LPG). As análises a seguir foram realizadas utilizando essa nova abordagem.

## 4.2 Espectro prático de uma LPG revestida com óxido de grafeno

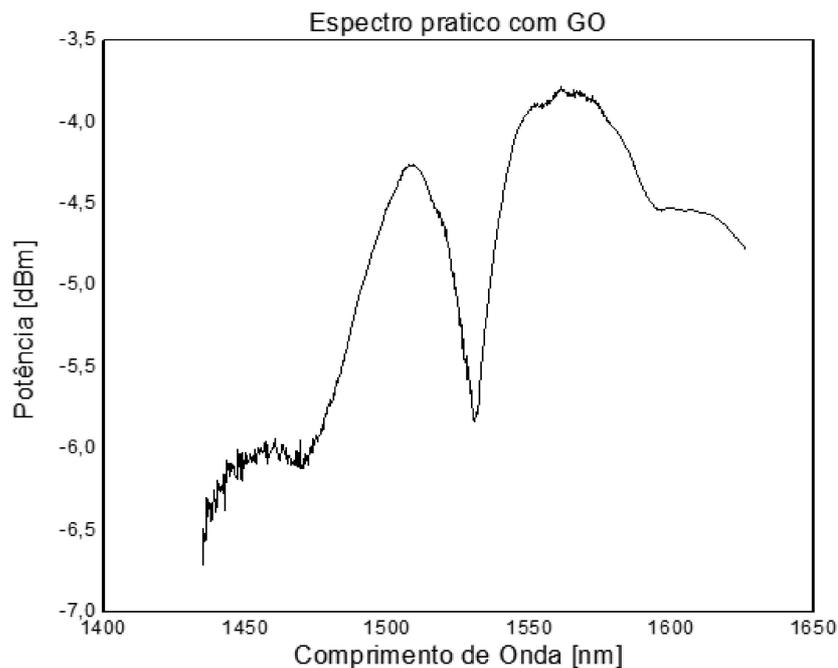
Após o entendimento da presença do  $\text{CO}_2$  em função das variações de índice de refração, essa seção apresentará um espectro de uma LPG revestida com óxido de grafeno. Na prática, também foi utilizada uma fibra SMF-28 porém com as seguintes características:

Tabela 4.3 - Especificações LPG

| LPG (%)                      | SMF-28        |
|------------------------------|---------------|
| Raio do núcleo               | 4.15 $\mu m$  |
| Raio do casca                | 58.35 $\mu m$ |
| Índice de Refração do Núcleo | 1.4497        |
| Índice de Refração do Casca  | 1.44411       |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Figura 4.7 - Espectro prático com GO.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

## 4.3 Simulação LPG revestida com óxido de grafeno

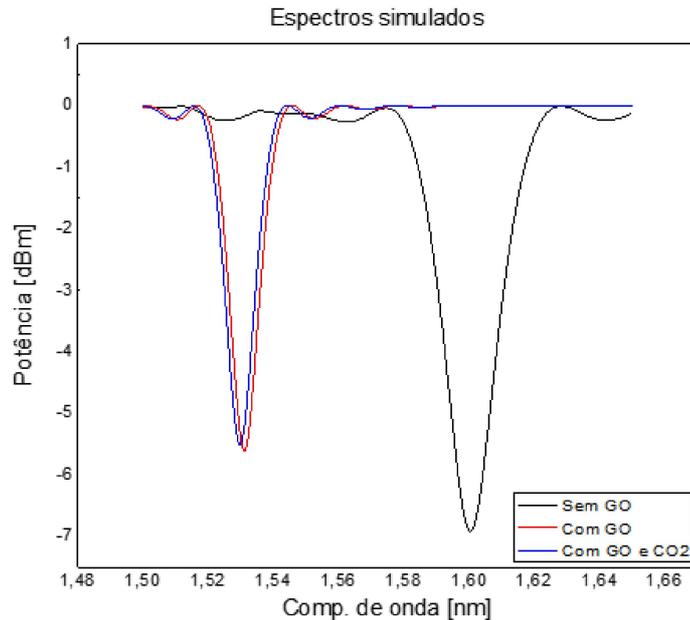
Com o espectro prático apresentado na seção 4.2 e na Figura 4.7, foram realizadas simulações utilizando o *software Optigrating*. Para essas simulações duas análises foram desenvolvidas: LPG com e sem *tapering*. Importante destacar que as simulações apresentadas a seguir seguem resultados práticos (trabalho realizado entre os departamentos de Física e Engenharia Elétrica (Litel) da Universidade Federal de Juiz de Fora).

### 4.3.1 LPG simulada

Equivalente ao espectro obtido na prática, realizou uma simulação de uma LPG sem *tapering* com a aplicação de óxido de grafeno. Após a aplicação do óxido de grafeno,

inseriu-se o  $\text{CO}_2$  (índice de refração = 1.3573) a partir da sensibilidade da LPG ao índice de refração do meio externo. Esses espectros podem ser observados na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Espectros sem tapering.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

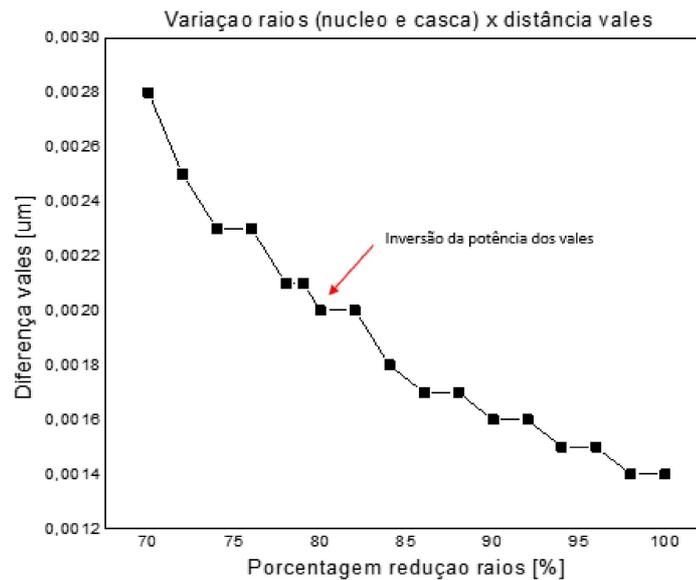
Na Figura 4.8 é possível observar o espectro simulado com a presença do GO na cor vermelha (similar ao espectro prático da Figura 4.7), esse mesmo espectro com a presença do  $\text{CO}_2$  (cor azul) e o espectro sem a influência do GO e do  $\text{CO}_2$  (cor preta).

### 4.3.2 LPG simulada com *tapering*

Seguindo o mesmo conceito apresentado em 4.3.1, foram realizadas simulações aplicando *taperings* na faixa de 70% - 99% de redução dos raios do núcleo e da casca de modo a observar o impacto das reduções desses parâmetros na medição do  $\text{CO}_2$  através da sensibilidade da LPG ao índice de refração do meio externo. Para essas simulações, foram alterados somente os raios do núcleo e da casca, porém as demais especificações das fibras apresentadas na Tabela 4.3 foram mantidas constantes.

Para 100% dos raios (espectro original da Figura 4.8), a diferença entre os comprimentos de onda de ressonância do espectro com  $\text{CO}_2$  e sem  $\text{CO}_2$  é de  $0.014 \mu\text{m}$ . A medida que os raios são reduzidos, essa variação aumenta conforme Figura 4.9.

Figura 4.9 - Variação de tapering vs distância vales.



