CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

DISSERTAÇÃO

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR ÓTICO DE UMIDADE DO SOLO PARA APLICAÇÕES AGRÍCOLAS

Corsi Mawuli Atiglo

Orientadores:
Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi
Maria Aparecida Gonçalves Martinez

Rio de Janeiro
Julho de 2025

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR ÓTICO DE UMIDADE DO SOLO PARA APLICAÇÕES AGRÍCOLAS

A dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

Corsi Mawuli Atiglo

Banca Examinadora:

Presidente, Professora Dr.(a) Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi (IME)
(orientadora)

Professora Dr.(a) Maria Aparecida Gonçalves Martinez (CEFET/RJ)

(coorientadora)

Professor(a) Dr.(a) Regina Célia da Silva Barros Allil (UFRJ)

Professor(a) Dr.(a) Maurício Henrique Costa Dias (CEFET/RJ)

Rio de Janeiro

Julho de 2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A872 Atiglo, Corsi Mawuli
Estudo e desenvolvimento de um sensor ótico de umidade do solo para aplicações agrícolas / Corsi Mawuli Atiglo. — 2025.
83f. + anexo : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 77-83
Orientadora: Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi
Coorientadora: Maria Aparecida Gonçalves Martinez

1. Detectores de fibras ópticas. 2. Fibras ópticas. 3. Solos - Umidade - Medição. 4. Agricultura de precisão. 5. Recursos hídricos. I. Giraldi, Maria Thereza Miranda Rocco. (Orient.). II. Martinez, Maria Aparecida Gonçalves. (Coorient.). III. Título.

CDD 681.25

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, pela sabedoria, força e coragem ao longo desta jornada.

À minha família, pelo amor e apoio incondicional.

Ao meu irmão, Abraham Banafo.

E, finalmente, dedico este trabalho a todos aqueles que, direta ou indiretamente, acreditaram no meu potencial, me estenderam a mão e me inspiraram a continuar.

Este trabalho é para vocês.

AGRADECIMENTO

Às vezes, nos momentos mais difíceis, surge em mim a dúvida sobre a existência de um Ser Superior; contudo, invariavelmente volto a reconhecer que a mão de Deus — grande Arquiteto da minha vida — conduz cada passo, concede forças e torna possível esta conquista.

Agradeço, portanto, primeiramente a Deus por Sua providência e por permitir que este trabalho se transformasse em realidade.

Às Professoras, Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi e Maria Aparecida Gonçalves Martinez, deixo meu reconhecimento mais puro e sincero. Obrigado por nunca desistirem de mim, pelos conselhos, pela paciência e sobretudo, pela confiança no meu potencial acadêmico. Tenho consciência de que muitas vezes eu acabo testando a paciência e até tirando vocês do sério, mas entendo que tudo isso é porque vocês querem o meu bem e acreditam no meu potencial. Professora Maria Thereza, agradeço especialmente por sempre tentar extrair o melhor de mim. Professora Maria Aparecida, a ajuda financeira e conselhos que me estendeu em momentos críticos foi decisiva para que eu pudesse prosseguir; levo esse gesto como um compromisso de retribuir no futuro.

À minha família, alicerce de todas as vitórias: que eu seja sempre o melhor filho que posso ser. Ao meu irmão, companheiro de jornada mesmo após dez anos longe da nossa primeira casa, obrigado por permanecer ao meu lado nos períodos mais árduos; que nossos sonhos, se realizem sob as bênçãos de Deus.

Por fim, aos amigos e colegas que, de alguma forma, ofereceram palavras de incentivo, partilharam conhecimento ou simplesmente torceram pelo meu sucesso, deixo aqui minha gratidão. Agradeço especialmente ao Gabriel, da iniciação científica, pelo seu grande carisma, contribuições e sua constante vontade de aprender, e ao Pedro Taranto, um verdadeiro amigo em todas as horas.

Cada um contribuiu para que esta dissertação deixasse de ser um projeto e se tornasse um capítulo concluído na minha história. Sem o apoio e a fé de todos vocês, este trabalho não passaria de um plano inacabado. Que estas palavras expressem minha eterna gratidão.

RESUMO

Estudo e desenvolvimento de um sensor ótico de umidade do solo para aplicações agrícolas

A umidade do solo desempenha um papel fundamental na produtividade agrícola, na gestão eficiente dos recursos hídricos e na conservação ambiental. Nesta pesquisa, são apresentados o projeto, o desenvolvimento e a validação de um sensor ótico baseado em rede de período longo (LPG) para medição da umidade do solo. O processo experimental e a caracterização do sensor são descritos em detalhes, bem como a metodologia de calibração em solo substrato para plantio, com ênfase em sua aplicabilidade nas práticas agrícolas. O sensor LPG proposto destaca-se por sua alta sensibilidade, imunidade a interferências eletromagnéticas e capacidade de fornecer medições de umidade contínuas e precisas, o que o torna uma alternativa aos métodos gravimétricos ou sensores capacitivos. Em níveis mais baixos de umidade (menor do que ~5%), o sensor LPG neste projeto apresentou uma sensibilidade alta de aproximadamente ~1,39 nm/%. Os resultados experimentais demonstram a confiabilidade e a robustez desse dispositivo, abrindo perspectivas para sua aplicação tanto em culturas de pequena escala quanto em projetos de grande escala, especialmente em regiões com climas variáveis, como em Gana na África. Este trabalho visa contribuir para o avanço da agricultura de precisão e do gerenciamento de recursos hídricos em ambientes agrícolas.

Palavras-chave: Sensor de fibra ótica; Rede de período longo; Umidade do solo; Agricultura de precisão; Gestão eficiente de recursos hídricos

ABSTRACT

Study and development of an optical sensor as a soil moisture sensor for agricultural applications

Soil moisture plays a key role in agricultural productivity, efficient water resource management and environmental conservation. In this research, the design, development and validation of an optical sensor based on Long Period Grating (LPG) for soil moisture measurement is presented. The experimental process and characterization of the sensor are described in detail, as well as the calibration methodology in loamy soil, with emphasis on its applicability in agricultural practices. The proposed LPG sensor stands out for its high sensitivity, immunity to electromagnetic interference and capacity to provide continuous and accurate moisture measurements, which makes it an alternative to traditional gravimetric or capacitive methods. At lower moisture levels (below ~5%), the LPG sensor in this project exhibited a high sensitivity of around ~1,39 nm/%. The experimental results demonstrate the reliability and robustness of this device, opening perspectives for its application in both small-scale crops and large-scale projects, particularly in regions with variable climates, such as Ghana in Africa. This approach aims to contribute to the advancement of precision agriculture and water resource management in agricultural environments.

Keywords: Fiber optic sensor; Long Period Grating; Soil moisture; Precision agriculture; Efficient water management

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Difração da onda de luz por uma rede de difração. 22

Figura 2- a) FBG e b) LPG 23

Figura 3- Reflexão do modo de núcleo por uma rede de Bragg em fibra 24

Figura 4–Transmissividade do núcleo para casca por rede de período longo 26

Figura 5- Ilustração simplificada do acoplamento das amplitudes $A_j(z)$ e $B_j(z)$ do j-ésimo modo em uma fibra ótica 28

Figura 6- Espectro de refletividade de uma FBG 32

Figura 7- Espectro de transmissividade de uma LPG 34

Figura 8- Espectro de transmissividade quando o sensor LPG é exposto a substâncias com índices de refração distintos 37

Figura 9- Esquema da montagem experimental 42

Figura 10- Setup experimental para caracterização da LPG no laboratório 43

Figura 11- Montagem experimental para medição da umidade do solo utilizando o sensor LPG 48

Figura 12- Montagem experimental no LAFOT/CEFET-RJ para aquisição dos efeitos da variação de umidade do solo no espectro de transmissão do sensor LPG 49

Figura 13- Índice de refração em função dos valores de umidade do solo. 52

Figura 14- Simulação dos espectros de transmissividade da LPG quando imersa em diferentes níveis de umidade do solo 54

Figura 15- Relação entre a umidade do solo e os deslocamentos de comprimento de onda em um sensor LPG. 55

Figura 16- Relação entre umidade do solo e volume de água para solo substrato para plantio realizado em temperatura ambiente. 56

Figura 17- Espectros de transmissividade de um sensor LPG enterrado no solo para vários níveis de umidade. 57

Figura 18- Espectros de transmissividade da LPG quando exposto a diferentes níveis de umidade do solo. 58

Figura 19- Espectros de transmissividade do sensor LPG a um volume de água de 140 ml, com dados coletados em três intervalos de tempo diferentes. 59

Figura 20- Espectros de transmissividade do sensor LPG a um volume de água de 140 ml, com dados coletados em três intervalos de tempo diferentes. 60

Figura 21– Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20 ml a 140 ml no primeiro experimento em laboratório 61

Figura 22– Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20 ml a 140 ml no segundo experimento em laboratório. 62

Figura 23- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20 ml a 140 ml no terceiro experimento em laboratório. 63

Figura 24- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20 ml a 140 ml no quarto experimento em laboratório. 64

Figura 25- Relação entre a umidade do solo e a mudança de comprimento de onda ressonante em todos os quatro testes. 66

Figura 26- Valor médio e desvio-padrão do comprimento de onda para todos os quatro testes em função da umidade do solo. 68

Figura 27- Valor médio de comprimento de onda em função da umidade do solo para o sensor LPG. 69

Figura 28- Comparação entre os valores de comprimento de onda obtidos da simulação e dos experimentos do sensor LPG de umidade do solo. 71

Figura 29- Comparação entre os valores da sensibilidade obtidos da simulação e do experimento utilizando o sensor LPG de umidade do solo. 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Valor do comprimento de onda nos quatro testes 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMT	Coupled-Mode Theory
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
FAO	Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)
FBG	Fiber Bragg Grating (Rede de Bragg em Fibra Ótica)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LAFOT	Laboratório de Fotônica
LPG	Long Period Grating (Rede de Período Longo)
OSA	Optical Spectrum Analyzer (Analisador de Espectro Ótico)
TDR	Time-Domain Reflectometry (Reflectometria no Domínio do Tempo)
IR	Índice de Refração
RIU	Refractive Index Unit (Unidade de Índice de Refração)
SMF	Single Mode Fiber (Fibra Monomodo)
WSN	Wireless sensor networks (Redes de Sensores Sem Fio)
IoT	Internet of Things (Internet das Coisas)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO **14**

1.1 Motivação e Justificativa 15

1.2 Objetivos 19

1.3 Organização da Dissertação **20**

2. ESTUDO TEÓRICO SOBRE SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA 21

2.1 Redes de Bragg em fibra ótica 21

2.1.1 Fabricação de uma rede de período longo uniforme (LPG) **24**

2.1.2 Rede de Bragg em fibra 24

2.1.3 Rede de período longo 25

2.2 Teoria de modo acoplado, refletividade e transmissividade 26

2.2.1 Teoria de modo acoplado em FBG 30

2.2.2 Teoria de modo acoplado em LPG 32

2.3 Rede de Bragg em fibra como elemento sensor 34

2.3.1 A FBG como sensor de umidade de solo 35

2.3.2 A LPG como sensor de índice de refração do meio externo 36

2.3.3 A LPG como sensor de umidade de solo 3**8**

2.3.4 Comparação entre FBG e LPG como elementos sensores 40

3. MONTAGEM DO SENSOR E CALIBRAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO 41

3.1 Montagem do sensor 41

3.1.1 Montagem experimental 41

3.2 Calibração da umidade do solo 44

3.2.1 Materiais e Equipamentos 44

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 51

4.1 Resultado da simulação 51

4.1.1 Análise da resposta espectral 52

4.2 Resultados e análises experimentais 56

4.2.1 Análise da reprodutibilidade do sensor 59

4.2.2 Análise da sensibilidade 65

4.3 Comparação entre o resultado da simulação e do experimento 70

5. CONCLUSÃO 73

5.1 Trabalhos futuros 75

5.2 Publicações da Dissertação 76

Referências 77

ANEXO A 84

1- INTRODUÇÃO

A umidade do solo desempenha um papel crucial em diversas áreas, incluindo agricultura, hidrologia e monitoramento ambiental. No contexto agrícola, ela é essencial para determinar as necessidades hídricas das culturas, enquanto na hidrologia auxilia no entendimento do balanço hídrico e nos processos de infiltração e drenagem (LEONE ***et al.,*** 2017; HALLET ***et al.,*** 2017). A medição precisa e confiável da umidade do solo é essencial para otimizar as práticas de irrigação, avaliar as condições de seca e gerenciar os recursos hídricos de forma eficaz (HALLET ***et al.,*** 2017; ADEYEMI ***et al.,*** 2018).

Os métodos tradicionais de medição da umidade do solo, como técnicas gravimétricas e dispositivos baseados em capacitância, têm sido amplamente utilizados por décadas. No entanto, esses métodos apresentam limitações significativas (LEONE ***et al.,*** 2017). As técnicas gravimétricas, por exemplo, envolvem processos laboriosos e não são adequadas para o monitoramento em tempo real (DANE e TOPP, 2002). Já os métodos baseados em capacitância, embora mais avançados, frequentemente sofrem com baixa precisão, cobertura espacial limitada e procedimentos de instalação complexos (KOJIMA ***et al.,*** 2016). Essas limitações tornam esses métodos inadequados para atender às demandas crescentes por soluções eficazes de monitoramento de umidade do solo. Como resultado, têm impulsionado a necessidade de tecnologias inovadoras de sensoriamento que possam superar esses desafios e fornecer dados contínuos, precisos e distribuídos de umidade do solo (LEONE ***et al.,*** 2015)

Nos últimos 30 anos, o avanço na tecnologia de fibra ótica em telecomunicações fomentou o desenvolvimento de sensores a fibra ótica. Os sensores de fibra ótica surgiram como uma solução promissora para medição de umidade do solo, devido às suas vantagens únicas (YIN, 2008; CAO ***et al.,*** 2018). As principais vantagens da utilização de sensores de fibra ótica para medição da umidade do solo, são sensibilidade excepcional, recursos de sensoriamento remoto, características não intrusivas, durabilidade e capacidade de multiplexação (ALWIS ***et al.,*** 2013; LAYLOR ***et al.,*** 2002), além de apresentarem alta sensibilidade e capacidade de operar em ambientes agressivos (GANGWAR ***et al.,*** 2023; GHATAK, 2010). Os sensores de fibra ótica utilizam as propriedades de transmissão da luz em fibras óticas para detectar e medir parâmetros

físicos, incluindo tensão, temperatura e umidade, entre outros (CULSHAW e KERSEY, 2008). A aplicação de sensores de fibra ótica na medição de umidade do solo oferece vários benefícios apresentando alta sensibilidade, permitindo a medição precisa da umidade do solo e melhor gerenciamento da irrigação e práticas de conservação de água (YEO ***et al.,*** 2008; GAMAGE ***et al.,*** 2018). Os sensores de fibra ótica são imunes a interferências eletromagnéticas (AGRAWAL, 1995), garantindo medições confiáveis e precisas assim eles podem ser facilmente integrados a sistemas de sensoriamento distribuído (GHATAK, 2010; LAYLOR ***et al.,*** 2002), permitindo o monitoramento de grandes áreas agrícolas ou regiões ambientais com alta resolução espacial (LEONE ***et al.,*** 2015).

Dentro do campo dos sensores de fibra ótica, as tecnologias de rede de Bragg em fibra ótica *(*FBG - *Fiber Bragg Grating*) e rede de período longo (LPG - *Long Period Grating*) ganharam destaque na medição da umidade do solo. Os sensores FBG e LPG baseiam-se no princípio da modulação do comprimento de onda causada pela interação da luz com as mudanças periódicas do índice de refração na estrutura da rede (ENRÍQUEZ, 2011; ERDOGAN, 1997). As mudanças no índice de refração são influenciadas pelas variações na umidade do solo circundante (LAYLOR ***et al.,*** 2002). Ao medir o deslocamento do comprimento de onda ou a mudança de intensidade da luz refletida ou transmitida pela FBG e LPG, respectivamente, os sensores podem fornecer informações quantitativas sobre a umidade do solo (HILL e MELTZ**,** 1997; PATRICK ***et al.,*** 1998).A integração dessas tecnologias avançadas no manejo agrícola representa um avanço na direção à irrigação de precisão, promovendo maior produtividade e sustentabilidade no uso dos recursos hídricos (LEONE ***et al.,*** 2015). Esta dissertação explora o uso de sensores de fibra ótica, com ênfase nas redes de período longo, destacando suas aplicações e benefícios para o monitoramento da umidade do solo. Ao examinar as capacidades e vantagens desses sensores, esta pesquisa visa contribuir para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, levando a uma melhor gestão dos recursos e à conservação ambiental.

1.1 Motivação e Justificativa

A motivação para este trabalho decorre da necessidade de técnicas aprimoradas de medição de umidade do solo que possam superar as limitações dos métodos tradicionais como método gravimétrico e método *speedy* (DNER, 1994). Nos estudos de (RAO, 1997; CUSANO ***et al.,*** 2011), a utilização de sensores de fibra ótica, especificamente a tecnologia de rede de Bragg em fibra ótica ou rede de período longo, oferece o potencial de maior precisão, confiabilidade e cobertura espacial no monitoramento da umidade do solo. Essas tecnologias representam uma alternativa promissora aos métodos convencionais, que frequentemente falham em atender às demandas modernas de monitoramento em escala larga e em tempo real (LEONE ***et al.,*** 2017).

A medição de umidade do solo é um aspecto fundamental nas práticas agrícolas, monitoramento ambiental e gerenciamento de recursos hídricos. A quantificação precisa da umidade do solo é crucial por várias razões. Um estudo sobre irrigação na agricultura e o entendimento dos níveis de umidade do solo permite que os agricultores otimizem as estratégias de irrigação (ADEYEMI ***et al.,*** 2018), evitem o excesso ou a falta de água e, por fim, aumentem a produção de culturas. Além disso, diante do cenário global de escassez de água e das mudanças climáticas, a gestão eficiente dos recursos hídricos torna-se imperativa para garantir práticas agrícolas sustentáveis e conservação ambiental (FAO, 2017). A capacidade de monitorar a umidade do solo com precisão é, portanto, essencial para enfrentar esses desafios.