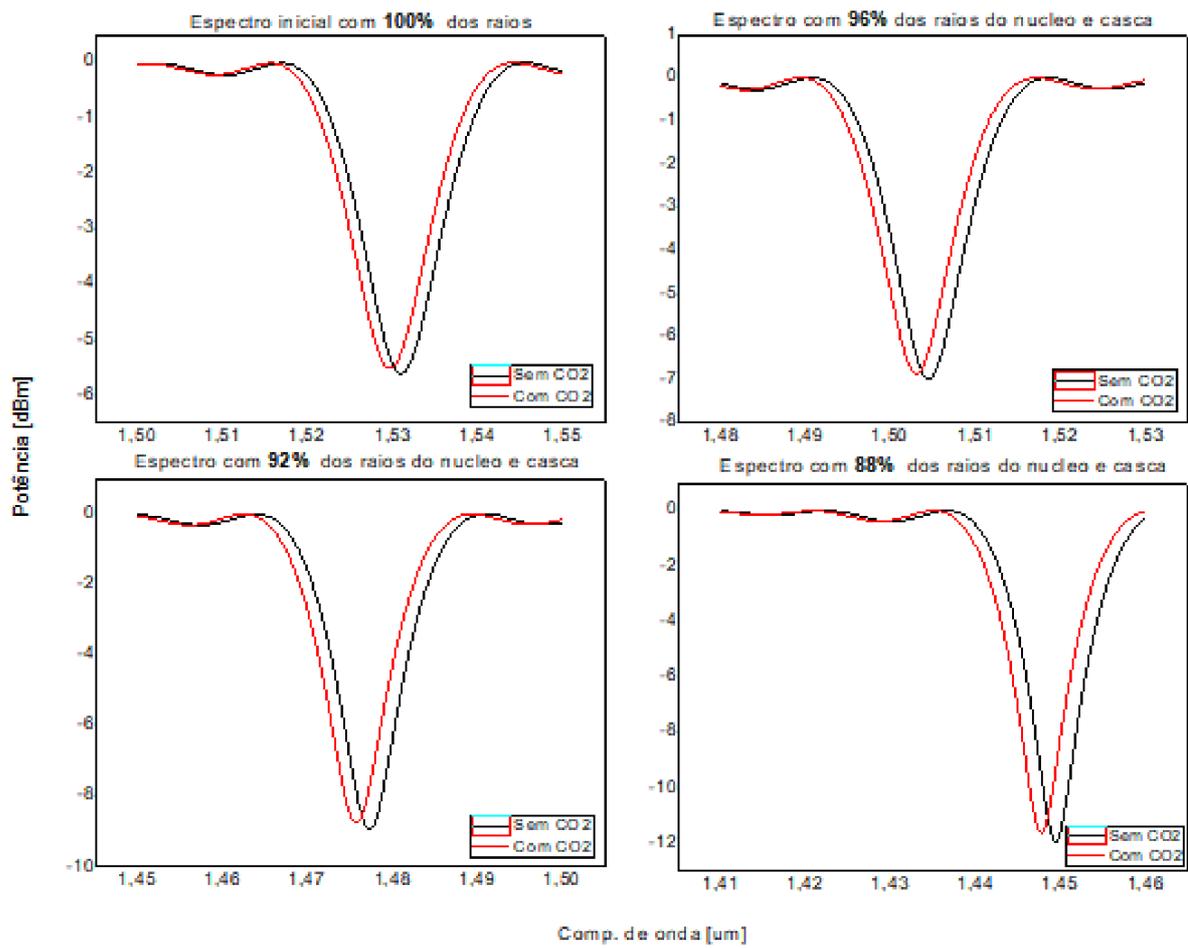
Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Conforme indicado na Figura 4.9, a medida que os raios são reduzidos, a diferença entre os vales do espectro sem  $\text{CO}_2$  e com  $\text{CO}_2$  aumenta. Porém, em contrapartida, para uma redução específica (neste caso para os raios do núcleo e casca iguais à 79% de seus valores originais), ocorre uma inversão de potência dos vales.

### 4.3.3 Aplicação do *tapering* e inversão de potência dos vales

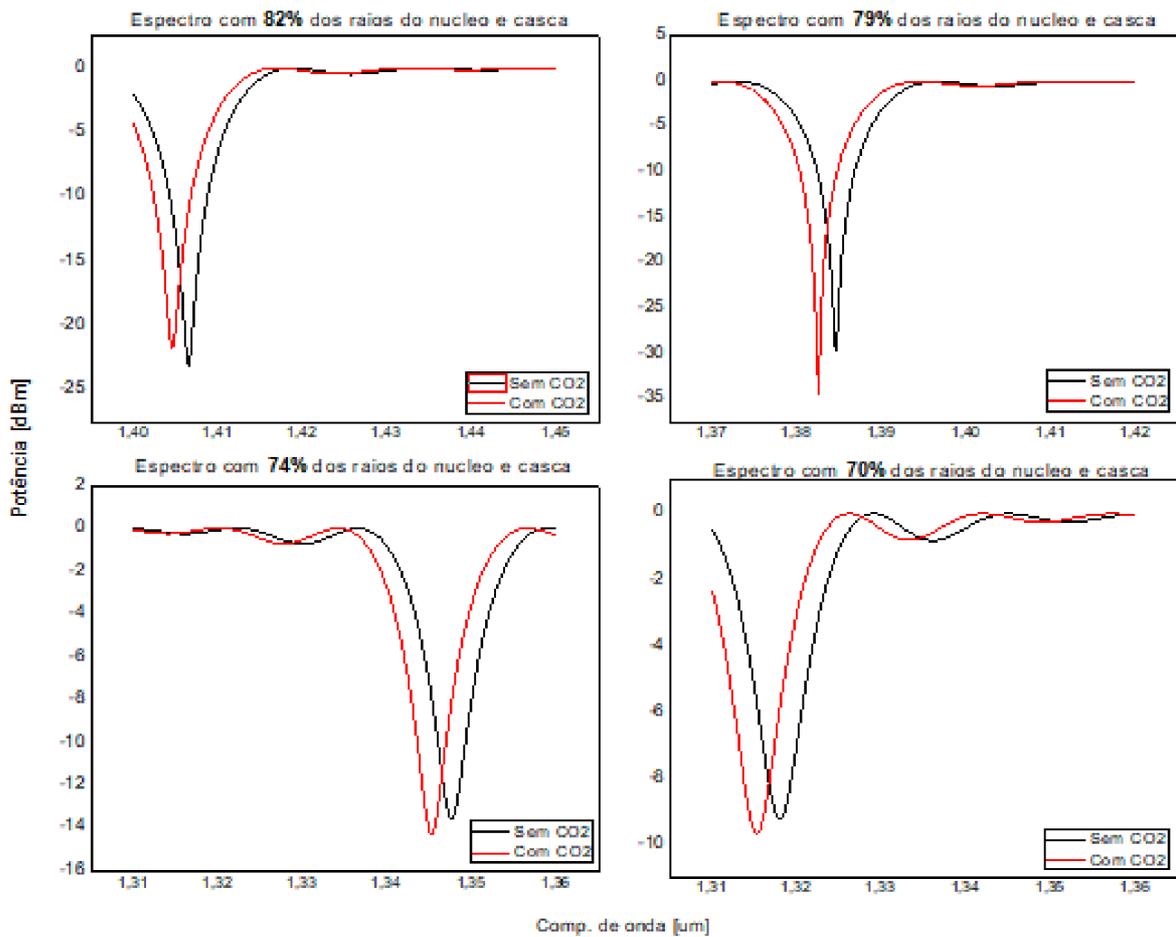
Como citado no item anterior, os raios do núcleo e da casca foram reduzidos através da aplicação de afunilamento (*tapering*). Para este caso variações de 70% a 100% foram realizadas de maneira a observar o aumento da sensibilidade do sensor ao meio externo. Para uma redução de 21% dos raios do núcleo e da casca (sensor com 79% dos raios iniciais do núcleo e casca) ocorre uma inversão de potência dos vales dos espectros sem  $\text{CO}_2$  e com  $\text{CO}_2$ . Essas alterações podem ser observadas nas Figura 4.10 e Figura 4.11.

Figura 4.10 - Variação de tapering (88% - 100%).



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Figura 4.11 - Variação de tapering (70% - 82%).



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

## 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO

Com os espectros e banco de dados apresentados nas Figura 4.8 e Figura 4.9 e utilizando o *software Matlab* e programação em *python*, a próxima etapa foi definir um classificador capaz de identificar a presença do CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas pelo óxido de grafeno (GO).

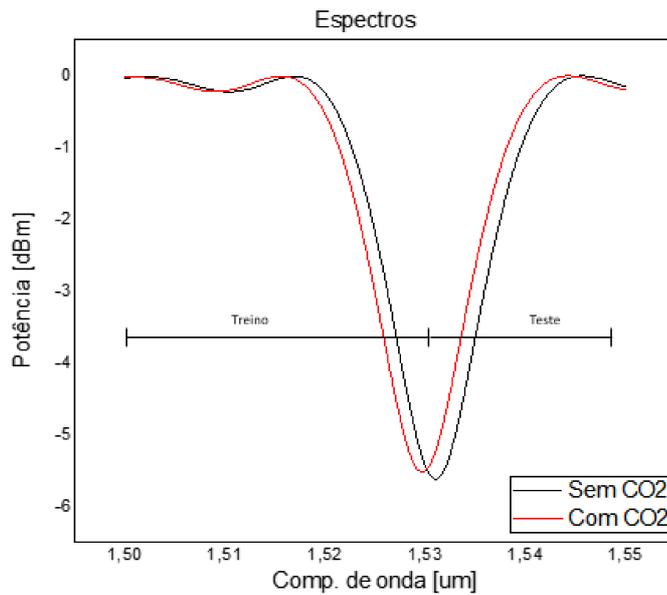
### 4.4.1 Classificação de sensor a LPG com CO<sub>2</sub> utilizando o *software Matlab*

Para a primeira análise definiu-se um classificador que fosse capaz de identificar a presença do CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas pelo óxido de grafeno através do espectro exem-

4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO43 plificado na Figura 4.8 e da utilização do classificador *fitcknn* do *software Matlab*. Esse método representa um modelo de classificação baseado nos k-vizinhos mais próximos com base nas variáveis de entrada do modelo a ser treinado.

Para o classificador foram treinados os seguintes conjuntos de dados: 100%, 88% e 74% (valor onde há a inversão de potência dos espectros) dos raios do núcleo e da casca. O banco de dados foi dividido em dois conjuntos: teste e treino, conforme Figura 4.12.

Figura 4.12 - Divisão banco de dados para utilização da função *fitcknn*.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Tabela 4.4 - Resultados Classificador k-vizinhos (100% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 55.00 %    |
| K5           | 50.26 %    |
| K10          | 51.05 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Tabela 4.5 - Resultados Classificador k-vizinhos (88% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 50.00 %    |
| K5           | 53.30 %    |
| K10          | 49.06 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Tabela 4.6 - Resultados Classificador k-vizinhos (74% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 45.16 %    |
| K5           | 46.77 %    |
| K10          | 44.76 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

As respostas do classificador são demonstradas nas Tabela 4.4, Tabela 4.5 e Tabela 4.6. Através dos resultados é possível observar que para diferentes quantidade de vizinhos (1, 5 e 10), as respostas dos classificadores para um banco de dados segregado conforme Figura 4.12 permanecem em aproximadamente 50% de acerto.

#### 4.4.2 Classificação de sensor a LPG com CO<sub>2</sub> utilizando programação em *python*

Para a segunda análise definiu-se um classificador através da programação em *python* que fosse capaz de identificar a presença do CO<sub>2</sub> com a LPG revestida pelo GO. Para este segundo classificador, além dos dados do espectro da Figura 4.8, foram utilizados também como entrada o valor do comprimento de onda de ressonância do espectro e as diferenças entre as potências dos espectros com e sem CO<sub>2</sub> (Figura 4.13).

Para a programação em *python* foi utilizado o classificador *MLPClassifier* (*Multi-layer Perceptron classifier*) combinado com os métodos: *fit method* e *predict method*.

O banco de dados foi segregado utilizando a função *train test split* com 80% dos dados para treinamento do classificador e 20% para teste. Seguindo o mesmo princípio da simulação realizada no *software Matlab*, foram analisados os espectros para 100%, 88% e 74% dos raios do núcleo e da casca (aplicação do *tapering*).

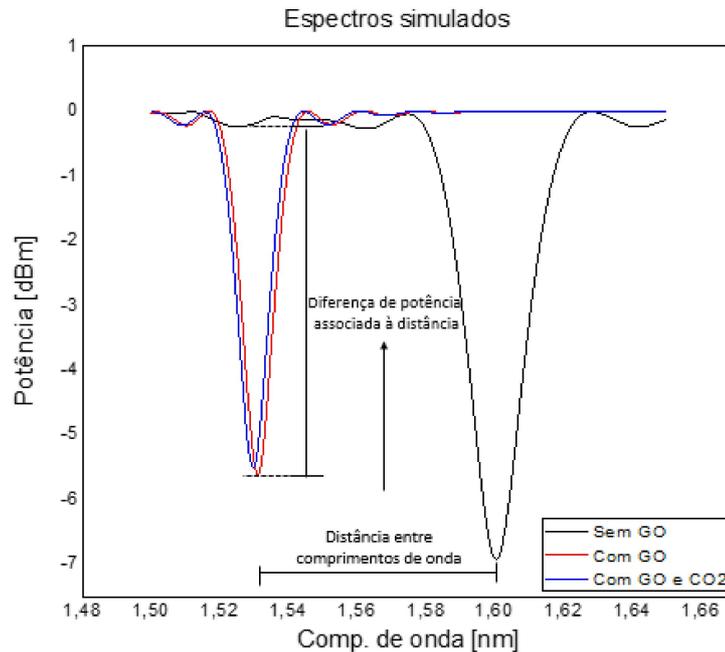
Tabela 4.7 - Resultados classificação *python*

| %Taper | (%) Acerto fit/predict |
|--------|------------------------|
| 100%   | 53.41 %                |
| 88%    | 53.48 %                |
| 74%    | 54.21 %                |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

#### 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO45

Figura 4.13: Diferença das potências dos vales revestida pelo óxido de grafeno (GO) com e sem CO<sub>2</sub>.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Através dos resultados apresentados na Tabela 4.7 é possível observar que alterando o classificador e a lógica de segregação do banco de dados (Figura 4.13), as respostas apresentam uma melhora frente aos resultados apresentados em 4.4.1, porém com um grau de acerto ainda relativamente baixo.

#### 4.4.3 Classificação de sensor a LPG com CO<sub>2</sub> utilizando ambos os softwares Matlab e python

Uma nova abordagem realizada foi a utilização do *software Matlab* em conjunto com a linguagem de programação em *python* com o intuito de obter um melhor resultado para a classificação. Para este caso, utilizou a função *train test split* do *python* para separar o banco de dados em 80% dos valores em dados para treino e os 20% restantes em dados de teste. Com esse banco de dados utilizou-se o classificador *fitcknn* do *Matlab*. Dessa maneira, utilizou-se uma linguagem para tratativa dos dados e um outro *software* para definição de um classificador. Os resultados podem ser observados a seguir.