Os métodos tradicionais de medição de umidade do solo, como técnicas gravimétricas ou sensores baseados em capacitância, têm sido amplamente utilizados, mas apresentam várias limitações (RASHEED ***et al.,*** 2022; DANE e TOPP, 2002). As técnicas gravimétricas envolvem a extração de amostras de solo, secagem das mesmas e cálculo da umidade com base na diferença de peso antes e depois da secagem (CAPUTO,2017; DANE e TOPP, 2002). Embora esse método forneça resultados precisos, ele consome tempo, requer trabalho intensivo, limitando sua eficácia para o monitoramento em larga escala (REYNOLDS 1970; ALWIS ***et al.,*** 2013). Os sensores baseados em capacitância, por outro lado, oferecem possibilidade de monitoramento contínuo, mas muitas vezes requerem calibração para tipos específicos de solo e podem ser afetados pela salinidade do solo e variações de temperatura (RASHEED ***et al.,*** 2022).

Além disso, sua instalação e manutenção podem ser complexas e dispendiosas, especialmente ao considerar extensas áreas agrícolas ou regiões ambientais que requerem cobertura ampla (LEONE ***et al.,*** 2015).

No campo da medição de parâmetros físicos como tração, temperatura e umidade de solo, os sensores baseados em fibra ótica oferecem várias vantagens em relação aos sensores tradicionais. Em primeiro lugar, os sensores de fibra ótica apresentam alta sensibilidade (RAO, 2009), permitindo a medição precisa da umidade do solo. No trabalho de (LEONE ***et al.,*** 2015), eles podem detectar mudanças nos níveis de umidade de valores de 0% (solo seco) até ∼37% e com sensibilidade de $(2.1\, pm/\%RH)$, permitindo que agricultores e agências ambientais tomem decisões sobre agendamento de irrigação, gerenciamento de secas e práticas de conservação de água.

Além disso, ao compararmos com sensores LPG projetados especificamente para medição de umidade do solo, destaca-se o estudo conduzido por Hallet *et al*. (2017), no qual foi utilizado um sensor baseado em LPG para detecção de umidade em diferentes tipos de solo, como solo argiloso e arenoso. A caracterização experimental revelou sensibilidade na faixa de umidade entre 10% e 50%, com o desempenho comparado ao de sensor comercial (sonda Theta), que mede a impedância do solo (HALLET ***et al.,*** 2017). Estes resultados demonstram a viabilidade da aplicação de LPGs em ambientes agrícolas.

A medição de umidade do solo proposto neste trabalho tem a vantagem de uma construção mais simples, o que contribui para redução de custo e maior robustez em campo. Isto o torna particularmente atrativo para aplicações em monitoramento agrícola distribuído, onde a confiabilidade e a simplicidade construtiva são exigências fundamentais (LEONE ***et al.,*** 2017).

Em segundo lugar, os sensores de fibra ótica são imunes a interferências eletromagnéticas, tornando-os adequados para implantação em ambientes adversos (GANGWAR ***et al.,*** 2023; GHATAK, 2010), como fábricas industriais com maquinaria pesada e campos onde a exposição a campos magnéticos intensos e radiofrequência é comum. Essa imunidade garante medições confiáveis e precisas, não afetadas por campos elétricos ou magnéticos externos (CULSHAW e KERSEY, 2008; AGRAWAL, 1995).

Em terceiro lugar, os sensores de fibra ótica podem ser integrados aos sistemas de sensoriamento distribuído, permitindo o monitoramento de grandes áreas agrícolas

(MINARDO ***et al.,*** 2021; GHATAK, 2010). Ao implantar uma matriz de sensores, é possível obter um mapeamento da distribuição de umidade do solo, auxiliando na tomada de decisões eficazes e na alocação de recursos (CULSHAW e KERSEY, 2008). Essa capacidade é especialmente relevante para o monitoramento de regiões extensas, onde a cobertura espacial é essencial.

Dadas as vantagens dos sensores de fibra ótica para a medição de umidade do solo, este trabalho concentra-se no desenvolvimento de um sensor baseado em fibra ótica utilizando a tecnologia de rede de período longo. A utilização dessas tecnologias oferece uma oportunidade para explorar sua aplicabilidade, desempenho e vantagens no monitoramento de umidade do solo. Ao explorar os princípios, considerações do projeto, a montagem, metodologias de calibração e avaliação de desempenho dos sensores baseados em fibras óticas para a medição de umidade do solo, este trabalho visa contribuir para as técnicas de monitoramento de umidade do solo na agricultura no continente africano especificamente em Gana.

A agricultura, uma das principais bases da economia de Gana, fornece meios de subsistência para uma parcela significativa da população, tornando imperativo otimizar as práticas agrícolas para aumentar a produtividade e a sustentabilidade. O clima tropical de Gana, caracterizado por estações úmidas e secas distintas, apresenta desafios significativos para os agricultores, particularmente no contexto da variabilidade das chuvas (NCHANJI, E.B, 2017). Sendo necessária desta forma, novas tecnologias como sensores de fibra ótica no âmbito da agricultura. A precisão de dados fornecidos pelos sensores de fibra ótica nas condições climáticas variáveis de Gana e ao monitorar os níveis de umidade do solo em tempo real, os agricultores podem otimizar os cronogramas de irrigação, minimizando o desperdício de água e garantindo a produção ideal das culturas (LEONE ***et al.,*** 2015). Além disso, a introdução dessa tecnologia na agricultura em Gana pode transformar significativamente a forma como a umidade do solo é monitorada e pode ter implicações significativas para a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico no país. Ao aumentar a produtividade agrícola e reduzir o desperdício de recursos, os sensores de fibra ótica podem ajudar a estabilizar os rendimentos das culturas e a melhorar os meios de subsistência das comunidades rurais (LEONE ***et al.,*** 2015; CORSI 2024). Para pesquisadores, esses sensores fornecem uma ferramenta boa para

compreender melhor os padrões de umidade do solo e desenvolver estratégias de manejo adaptativo que respondam às condições climáticas variáveis.

Em suma, o desenvolvimento de um sensor baseado em fibra ótica para medição de umidade do solo tem o potencial de contribuir para a maneira como os dados de umidade do solo são coletados, levando a um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, aprimorando as práticas agrícolas e o monitoramento ambiental sustentável. Ao superar as limitações dos métodos tradicionais e abordar os desafios específicos associados à medição de umidade do solo, este trabalho busca fornecer uma ferramenta boa para pesquisadores, agricultores e ambientalistas.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é projetar, montar e caracterizar um sensor baseado em fibra ótica para medição de umidade do solo, utilizando a tecnologia de rede de período longo (LPG) visando a sua aplicação na agricultura em Gana, África. Para alcançar esse objetivo principal, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

1. Revisar a literatura existente sobre sensores de fibra ótica para medição de umidade do solo, explorando os avanços recentes e desafios.
2. Investigar tecnologias de FBG e LPG em termos de suas propriedades, princípios de funcionamento e aplicabilidade para medição de umidade do solo.
3. Projetar e montar um sensor baseado em fibra ótica, incorporando a tecnologia selecionada (LPG), com ênfase na otimização da sensibilidade, faixa dinâmica e repetibilidade.
4. Calibrar o sensor, visando obter uma correlação precisa entre as mudanças nos parâmetros do sensor e os níveis de umidade do solo.
5. Realizar experimentos para avaliar o desempenho do sensor baseado em fibra ótica para medição de umidade do solo, comparando-o com outros métodos encontrados na literatura.
6. Analisar e interpretar os resultados experimentais, avaliando a sensibilidade, precisão, confiabilidade e desempenho do sensor em diferentes condições e ambientes.
7. Discutir os resultados obtidos destacando as contribuições, limitações e possíveis direções futuras de pesquisa nessa área.

1.3 Organização da Dissertação

Esta Dissertação está organizada em cinco capítulos.

O capítulo 2 revisa a literatura relevante sobre o tópico de pesquisa. Isso inclui estudos anteriores sobre sensores de fibra ótica, tecnologias de FBG e LPG e técnicas de medição de umidade do solo. A revisão da literatura ajuda a contextualizar o trabalho atual e a identificar lacunas na pesquisa.

É detalhada no capítulo 3, a metodologia empregada neste trabalho, com foco na montagem do sensor e na calibração para medição de umidade do solo. São descritos o setup e a caracterização experimental do sensor à base da LPG e a sua calibração.

Os resultados e as discussões dos dados obtidos são apresentados no capítulo 4. Esses resultados obtidos a partir dos experimentos são analisados e interpretados, destacando a eficiência do sensor desenvolvido e sua aplicabilidade em diferentes condições de solo.

No capítulo 5, conclui-se o trabalho, apresentando os principais resultados da pesquisa, as contribuições para o campo de estudo e sugestões para trabalhos futuro.

2- ESTUDO TEÓRICO SOBRE SENSORES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais necessários para a compreensão dos sensores baseados em redes de difração em fibra ótica, mais especificamente, rede de Bragg em fibra e em rede de período longo. São descritas em detalhes as propriedades e princípios de funcionamento da FBG e LPG, incluindo o efeito de modulação do comprimento de onda. As características e aplicações dessas duas estruturas sensoras óticas são exemplificadas. Em seguida, são explorados também os principais parâmetros de sensibilidade e as aplicações desses sensores, como medição de tração, e umidade de solo. A compreensão desses conceitos e fundamentos será fundamental para a análise e desenvolvimento dos sensores baseados em FBG e LPG no contexto desta dissertação.