#### 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO46

Tabela 4.8: Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (100% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 18.41 %    |
| K5           | 29.35 %    |
| K10          | 40.80 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Tabela 4.9: Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (88% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 90.05 %    |
| K5           | 90.05 %    |
| K10          | 87.56 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Tabela 4.10: Resultados Classificador k-vizinhos com dados tratados no python (74% raios núcleo e casca)

| (K-Vizinhos) | (%) Acerto |
|--------------|------------|
| K1           | 58.21 %    |
| K5           | 59.20 %    |
| K10          | 58.21 %    |

Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Comparando os resultados com as seções 4.4.1 e 4.4.2 é possível observar que as respostas apresentam uma melhora quando combinados *Matlab* e *python* para tratativa dos dados e obtenção dos resultados de classificação do sensor a LPG com CO<sub>2</sub>. Além disso, combinando as duas linguagens de programação é possível ainda determinar um valor de *taper* ideal, conforme resultados apresentados na Tabela 4.9.

#### 4.4.4 Utilização de rede neural artificial para mensurar a concentração de CO<sub>2</sub> na LPG revestida pelo óxido de grafeno

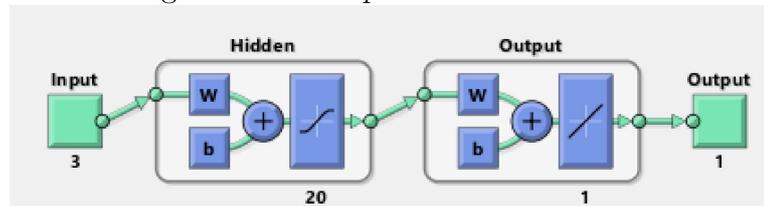
Após a definição do melhor *tapering* para identificar a presença do CO<sub>2</sub> na LPG revestida pelo GO, uma nova abordagem foi desenvolvida visando determinar a porcentagem desse gás na LPG. Utilizando a *toolbox Neural Netwok fitting* do *software Matlab*

#### 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO47

foram definidos como parâmetros de entrada: comprimento de onda de ressonância do espectro (com 88% de *taperig*) revestido pelo GO, potência do espectro e as diferenças das potências entre o espectro com o gás e o espectro original. A saída da rede neural será a porcentagem de concentração do gás variando de 0 - 5 (0% à 50% de CO<sub>2</sub> conforme Tabela 2.2). Os parâmetros da rede neural utilizada foram: 20 neurônios, 80% das amostras para treino, 10% para teste, 10% para validação e algoritmo de treinamento: *Bayesian Regularization*. Esse algoritmo minimiza uma combinação de erros quadrados e pesos e, em seguida, determina a combinação correta para produzir uma rede que generaliza bem os resultados (MATHWORKS, 2022).

Para identificar a porcentagem de acerto da rede e referenciando o trabalho apresentado por (ARAUJO et al., 2016), os dados de saída do algoritmo foram arredondados para comparação com os dados originais. Sendo assim, os resultados fracionários serão arredondados para valores inteiros e comparados com a concentração original de CO<sub>2</sub>.

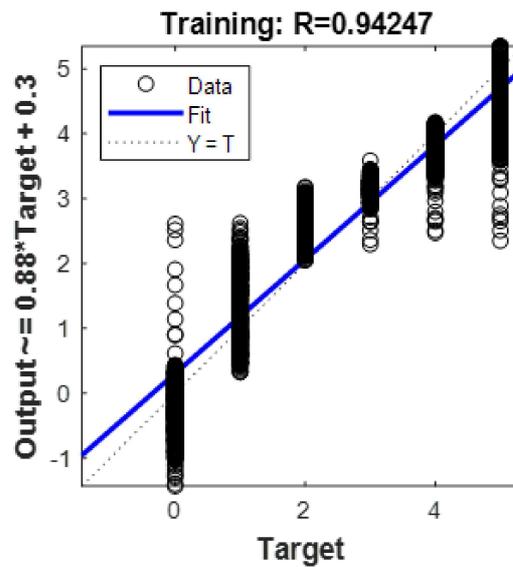
Figura 4.14 - Esquemático rede neural.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

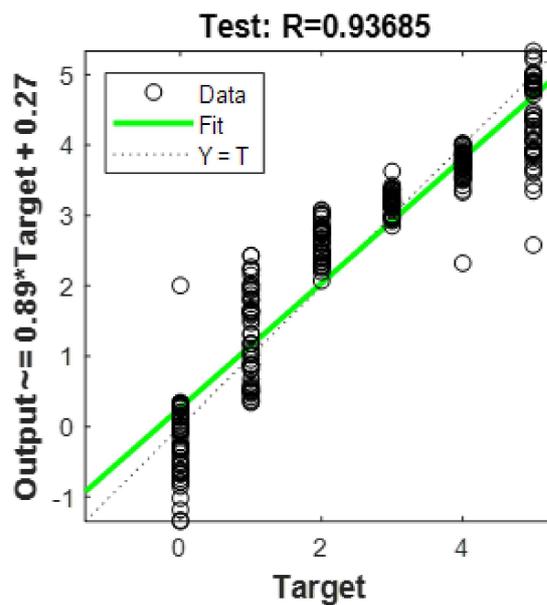
4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO48

Figura 4.15 - Resultados obtidos rede neural - Treino.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

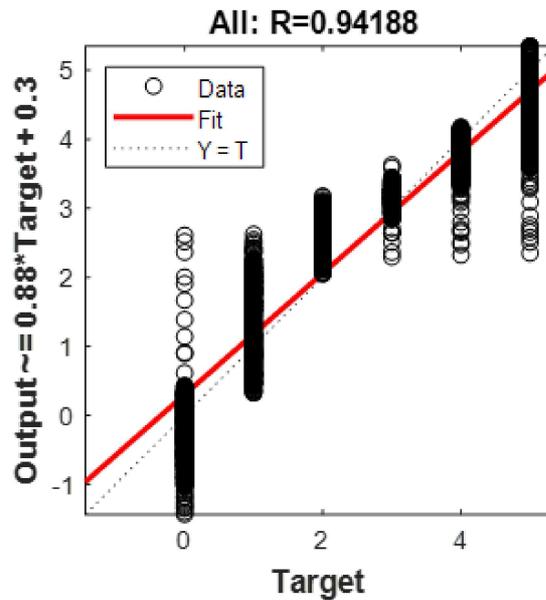
Figura 4.16 - Resultados obtidos rede neural - Teste.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Através das Figura 4.15, Figura 4.16 e Figura 4.17, os dados foram arredondados e comparados com as respostas originais e o resultado obtido foi de 69.06% de acerto.

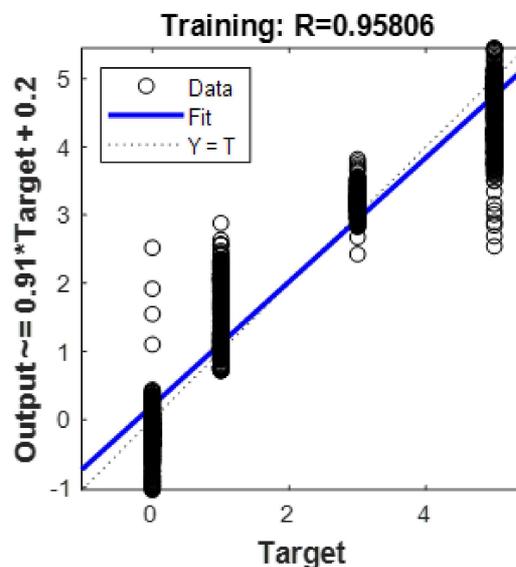
Figura 4.17 - Resultados obtidos rede neural - Consolidado.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Uma segunda simulação foi realizada espaçando as concentrações de CO<sub>2</sub>. Para este caso, foram consideradas as porcentagens de 0%, 10%, 30% e 50% do gás com o intuito de observar a resposta da rede neural em função de intervalos maiores de concentrações. Os parâmetros da rede neural utilizada foram similares aos das simulações apresentadas acima (Figuras 4.14), sendo: 20 neurônios, 80% das amostras para treino, 10% para teste, 10% para validação e algoritmo de treinamento: *Bayesian Regularization*.

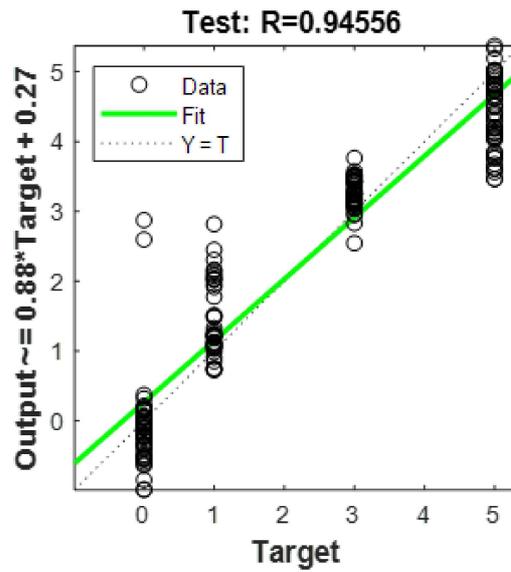
Figura 4.18 - Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Treino.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

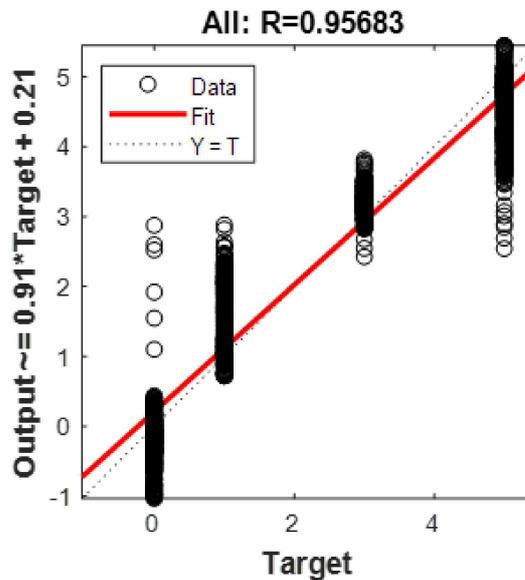
#### 4.4 Utilização de classificadores para identificar a presença de CO<sub>2</sub> em LPGs revestidas de GO50

Figura 4.19 - Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Teste.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Figura 4.20 - Resultados obtidos pela segunda simulação da rede neural - Consolidado.



Fonte: Adaptado do software Matlab, 2022.

Através das Figura 4.18, Figura 4.19 e Figura 4.20, comparando as respostas da rede com as respostas originais, o resultado obtido para rede neural com concentrações espaçadas foi de 75.99% de acerto.

## 5 Conclusão

Neste trabalho foi proposto um sistema de medição de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) utilizando um sensor de fibra óptica revestido com óxido de grafeno (GO). A escolha pela utilização do GO ocorreu pela dificuldade de se obter na prática dois vales de um mesmo espectro, portanto, trabalhando com um único vale revestido pelo GO é possível observar um aumento da sensibilidade da LPG em função das variações externas. Através de simulações ficou comprovado que reduzindo os raios do núcleo e da casca (*taper*) da LPG o sensor proposto fica mais sensível a variações externas. Diante desse fato, utilizando o espectro revestido com óxido de grafeno, simulações de redução dos raios da LPG na faixa de 70% a 100% foram realizadas de modo a observar as variações das distâncias dos espectros com e sem  $\text{CO}_2$ . Conforme demonstrado na seção 4.3.3, a medida que são reduzidos os raios do núcleo e casca da LPG, a distância entre os espectros aumenta e a partir de uma redução específica de 21% ocorre uma inversão das potências dos vales, logo o espectro com  $\text{CO}_2$  começa a apresentar uma potência maior em módulo que o espectro sem o gás. Entendendo as variações dos espectros impactadas pelo *tapering*, foram propostos classificadores que fossem capazes de identificar a presença do  $\text{CO}_2$  no ambiente. Em relação a escolha dos espectros quanto às variações de *tapering* para construção do classificador, utilizou-se o espectro completo (100%), um espectro abaixo de 79% (onde ocorre a inversão de potências) e um espectro intermediário (88%).

Para o classificador diferentes análises foram realizadas utilizando duas abordagens (*software Matlab e python*) para classificação dos espectros em 100%, 88% e 74% dos raios do núcleo e da casca. O primeiro classificador proposto utilizou a função *fitcknn* do *software Matlab* (modelo de classificação baseado nos k-vizinhos mais próximos) e 3 variações diferentes de vizinhos (1, 5 e 10). Para tratativa dos dados, o espectro foi segregado conforme Figura 4.12 em dados de treino e teste. O segundo classificador utilizou a linguagem de programação em *python* e as funções *MLPClassifier* e *fit method* para classificação. O último classificador propôs a utilização de ambas as linguagens em conjunto. Neste caso, os dados foram tratados via *python* e classificados via *Matlab*. Para as duas

primeiras análises os resultados obtidos apresentam uma grau de acerto nas classificações na faixa de 50%. Para a última classificação proposta e para uma redução de 12% dos raios do núcleo e da casca, os resultados apresentam uma melhora conforme Tabela 4.9. Diante da definição do melhor *tapering* via simulações de classificadores, uma última abordagem utilizando redes neurais artificiais foi proposta para identificar a porcentagem de concentração do CO<sub>2</sub>. O resultado das redes neurais é de aproximadamente 69% de acerto das porcentagens de concentração do gás via sensor a fibra óptica (com variações de 10% em 10% conforme Tabela 2.2) e 76% de acerto de concentração do gás para variações de 0%, 10%, 30% e 50% do CO<sub>2</sub> externo à LPG (concentrações espaçadas). Esses resultados apresentam uma piora se comparados aos resultados apresentados na seção 4.1 (com o mesmo *tapering*), porém, novamente é enfatizado a dificuldade em se obter na prática um único espectro com dois vales espaçados conforme apresentado na Figura 4.1.

Embora os resultados obtidos nas simulações com o revestimento por GO não apresentem um acerto de 100% das informações, eles servem de embasamento e conhecimento para novas pesquisas que possam ser realizadas para medição de concentrações de diferentes materiais no meio ambiente. Como trabalhos futuros, propõe-se a realização de novas práticas da LPG revestida pelo óxido de grafeno com a aplicação do *tapering* de modo a validar os dados apresentados ao longo deste trabalho. Além disso, também é proposta uma pesquisa mais detalhada em novos classificadores utilizando outros *softwares* e diferentes métodos de classificação e como desafio a implementação destes tipos de sensores em larga escala (produção industrial).

## Bibliografia

ABRAMOV, A. A. et al. Electrically tunable efficient broadband fiber filter. In: *IEEE Photonics Technology Letters*. IEEE: n.4, 1999. v. 11, p. 445–447.

ALBERTO, N. J. Sensores de bragg para bioaplicações. In: *Tese de Doutorado*. Universidade de Aveiro: Portugal, 2011.

ARAUJO, M. A. et al. Classificação de distúrbios de qualidade de energia elétrica empregando redes neurais artificiais. In: *SBSE2016: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte: Natal, Rio Grande do Norte, 2016.

ASCORBE, J. et al. Optical fiber current transducer using lossy mode resonances for high voltage networks. In: *Journal of Lightwave Technology*. DOI: 10.1109/JLT.2015.2396353: IEEE, 2015. v. 33, p. 2504–2510.

AZIZ, A. et al. Silver/graphene nanocomposite-modified optical fiber sensor platform for ethanol detection in water medium. In: *Sensors and Actuators*. B:Chemical: Elsevier, 2015. v. 206, p. 119–125.

BAO, J. et al. Spectral characteristics of a two-section multilayer long-period fiber grating sensor. In: *Optik*. DOI: 10.1016/j.ijleo.2014.05.024: International Journal for Light and Electron Optics, 2014. v. 125, p. 4689–4693.