2.1 Redes em Bragg em fibra ótica

As redes em Bragg em fibra são elementos de sensoriamento intrínsecos. Elas são fabricadas criando uma região de índice de refração periodicamente variado no núcleo, na casca ou ambos ao longo da fibra ótica (VENGSARKAR ***et al*.,** 1996).

Na Figura 1, é mostrada a difração da onda de luz por uma rede de difração (KOGELNIK, 1990; ERDOGAN, 1997). A figura mostra a interação de uma onda incidente com uma estrutura que possui modulações periódicas do índice de refração, representada pela linha tracejada horizontal, em um meio de índice de refração n. Essas variações ocorrem ao longo do eixo longitudinal da fibra e formam a região da rede ótica, podendo ser uma rede de Bragg (FBG) ou uma rede de período longo (LPG). A variação do índice de refração cria as condições necessárias para o acoplamento entre modos óticos, conforme ilustrado na figura 1.

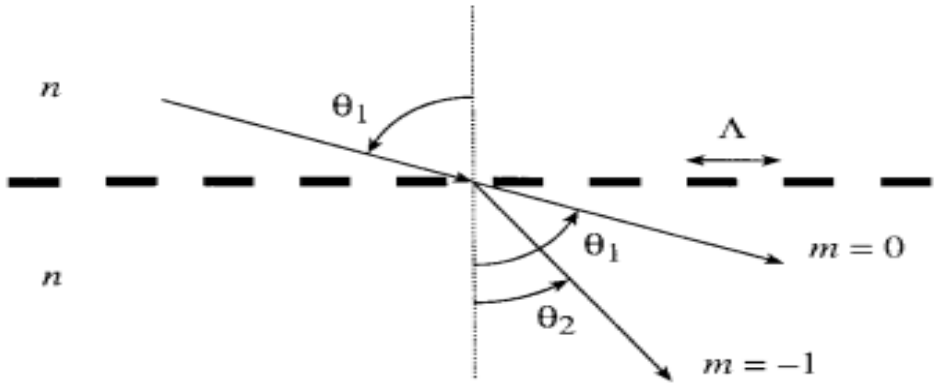


Figura 1- A difração da onda de luz por uma rede de difração (KOGELNIK, 1990).

Antes de desenvolver uma análise quantitativa utilizando a teoria de modo acoplado, é útil estabelecer primeiro uma compreensão qualitativa das interações fundamentais. Conceitualmente, uma rede de Bragg em fibra é uma rede de difração ótica, e a relação entre o ângulo incidente e o difratado é dada por (ERDOGAN, 1997)

$$n\,sin\theta_2 = n\,sin\theta_1 + m\,(\lambda/\Lambda) \tag{2.1}$$

onde θ_1 é o ângulo que a onda incidente faz com a normal à superfície de incidência da luz, θ_2 é o ângulo que a onda difratada faz com a normal à superfície de incidência da luz, n é o índice de refração do meio, m determina a ordem de difração, Λ é o período da rede e λ é o comprimento de onda.

A estrutura das redes de Bragg em fibra ótica varia de acordo com as variações no índice de refração e no comprimento do período da rede (ASSEH, 1998). Existem diferentes tipos de redes em Bragg em fibra, que podem ser classificadas em duas categorias principais: uniformes e não uniformes (KASHYAP, 2003).

As redes em Bragg em fibra ótica uniformes apresentam uma modulação constante no índice de refração ao longo da rede, bem como um período de rede uniforme (BHATIA, 1996). Alguns exemplos de redes uniformes incluem as redes de Bragg em fibra (FBGs), as redes de período longo (LPGs) e as redes de Bragg inclinadas (TFBGs).

Por outro lado, as redes em Bragg em fibra ótica não uniformes possuem variações no índice de refração e no período da rede ao longo da sua estrutura. Isso implica que a profundidade de modulação do índice de refração pode ser variável em diferentes regiões da rede. Essas redes não uniformes oferecem flexibilidade na criação de estruturas óticas com características específicas (VENGSARKAR ***et al.,*** 1996; KASHYAP, 2003).

Dois tipos de redes uniformes serão discutidos neste trabalho: FBG e LPG, como mostra a Figura 2 a) e b), respectivamente. A região em cinza ilustra as redes com índice de refração modulados.

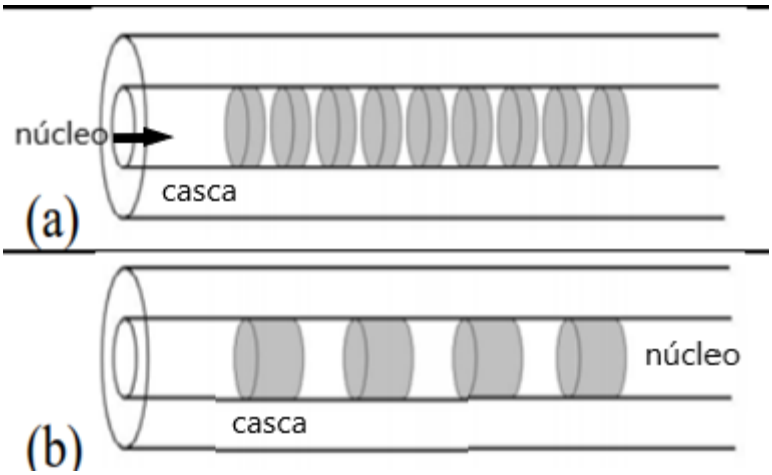


Figura 2- a) FBG e b) LPG (YIN, 2008).

Embora ambas as estruturas sejam formadas por modulações periódicas de índice de refração ao longo da fibra ótica, as FBGs e as LPGs apresentam diferenças fundamentais em termos de funcionamento e aplicação. A FBG possui períodos muito curtos, geralmente 100 nm, o que faz com que a luz incidente seja refletida, atendendo à condição de ressonância de Bragg (KASHYAP, 2003). Isto a torna ideal para monitoramento de deformação e temperatura com alta resolução. Por outro lado, a LPG possui períodos tipicamente na faixa de 100 μm - 1mm, o que permite o acoplamento da luz do modo do núcleo para modos da casca, resultando em atenuações específicas no espectro transmitido (ENRÍQUEZ, 2011). Esta característica torna a LPG extremamente sensível a alterações no índice de refração do meio externo, sendo mais adequada para aplicações envolvendo medição de parâmetros ambientais, como umidade do solo e concentração de substâncias químicas (ENRÍQUEZ, 2011). Além disso, enquanto a FBG

atua como um filtro reflexivo, a LPG se comporta como um filtro de rejeição em transmissão (ERDOGAN, 1997). Estas diferenças definem o comportamento espectral e as aplicações práticas de cada tipo de rede.

2.1.1 Fabricação de uma rede de período longo

A seguir, apresenta-se uma breve descrição do processo de fabricação de um tipo de rede uniforme (LPG). A LPG é obtida por meio da modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra ótica. Existem diferentes técnicas para a fabricação de LPGs uniformes, entre as quais destacam-se:

- Gravação com luz ultravioleta (UV): Essa técnica é amplamente utilizada quando se empregam fibras dopadas com germânio. Uma máscara de fase de período longo é posicionada entre a fonte de UV e a fibra ótica, permitindo que o padrão de interferência gerado module o índice de refração ao longo da fibra (VENGSARKAR ***et al.,*** 1996; ERDOGAN, 1997).
- Gravação térmica com laser de CO_2: Neste método, um feixe de laser de CO_2 é direcionado à fibra com movimento controlado, gerando calor pontual e modulações no núcleo. Essa técnica é especialmente útil para gravações em fibras padrão sem dopagens especiais (GUO ***et al.,*** 2015).

2.1.2. Rede de Bragg em fibra

O princípio fundamental que descreve a operação de uma FBG é a reflexão de Fresnel, onde a luz que se propaga entre meios com índices de refração diferentes, refletindo e refratando na interface. A luz que se propaga ao longo da rede dentro do núcleo da fibra (modo fundamental do núcleo) é acoplada e se propaga na direção oposta, no mesmo modo do núcleo, em um comprimento de onda específico (comprimento de onda de Bragg) e esse acoplamento é denominado acoplamento contra-propagante (KASHYAP, 2003).

No acoplamento contra-propagante, o comprimento de onda de Bragg nominal do modo no núcleo é dado por (ERDOGAN, 1997)

$$\lambda_B = 2n_{co,ef}\Lambda \tag{2.2}$$

Na equação (2.2), $n_{co,ef}$ é o índice de refração efetivo do núcleo e Λ é o período da FBG. Qualquer alteração no índice modal devido à temperatura, tensão ou outros parâmetros externos mudará o comprimento de onda Bragg (ERDOGAN, 1997). Além de ser utilizada como um sensor de fibra ótica, as FBGs também podem ser usadas em comunicações óticas (YIN, 2008).

A Figura 3 ilustra a refletividade por uma rede de Bragg em fibra de um modo com um ângulo de incidência θ_1 no mesmo modo propagando na direção oposta com um ângulo $\theta_2 = -\theta_1$. β_{CO} é a componente z da constante de propagação de onda, e m determina a ordem de difração (KOGELINK, 1990).