BORGES, L. E. *Python para desenvolvedores*. 3<sup>a</sup> edição: Novatec Editora Ltda, 2014.

BOTAS, C. et al. Graphene materials with different structures prepared from the same graphite by the hummers and brodie methods. In: *Carbon*. ScienceDirect: Elsevier, 2013. v. 65, p. 156–164.

CAMARGOS, J. S. F.; SEMMER, A. O.; SILVA, S. N. Características e aplicações do grafeno e do Óxido de grafeno e as principais rotas para síntese. In: *(SSRG-IJECE)*. The Journal of Engineering and Exact Sciences: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2017. v. 3, p. 1118–1130.

CORBOLAN, A. C.; OLIVEIRA, M. C.; SANTOS, A. B. Sensores a fibra óptica aplicados na medição de temperatura em máquinas elétricas. In: *MOMAG 2018*. Santa Rita do Sapucaí: Brasil, 2018.

DELGADO, F. S. Redes de período longo em fibras Ópticas aplicadas ao sensoriamento de corrente elétrica em vant's. In: *Mestrado em Engenharia Elétrica*. Universidade Federal de Juiz de Fora: Brasil, 2017.

DELGADO, F. S. et al. Investigation of carbon dioxide sensitivity in long period gratings. In: *12<sup>o</sup> CBMag - Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo; 17<sup>o</sup> SBMO - Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica e LAWOFS 2016 - Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors*. Porto Alegre: Brasil, 2016.

DING, Z. et al. Distributed optical fiber current sensor based on magnetostriction in ofdr. In: *Photon. Technol. Lett.* DOI: 10.1109/LPT.2015.2450237: IEEE, 2015. v. 27, p. 2055–2058.

- DISSANAYAKE, K. et al. Graphene oxide coated long period grating for optical sensing purposes. In: *Journal of Physics: Conference Series*. J Phys: doi:10.1088/1742-6596/1151/1/012022, 2019.
- ESPOSITO, F. et al. Long period grating in double cladding fiber coated with graphene oxide as high-performance optical platform for biosensing. In: *Biosensors and Bioelectronics*. journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/bios>: Elsevier, 2020. v. 172.
- FIDANBOYLU, K.; EFENDIOĞLU, H. Fiber optic sensors and their applications. In: *5th International Advanced Technologies Symposium (IATS'09)*. Karabuk University: Turkey, 2009.
- GEIM, A. K.; NOVOSELOV, K. S. The rise of graphene. In: *Manchester Centre for Mesoscience and Nanotechnology*. DOI: [https://doi.org/10.1142/9789814287005\\_0002](https://doi.org/10.1142/9789814287005_0002) : *NanoscienceandTechnology*, 2010.
- GONCALVES, G. et al. Breakdown into nanoscale of graphene oxide: Confined hot spot atomic reduction and fragmentation. In: *Scientific Reports*. DOI: 10.1038/srep06735: <https://www.nature.com>, 2014.
- GOUVEIA, C. et al. Measurement of co2 using refractometric fiber optic sensors. In: *3rd. WSEAS. SENSIG '10/MATERIALS'10: ADVANCES in SENSORS, SIGNALS and MATERIALS*, 2010. p. 169–173.
- HERNANDEZ, F. B. Sensor de força utilizando fiber taper. In: *Dissertação de Mestrado*. Universidade de São Paulo: Brasil, 2016.
- JAMES, S. W.; LEE, S. W.; TATAM, R. P. *Tapered Optical Fibre Sensors: Current Trends and Future Perspectives*. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/10/2294/htm>.
- JAMES, S. W.; TATAM, R. P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. In: *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING*. Optical Sensors Group, Centre for Photonics and Optical Engineering, School of Engineering, Cranfield University, Cranfield, Bedford, UK: IOP Publishing Ltd, 2003. v. 14, p. 49–61.
- JESUS, K. A.; FREIRE, E.; GUIMARÃES, M. J. O. C. Grafeno: Aplicações e tendências tecnológicas. In: *Departamento de Processos Orgânicos, Escola de Química*. Universidade Federal do Rio de Janeiro: Brasil, 2012.
- LACQUET, B. M.; SWART, P. L.; AMEER, G. Long-period grating with sol-gel coating for co2 detection. In: *Proc. SPIE 5502*. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.566601>: Second European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2014. p. 287.
- LASE; OPTICS; CORPORATION. *Tapered Fibers*. 2022. Disponível em: <https://laseoptics.com/tapered-fibers/>.
- LI, C. et al. A review of coating materials used to improve the performance of optical fiber sensors. In: *Sensors*. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20154215>: MDPI, 2020.
- LIN, H. Y. et al. *Tapered optical fiber sensor based on localized surface plasmon resonance*. 2012. Disponível em: <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-20-19-21693&id=241250>.

- LIU, J. et al. Highly versatile fiber-based optical fabry-pérot gas sensor. In: *Optics Express*. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.17.002731>: Optical Society of America, 2009. v. 17, p. 2731–2738.
- MARCANO, D. C. et al. Improved synthesis of graphene oxide. In: *ACS NANO*. [www.acsnano.org](http://www.acsnano.org): No 8, 2010. v. 4, p. 4806—4814.
- MARTINS, E. J. F. S. B. Aplicação e caracterização de revestimentos de óxido de grafeno em fibras óticas para desenvolvimento de sensores. In: *Mestrado em Engenharia Mecânica*. Universidade de Aveiro: Portugal, 2016.
- MATHWORKS. *Matlab*. 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- MENDES, C. J. E. S. Estruturas sensoras em fibra Óptica para monitorização ambiental baseadas em redes de período longo. In: *Dissertação de Mestrado*. Faculdade de Ciências da Universidade do Porto: Portugal, 2007.
- MENDONCA, J. P. A. Estrutura, espectro e síntese do Óxido de grafeno do ponto de vista computacional. In: *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de Juiz de Fora: Brasil, 2016.
- OLIVEIRA, M. C. Sensores a fibra óptica para medição da concentração de dióxido de carbono utilizando redes de período longo (lpg). In: *Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica*. Universidade Federal de Juiz de Fora: Brasil, 2019.
- PEI, Q. X.; ZHANG, Y. W.; SHENOY, V. B. A molecular dynamics study of the mechanical properties of hydrogen functionalized graphene. In: *ScienceDirect*. Carbon: Elsevier, 2009. v. 48, p. 898–904.
- POSSETTI, G. R. C. Sensor inteligente à fibra ótica para análise da qualidade da gasolina. In: *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*. Curitiba: Brasil, 2009.
- POSSETTI, G. R. C. et al. Long period grating transducer for measurement of ethanol concentration in water solution. In: *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: SBMO/SBMag, 2009. v. 8.
- SEHGAL, P.; DUA, H. Designing of a long period fiber grating (lpfg) using optigrating simulation software. In: *SSRG International Journal of Electronics and Communication Engineering*. University of Delhi, India: (SSRG-IJECE), 2015. v. 2.
- SHAMAILA, S.; SAJJAD, A. K. L.; IQBAL, A. Modifications in development of graphene oxide synthetic routes. In: *Chemical Engineering Journal*. ScienceDirect: Elsevier, 2016. v. 294, p. 458–477.
- SHREE, M. D.; SANGEETHA, A.; KRISHNAN, P. Analysis and optimization of uniform fbg structure for sensing and communication applications. In: *Photonic Network Communications*. [S.l.]: Springer Science+Business Media, 2020.
- SILVEIRA, C. N. Desenvolvimento de sensores baseados em fibra óptica afunilada para monitoramento ambiental. In: *Tese de Doutorado - Instituto de Tecnologia*. Universidade Federal do Pará: Brasil, 2015.