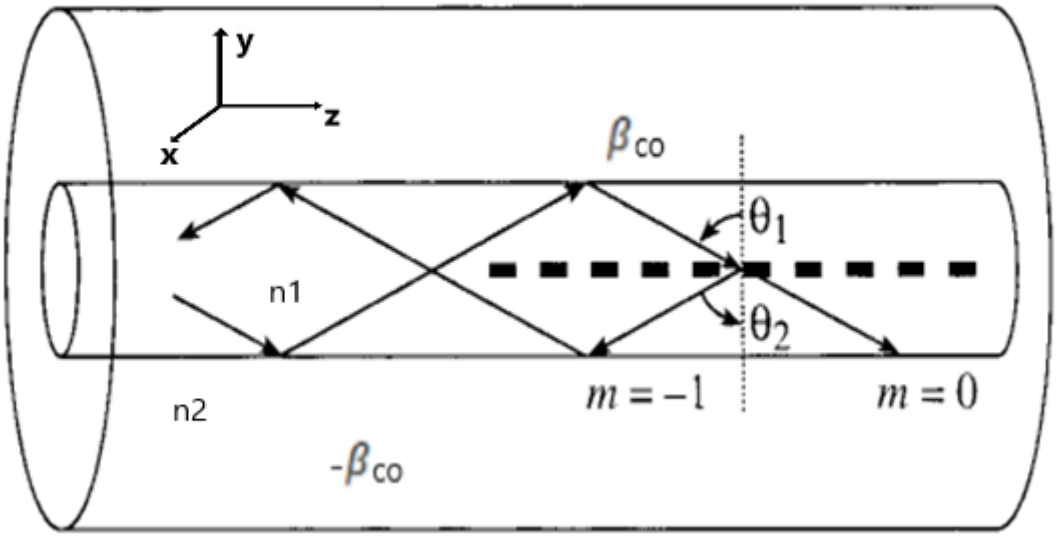


Figura 3- Reflexão do modo de núcleo por uma rede de Bragg em fibra (ERDOGAN, 1997).

2.1.3 Rede de período longo

A LPG realiza o acoplamento de luz do modo fundamental do núcleo aos modos da casca na direção de propagação, ou seja, em transmissão, em comprimentos de onda específicos. Esses comprimentos de onda são conhecidos como comprimentos de onda ressonantes. A fibra oferece diversos modos de casca, resultando em um espectro de

transmissividade da LPG composto por uma série de bandas de atenuação distintas nos referidos comprimentos de onda ressonantes (KERSEY ***et al.,*** 1997).

A ressonância da LPG, λ_{res}, ocorre apenas na condição de casamento de fase o que é uma condição fundamental para que ocorra o acoplamento eficiente de energia entre modos dentro de uma fibra com rede de período longo (YIN, 2008; ERDOGAN, 1997)

$$\lambda_{res} = (n_{co,eff} - n_{cl,eff})\Lambda \tag{2.3}$$

Na equação (2.3), $n_{co,eff}$ e $n_{cl,eff}$ são os índices de refração efetivos do modo fundamental do núcleo e do modo da casca, respectivamente, e Λ é o período da rede.

Na Figura 4 é mostrada a difração por uma rede de um modo com ângulo θ_1 em um modo de co-propagação com um ângulo θ_2. β_{CO} é a componente z da constante de propagação da onda do modo fundamental, β_{Cl} é a componente z da constante de propagação do modo da casca e m determina a ordem de difração. Para o acoplamento co-propagante para um determinado comprimento de onda é necessário um período de rede mais longo do que para o acoplamento contra-propagante (ERDOGAN, 1997).

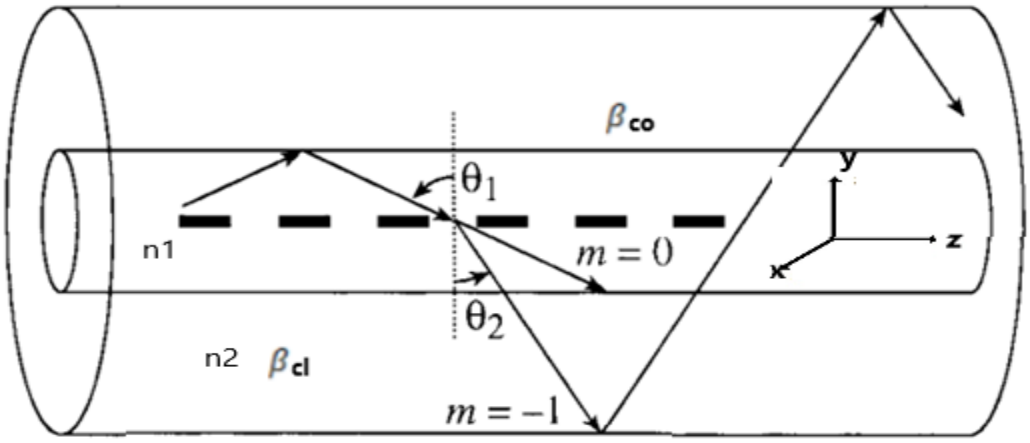


Figura 4- Transmissividade do modo de núcleo para casca por rede de período longo (ERDOGAN, 1997).

2.2 Teoria de modo acoplado, refletividade e transmissividade.

A caracterização de FBG e LPG é realizada por meio da utilização da teoria de modos acoplados (CMT - *Coupled-mode Theory*), uma abordagem que possibilita compreensão da interação entre os modos guiados dentro desses dispositivos óticos.

A teoria é baseada no conceito de que a luz que se propaga por um guia de onda ótico pode ser decomposta em uma superposição de diferentes modos guiados. Esses modos representam diferentes distribuições espaciais do campo eletromagnético dentro do guia de onda. Quando dois ou mais modos interagem, como na presença de uma FBG, energia pode ser transferida entre eles (KOGELNIK, 1990).

Na abordagem do modo ideal da teoria de modos acoplados, onde os modos não trocam energia, faz-se a suposição de que a componente transversal do campo elétrico pode ser expressa como uma superposição dos modos ideais. Pode-se escrever a componente como (ERDOGAN, 1997)

$$\vec{E}(x,y,z,t) = \sum_j \left[A_j(z)\, exp\left(i\beta_j z\right) + B_j(z)\, exp\left(-i\beta_j z\right)\right]\overrightarrow{e_{jt}}(x,y) exp\,(-i\omega t) \qquad (2.4)$$

$A_j(z)$ e $B_j(z)$ são amplitudes lentamente variáveis do j-ésimo modo propagando nas direções $(+z)$ e $(-z)$ respectivamente. $\overrightarrow{e_{jt}}$ é o campo do modo transversal, β_j representa a constante de propagação associada ao j-ésimo modo, ω é a frequência angular do campo elétrico, que determina a taxa com que o campo oscila em relação ao tempo e t indica a dependência do campo no tempo. Note-se que são modos em um guia de onda ideal sem a presença de perturbação. Uma illustração simplificada de duas amplitudes dentro de um guia está apresentada na Figura 5. Onde pode se ver $A_j(z)$ a amplitude do modo que se propaga no sentido positivo do eixo z, enquanto $B_j(z)$ representa a amplitude que se propaga no sentido negativo de z.

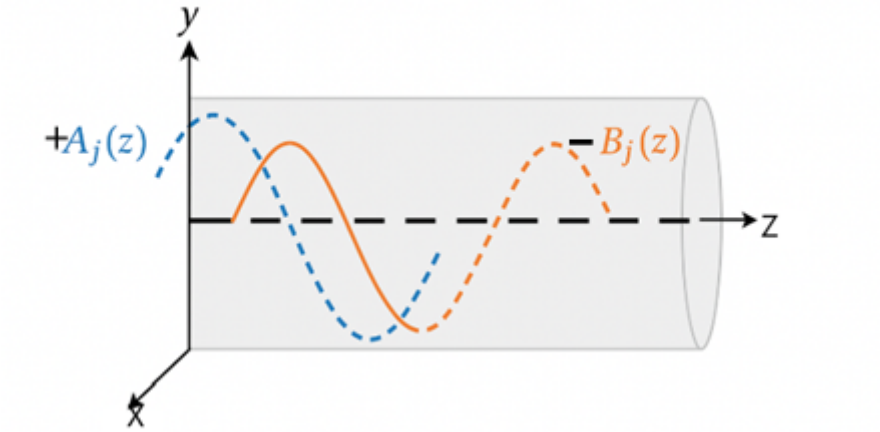


Figura 5 – Ilustração simplificada do acoplamento das amplitudes $A_j(z)$ e $B_j(z)$ do j-ésimo modo em uma fibra ótica.

Como mencionado anteriormente, em um guia de onda ideal, os modos não trocam energia. No entanto, quando uma perturbação dielétrica está presente, ocorre acoplamento entre os modos. Portanto, as amplitudes $Aj(z)$ *e* $Bj(z)$ do modo j-ésimo não são mais constantes e evoluem ao longo do eixo (z) da seguinte forma (ERDOGAN, 1997)

$$\frac{dA_j}{dz} = i\sum_k A_k\left(K_{kj}^t + K_{kj}^z\right)\exp\left[i\left(\beta_k - \beta_j\right)z\right] + i\sum_k B_k\left(K_{kj}^t - K_{kj}^z\right)\exp\left[-i\left(\beta_k + \beta_j\right)z\right] \tag{2.5}$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i\sum_k A_k\left(K_{kj}^t - K_{kj}^z\right)\exp\left[i\left(\beta_k + \beta_j\right)z\right] - i\sum_k B_k\left(K_{kj}^t + K_{kj}^z\right)\exp\left[-i\left(\beta_k - \beta_j\right)z\right] \tag{2.6}$$

Nas equações (2.5) e (2.6), K_{kj}^z é o coeficiente de acoplamento longitudinal e K_{kj}^t é o coeficiente de acoplamento transversal (ou tangencial) entre os modos j e k, e t e z denotam componentes vetoriais transversal e longitudinal, respectivamente.

Os coeficientes longitudinais são significativamente menores que os coeficientes transversais ($K_{kj}^{z}\,(z) \ll K_{kj}^{t}\,(z)$), portanto, os coeficientes de acoplamento longitudinal são desconsiderados em comparação aos transversais. O coeficiente de acoplamento transversal entre os dois modos *k* e *j*, em um sistema de coordenadas cilíndricas é dado pela integral de sobreposição (VENGSARKAR ***et al.,*** 1996; VAN BRAKEL, 2004)

$$K_{kj}^{t} = \frac{\omega}{4}\int_{0}^{2\pi}\int_{0}^{\infty} r\Delta\varepsilon(r,z)\left[E_k(r,\phi)E_j^{*}(r,\phi)\right]_t dr d\phi \tag{2.7}$$

onde $\Delta\varepsilon$ (r, z) é a perturbação da permissividade que descreve a modulação do índice de refração da rede. Aqui, assume-se que $\Delta\varepsilon$(r,z) seja independente de ϕ e $\Delta\varepsilon \cong 2n_{co}\delta n$ quando $\delta n \ll n_{co}$, onde δn é a modulação média do índice de refração e n_{co} é o índice de refração do núcleo. E_k e E_j são as amplitudes dos campos elétricos dos modos *k* e *j* da fibra, respectivamente e ϕ representa a variação de fase dentro da rede de fibra ótica.

Substituindo $\Delta\varepsilon$ no coeficiente de acoplamento transversal (2.7), pode-se distinguir os coeficientes de acoplamento transversal como coeficientes "AC" e "DC" dados por (ERDOGAN, 1997),

$$\sigma_{kj} = \frac{\omega}{2}n_{co}\delta\mathrm{n}\int_{0}^{2\pi}\int_{0}^{a_{co}} r\left[E_k(r,\phi)E_j^{*}(r,\phi)\right]_t d\phi dr \tag{2.8}$$

$$\kappa_{kj} = \frac{v}{2}\sigma_{kj} \tag{2.9}$$

$$K_{kj}^{t} = \sigma_{kj} + 2\kappa_{kj}\cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda}z\right) \tag{2.10}$$

Nas equações (2.8) – (2.10), σ_{kj} é o coeficiente de acoplamento DC, κ_{kj} é o coeficiente de acoplamento AC, K_{kj}^{t} é o coeficiente de acoplamento geral, a_{co} é o raio do núcleo, v representa a visibilidade das franjas de interferência, Λ é a periodicidade da modulação do índice de refração.

Utilizando os princípios da teoria de modos acoplados, é possível realizar uma análise das características de transferência, espectros de refletividade e transmissividade da FBG e LPG.

2.2.1 Teoria de modo acoplado em FBG

No entorno da faixa de comprimento de onda em que ocorre a reflexão de um modo específico, representado pela amplitude $A(z)$, interagindo predominantemente com um modo contrapropagante idêntico, representado pela amplitude $B(z)$, em uma rede de Bragg em fibra, pode-se simplificar a análise considerando-se apenas os termos que envolvem essas amplitudes específicas do modo de interesse. As equações resultantes podem ser escritas como (ERDOGAN, 1997)

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \tag{2.11}$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) - i\kappa^{*}R(z) \tag{2.12}$$

onde,

$$\kappa = \frac{\pi}{\lambda} v \delta n_{eff} \ , \tag{2.13}$$

$$\hat{\sigma} = \Psi + \sigma - \frac{1}{2}\frac{d\phi}{dz} \ , \tag{2.14}$$

$$\Psi = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{eff}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D}\right) , \tag{2.15}$$

$$\lambda_D = 2n_{eff}\Lambda \ , \tag{2.16}$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda}\delta n_{eff} \ , \tag{2.17}$$

Nas equações (2.11) e (2.12), R e S são as amplitudes das ondas incidente e refletida respectivamente, σ é o coeficiente de acoplamento, Ψ é o fator de *detuning*, λ_D é comprimento de onda de operação, κ é o coeficiente de acoplamento AC e $\hat{\sigma}$ é um coeficiente de auto-acoplamento DC geral, v é a visibilidade de franjas, Λ é o período nominal, ϕ representa a variação de fase e β é a constante de propagação.

Os termos δn_{eff} , $\kappa = \kappa^*$, σ, e $\hat{\sigma}$ se tornam constantes e $\frac{d\emptyset}{dz} = 0$ para uma rede de refletividade de Bragg monomodo com a rede uniforme ao longo de z (KOGELNIK, 1990).

Portanto, as equações (2.11) e (2.12) representam um conjunto de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas com coeficientes constantes. Essas equações podem ser resolvidas analiticamente para se obter soluções em forma fechada, dadas as condições de contorno apropriadas. Ao assumir uma onda incidente em propagação direta no início da rede ($z = -\infty$), o coeficiente de reflexão de uma rede de Bragg em fibra ótica uniforme com um comprimento L pode ser determinada, de modo que $R(-L) = 1\ e\ S(L) = 0$ para $z > L$, como:

$$\rho = S(-L)/R(-L) \tag{2.18}$$

e, a refletividade, $\mathrm{R} = |\rho|^2$, como:

$$R = \frac{\sinh^2\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right)}{\cosh^2\left(\sqrt{\kappa^2 - \hat{\sigma}^2}L\right) - \frac{\hat{\sigma}^2}{\kappa^2}} \tag{2.19}$$

Na Figura 6, está ilustrado o espectro de refletividade de uma FBG com comprimento de onda de Bragg, $\lambda_B = 1550{,}0\ nm$. O espectro da refletividade foi obtido com base nos seguintes parâmetros: período da rede $\Lambda = 535.59\ nm$, raio do núcleo $r_{co} = 2\ \mu m$, e índice de refração do núcleo $n_{co} = 1{,}447$.

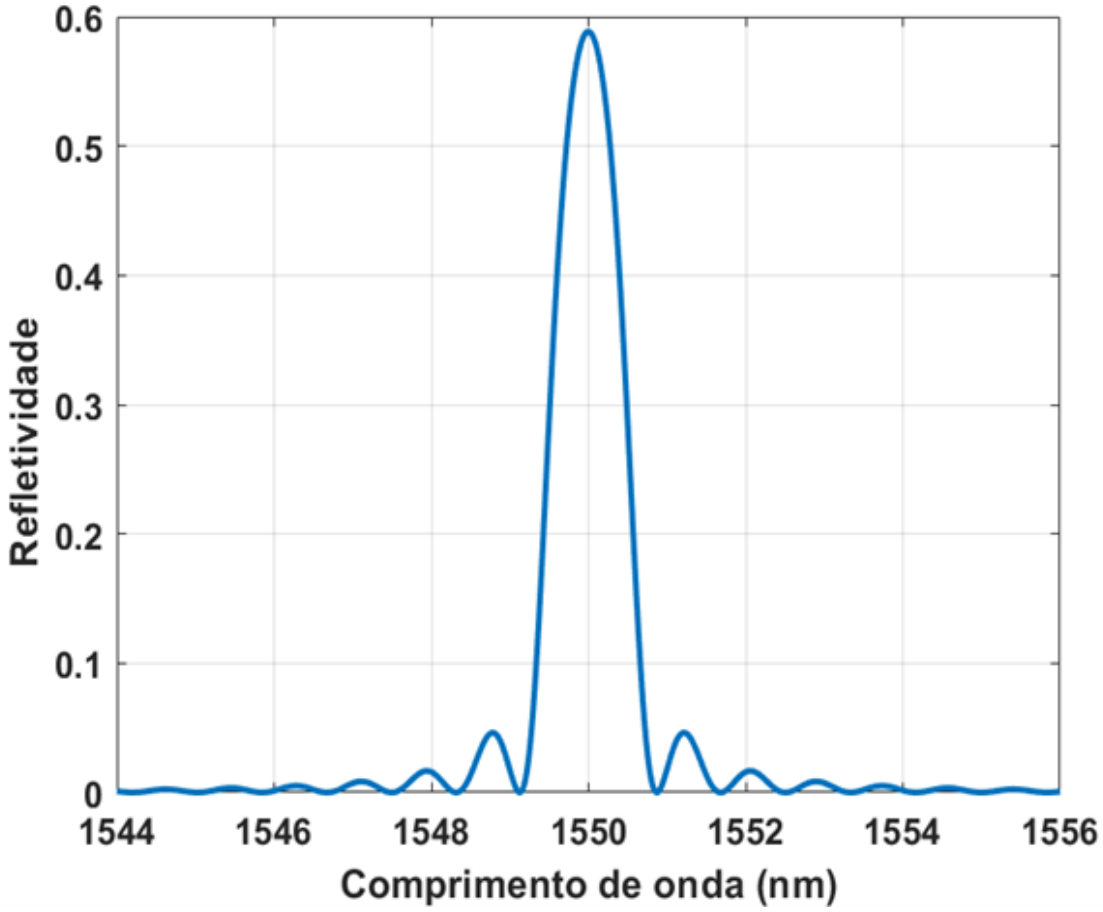


Figura 6- Espectro de refletividade de uma FBG.