- SRIDEVI, S. et al. Optical bio-sensing devices based on etched fiber bragg gratings coated with carbon nanotubes and graphene oxide along with a specific dendrimer. In: *Sensors and Actuators*. B: Chemical: Elsevier, 2014. v. 195, p. 150–155.
- TIAN, Y. et al. Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules. In: *Sensors 2011*. www.mdpi.com/journal/sensors: 11(4), 2011. v. 11, p. 3780–3790.
- URRUTIA, A. et al. Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating. In: *Sensors and Actuators B: Chemical*. Sensors and Actuators B: Chemical: Elsevier, 2016. v. 227, p. 135–141.
- VILLAR, I. D. et al. Fringe generation with non-uniformly coated long-period fiber gratings. In: *Optics Express*. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.15.009326>: Optical Society of America, 2007. v. 15, p. 9326–9340.
- WENBIN, F.; ZHENG TIAN, G. Design of a high-sensitivity cascaded long-period fiber grating sensor operating at pmt. In: *Journal of the Optical Society of America B*. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.15.009326>: Optical Society of America, 2018. v. 35, p. 2788–2793.
- WONG, R. Y. et al. Optical fibre long-period grating sensors operating at and around the phase matching turning point. In: *Applications of Optical Fibers for Sensing*. Christian Cuadrado-Laborde: doi:10.5772/intechopen.81179, 2019.
- WU, Y. et al. Graphene-coated microfiber bragg grating for high-sensitivity gas sensing. In: *Optics Letter*. Department of Electronic Engineering Hong Kong: China, 2014.
- XIAO, Y. et al. Reduced graphene oxide for fiber-optic humidity sensing. In: *Optics Express*. 25: Optical Society of America, 2014. v. 22, p. 31555–31567.

## 6 Anexos

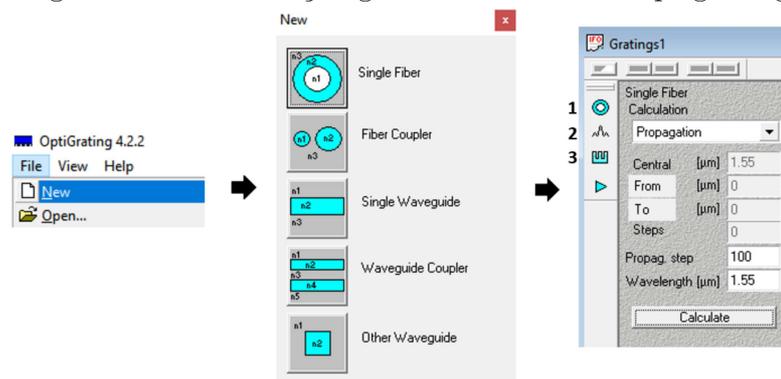
### 6.1 Construção e medição de sensores utilizando o *software Optigrating*

Através do *software Optigrating* é possível simular o espectro de uma Rede de Bragg (FBG) ou um Rede de Período Longo (LPG). Com o espectro simulado é possível alterar diferentes parâmetros da fibra e observar alterações de comportamento para posteriormente comparação com espectros práticos.

#### 6.1.1 Construção das grades

A Figura 6.1 exemplifica os passos para construção de uma grade via *software Optigrating*. Para este caso é possível construir uma rede do zero ou utilizar redes já disponíveis na biblioteca do *software*.

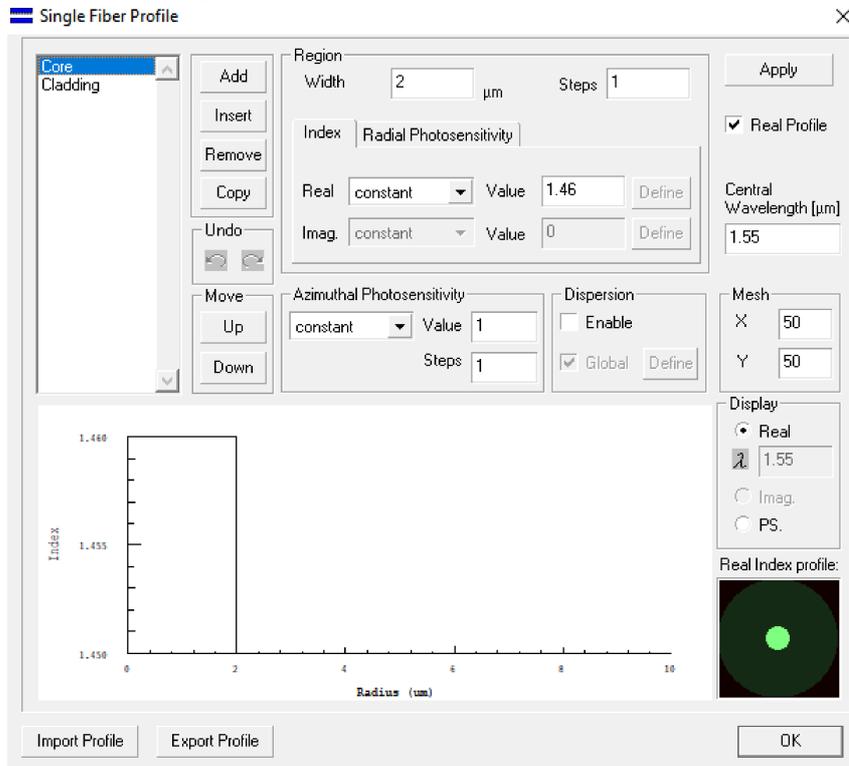
Figura 6.1 - Construção grades via software Optigrating.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

O item 1 destacado na Figura 6.1 e representado na Figura 6.2 é o menu de parâmetros da fibra. Nesta página é possível alterar parâmetros como raios do núcleo e casca, índices de refração, adição de camadas a fibra, dentre outros.

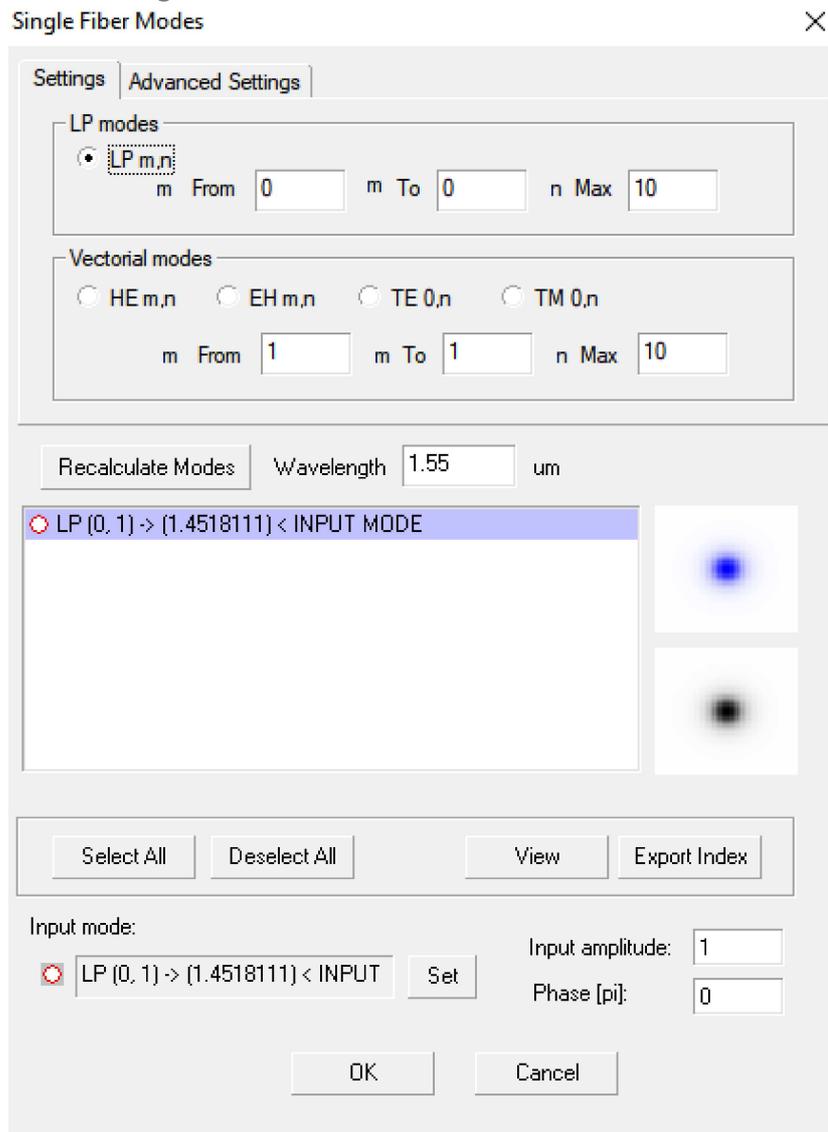
Figura 6.2 - Parâmetros iniciais da fibra.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Em paralelo as alterações destacadas na Figura 6.2, o item 2 (representado pela Figura 6.3) permite realizar alterações em parâmetros dos modos da fibra. Neste menu é possível escolher quais serão os modos utilizados para a simulação.