2.2.2 Teoria de modo acoplado em LPG

No caso das LPGs onde são considerados apenas dois modos de copropagação, perto do comprimento de onda em que um modo de amplitude A_1 está fortemente acoplado a um modo de copropagação com amplitude A_2, simplificando as equações (2.5) e (2.6) retendo apenas os termos que envolvem as amplitudes dos dois modos e aplicando a "aproximação síncrona", que assume que os coeficientes de acoplamento são independentes da distância de propagação z e isso significa que os modos se propagam na mesma velocidade. Obtém-se (ERDOGAN, 1997)

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma}R(z) + i\kappa S(z) \tag{2.20}$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma}S(z) + i\kappa^* R(z) \tag{2.21}$$

onde

$$\widehat{\sigma} = \Psi + \frac{\sigma_{11}-\sigma_{22}}{2}, \tag{2.22}$$

$$\Psi_{0m-01}^{cl-co} = \frac{1}{2}\left(\beta^{co} - \beta_m^{cl} - \frac{2\pi}{\Lambda}\right). \tag{2.23}$$

E, onde $\widehat{\sigma}$ é o coeficiente geral de auto-acoplamento "DC" para o qual $\sigma_{11} e\ \sigma_{22}$ podem ser encontrados a partir da equação (2.8). Ψ é o fator de *detuning* para acoplamento entre o modo fundamental do núcleo e os modos da casca de copropagação. $\beta^{co}\ e\ \beta_m^{cl}$ são as constantes de propagação no núcleo e na casca, respectivamente, e o coeficiente de acoplamento cruzado "AC" é $\kappa = \kappa_{12}^{\square} = \kappa_{21}^{*}$ calculado a partir da equação (2.9). Para uma LPG com uma perturbação uniforme de índice de refração, δn, ν e Λ são constantes, e ϕ é nulo (ERDOGAN, 1997).

As equações (2.20) e (2.21) são equações diferenciais ordinárias de primeira ordem acopladas com coeficientes constantes. Portanto, soluções em forma fechada podem ser encontradas quando condições iniciais adequadas são especificadas. A transmissividade pode ser encontrada assumindo que apenas um modo está incidente a partir de $z = -\infty$, de modo que $R(0) = 1$ e $S(0) = 0$ (KOGELNIK, 1990),

$$T = |R(L)|^2/|R(0)|^2 \tag{2.24}$$

$$\mathrm{T} = \cos^2\left(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2}L\right) + \frac{1}{1+\frac{\kappa^2}{\hat{\sigma}^2}}\sin^2\left(\sqrt{\kappa^2 + \hat{\sigma}^2}L\right) \tag{2.25}$$

$\square$

Na equação (2.25), κ é o coeficiente de acoplamento cruzado "AC", $\widehat{\sigma}$ é um coeficiente geral "DC" de auto-acoplamento e T é transmissão no núcleo.

A Figura 7, mostra a curva simulada da transmissividade espectral da LPG, com comprimento de onda ressonante, $\lambda_r = 1550$ nm. Essa resposta foi obtida com base nos seguintes parâmetros: comprimento da rede $L = 0{,}03\,m$, período da rede $\Lambda = 660\,\mu m$,

raio do núcleo $r_{co} = 2\,\mu m$, raio da casca $r_c = 62{,}5\,\mu m$, índice de refração do núcleo $n_{co} = 1{,}45$ e coeficiente de acoplamento $\kappa = \pi/2$.

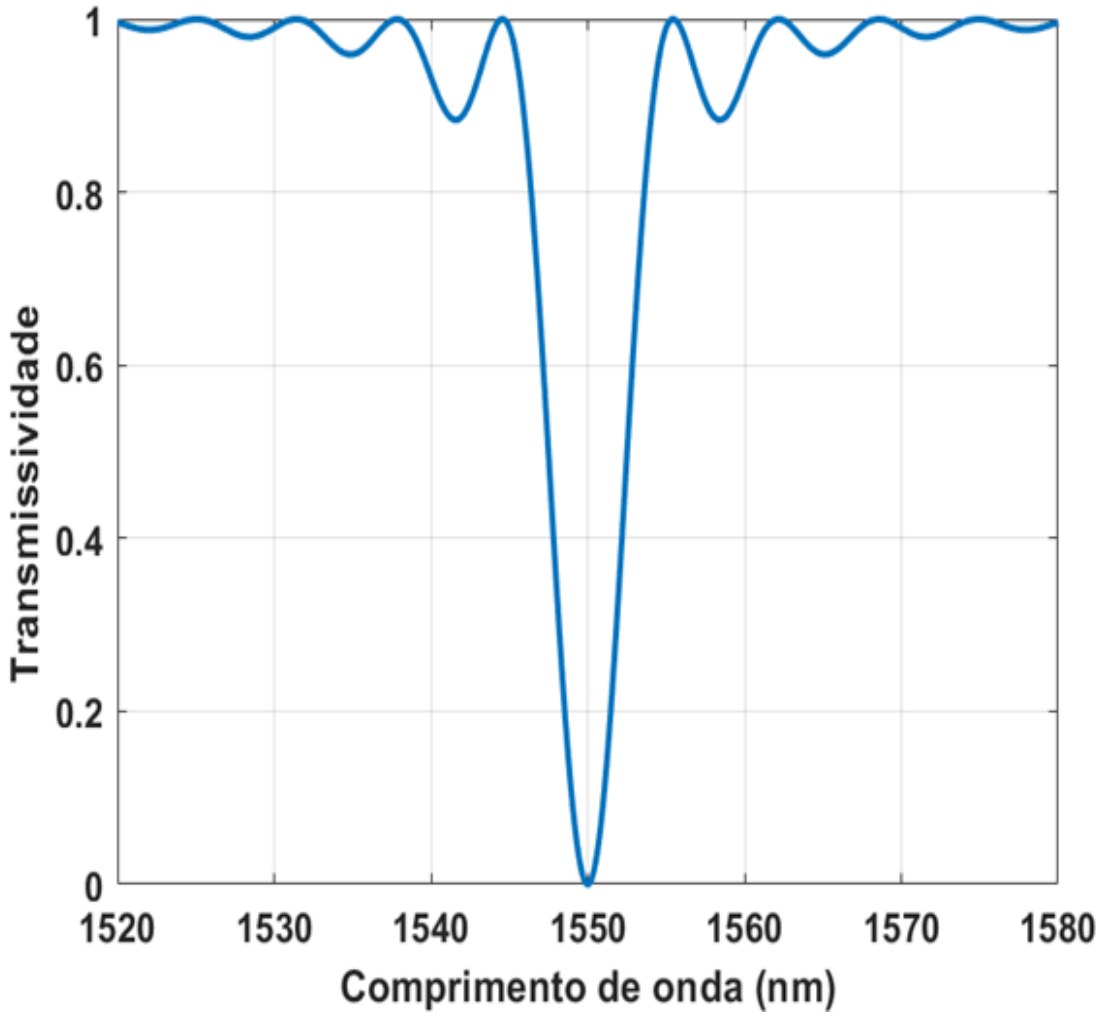


Figura 7- Espectro de Transmissividade de uma LPG.

2.3 Rede de Bragg em fibra como elemento sensor.

Os sensores de fibra ótica são dispositivos que permitem modificar a luz guiada dentro de uma fibra ótica em resposta a influências externas, sejam elas físicas, químicas, biológicas, ou biomédicas (YIN, 2008). As tecnologias FBG e LPG apresentam características únicas que as tornam adequadas para diferentes aplicações. Nas seções

seguintes, serão discutidos detalhadamente os princípios de funcionamento, as vantagens e as limitações de cada uma dessas redes como elementos sensores, permitindo uma compreensão clara de suas capacidades e aplicabilidades na área de agricultura.

2.3.1 A FBG como um sensor de umidade do solo.

Como um sensor de umidade do solo, é empregado o princípio de detecção de tração de uma FBG. Para que a FBG seja utilizada como sensor de umidade, ela precisa ser revestida com um material hidrofílico, que opera com base na resposta mecânica do revestimento às mudanças na umidade (WANG ***et al.,*** 2021). À medida que o revestimento hidrofílico expande ou contrai devido à variação de umidade, ele induz deformação mecânica na FBG. Essa deformação afeta a periodicidade da estrutura da rede dentro da FBG, resultando em um deslocamento de seu comprimento de onda de Bragg (D'AMATO ***et al.,*** 2021). Ao monitorar o deslocamento do comprimento de onda de Bragg, as mudanças na deformação induzida pelo revestimento hidrofílico podem ser medidas. A magnitude e direção da deformação fornecem informações sobre as variações de umidade no ambiente. A relação entre a deformação e a correspondente mudança no comprimento de onda de Bragg pode ser determinada por meio de calibração e caracterização do sensor (D'AMATO ***et al.,*** 2021).