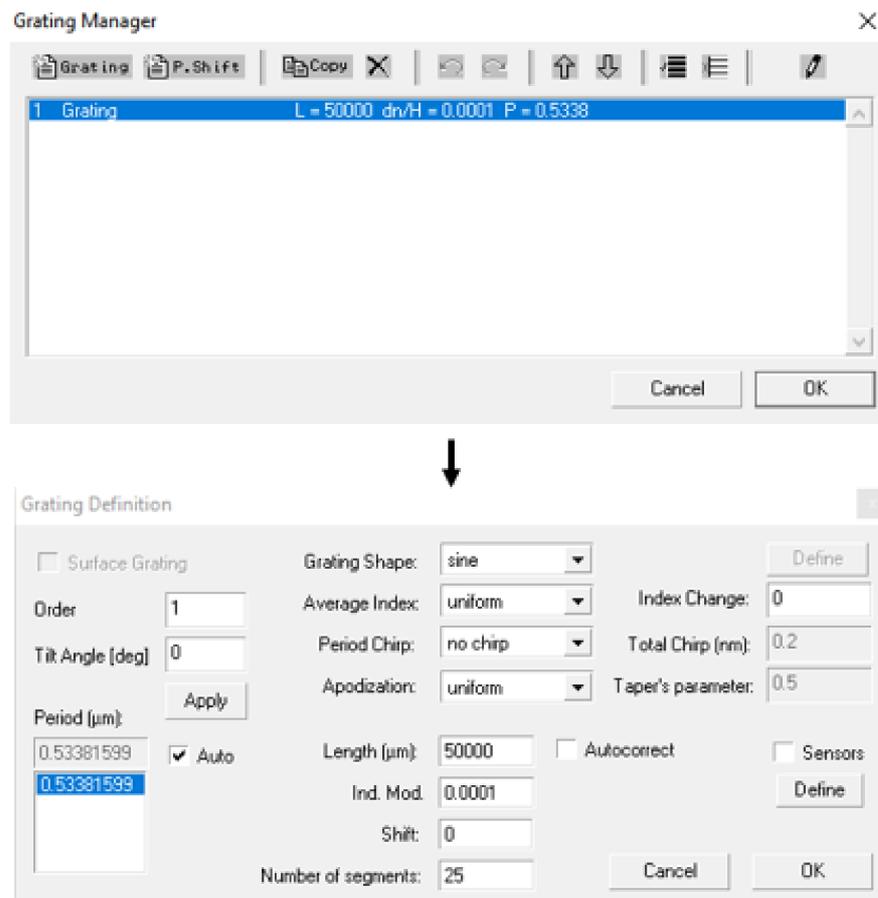
Figura 6.3 - Parâmetros dos modos da fibra.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Após definidos parâmetros iniciais, é possível alterar parâmetros da grade, tais como período, índice de modulação, *taper* (suavização da modulação de índice ao longo da grade de difração). Para isso, é necessário utilizar o item 3 destacado Figura 6.1.

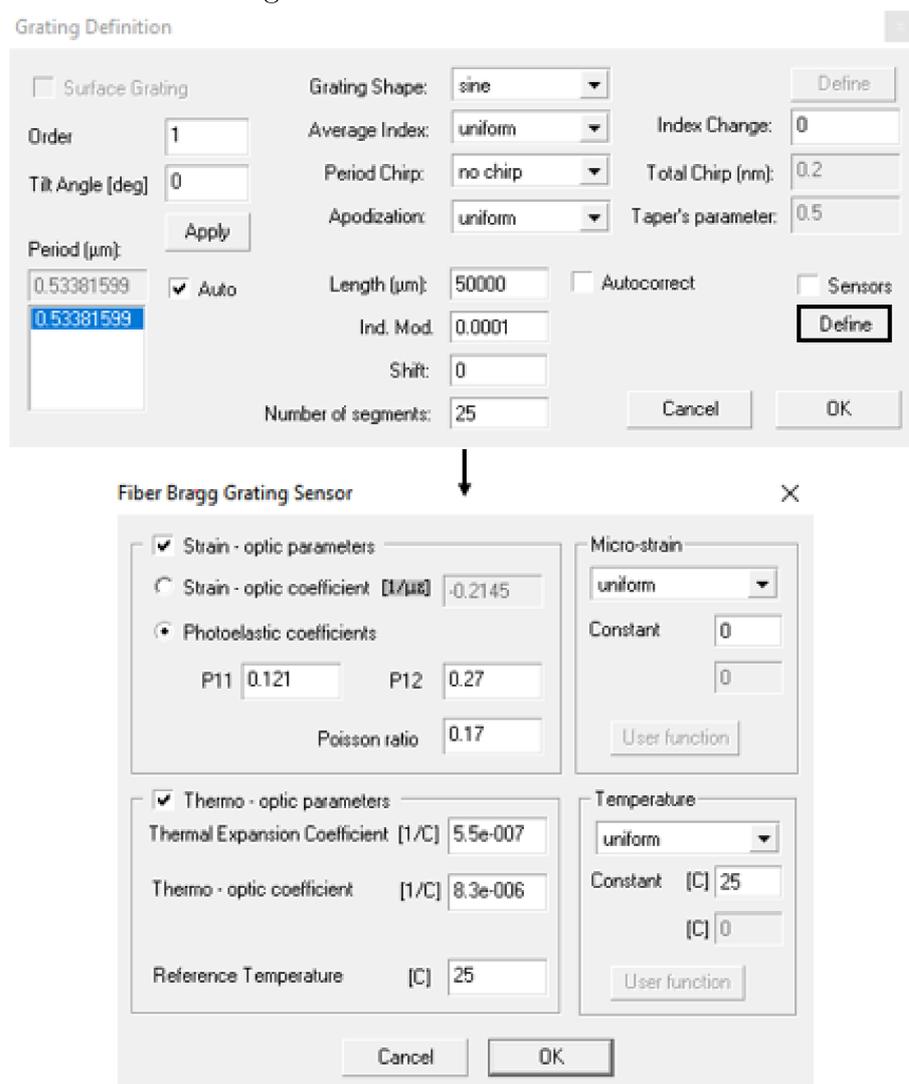
Figura 6.4 - Parâmetros da grade.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Selecionando a opção "Define" da Figura 6.4 é possível realizar alterações de parâmetros da fibra para criação dos sensores, como temperatura, deformação, dentre outros.

Figura 6.5 - Parâmetros do sensor.



Fonte: Elaborado pelo autor (a), 2022.

Após setado os valores no *Optigrating*, o sensor a fibra está definido e as simulações podem ser realizadas.