Para um sensor FBG revestido com material hidrofílico isolado de distúrbios mecânicos externos, a relação entre a variação do comprimento de onda central de uma FBG à umidade e temperatura pode ser expressa por (D'AMATO ***et al.,*** 2021):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon_{UR} + (1 - P_e)\varepsilon_T + \xi\Delta T \qquad (2.26)$$

onde $\Delta\lambda_{\mathrm{B}}$ representa a mudança no comprimento de onda de Bragg do sensor FBG devido a fatores externos. λ_{B} é o comprimento de onda de Bragg. P_e indica o coeficiente efetivo de tensão-ótica, no qual a tensão radial é considerada devido ao efeito de Poisson, ξ é o coeficiente termo-ótico e ΔT é a variação de temperatura. $\varepsilon_{\mathrm{UR}}$ é a tensão axial na fibra

devido à umidade relativa e ε_T é a tensão induzida pela temperatura. Essas tensões surgem a partir das expansões higroscópicas e térmicas dos materiais que constituem o sensor (D'AMATO ***et al.,*** 2021).

A vantagem de usar uma FBG com revestimento hidrofílico como sensor de umidade baseado em detecção de deformação é sua alta sensibilidade e precisão. O revestimento hidrofílico exibe uma resposta mecânica significativa à umidade, permitindo a medição precisa da deformação induzida por mudanças de umidade segundo (LEONE ***et al.,*** 2015).

2.3.2 A LPG como sensor de índice de refração do meio externo

Os sensores de rede de período longo podem ser utilizados como sensores de índice de refração do meio externo (ENRÍQUEZ, 2011). A operação desses sensores é baseada no acoplamento entre o modo propagante do núcleo da fibra e os modos co-propagantes da casca. A LPG possui comprimentos de onda de ressonância que são determinados pela condição de casamento de fase entre esses modos (ENRÍQUEZ, 2011; SINGH, 2015). Quando o índice de refração do meio externo à LPG é alterado, ocorrem mudanças nos comprimentos de onda de ressonância. Essas mudanças ocorrem devido à variação na condição de casamento de fase entre os modos da casca e o modo do núcleo. Essa variação resulta em deslocamentos no comprimento de onda central das bandas de atenuação presentes no espectro de transmissividade da LPG (EIRA, 2007).

Ao medir o deslocamento no comprimento de onda central das bandas de atenuação, é possível determinar as variações no índice de refração do meio externo. Essas variações podem ser relacionadas a diferentes propriedades ou parâmetros do meio, como concentração de substâncias químicas ou outras características físicas. A sensibilidade e precisão desse tipo de sensor podem ser calibradas e ajustadas para atender às necessidades específicas da aplicação (ENRÍQUEZ, 2011; ZOU ***et al.,*** 2015).

A equação que descreve a interação entre a LPG e o índice de refração do meio externo é dada por (BHATIA, 1999)

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_{\text{ext}}} = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_{\text{cl}}^{\text{m}}}\left[\frac{dn_{\text{cl}}^{\text{m}}}{dn_{\text{ext}}}\right] \tag{2.27}$$

onde λ_{res} é comprimento de onda ressonante, n_{cl}^{m} é o índice de refração do m-ésimo modo da casca e n_{ext} é o índice de refração do meio externo. Para compreender esse comportamento, pode-se observar, na simulação do artigo (CORSI, 2024) apresentada na Figura 8 que a resposta espectral do sensor LPG exibe picos distintos e bem definidos quando imerso em substâncias com diferentes índices de refração. Observa-se também que o aumento no índice de refração resulta em um deslocamento do espectro de transmissividade para comprimentos de onda menores, conhecido como *blueshift*. Esse fenômeno é atribuído ao aumento do índice de refração efetivo dos modos da casca, o que, de acordo com a condição de ressonância, leva a ressonâncias em comprimentos de onda menores (ENRÍQUEZ, 2011).

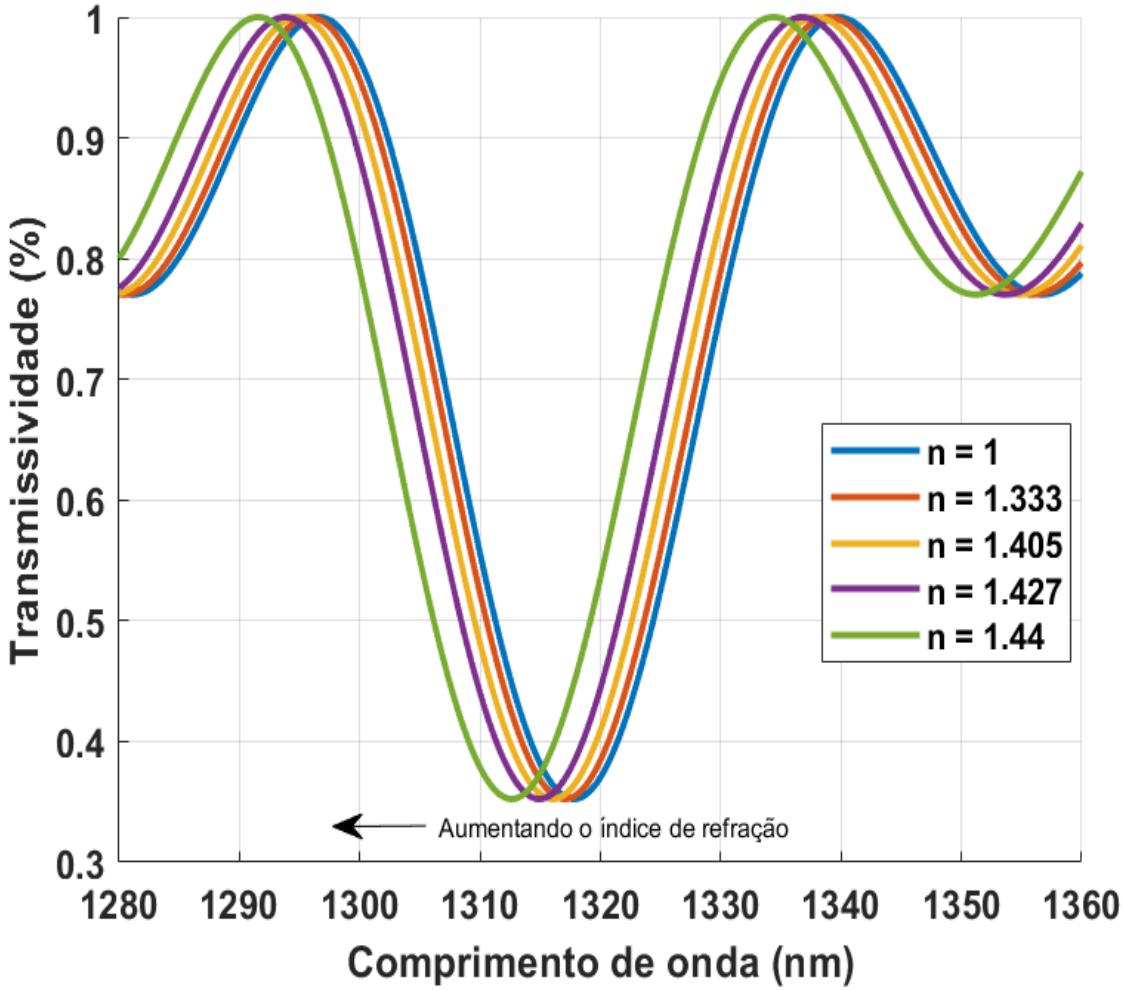


Figura 8- Espectro de Transmissividade quando o sensor LPG é exposto a substâncias com índices de refração distintos.

2.3.3 A LPG como sensor de umidade do solo

O princípio de detecção de uma rede de período longo (LPG) diretamente em contato com o solo como sensor de umidade baseia-se na interação entre o índice de refração externo do solo ao redor do sensor e e o índice de refração efetivo da LPG. A LPG é uma estrutura gravada ao longo do núcleo da fibra ótica com modulações periódicas do índice de refração. Essas modulações permitem o acoplamento da luz propagada no modo fundamental do núcleo para modos da casca, resultando em atenuações no espectro transmitido. A posição dessas atenuações depende da condição de casamento de fase entre os modos acoplados e é altamente sensível a mudanças no índice de refração do meio externo. Assim, qualquer variação na umidade do solo resulta em uma alteração no índice de refração do meio externo, o que, por sua vez, desloca o comprimento de onda de ressonância observado no espectro do sensor.

Normalmente, a maioria dos estudos na literatura utiliza um revestimento hidrofílico, como polímeros sensíveis à umidade, para aumentar a sensibilidade do sensor (WANG ***et al.,*** 2019). Esses revestimentos absorvem a umidade do solo, resultando em alterações no índice de refração do revestimento, que, por sua vez, influenciam a resposta do sensor. Outros métodos também podem ser utilizados para aumentar a sensibilidade da LPG, enquanto o próprio sensor sem revestimento já apresenta sensibilidade à umidade do solo. A maior sensibilidade da LPG sem revestimento em relação ao índice de refração é observada quando o índice de refração do meio externo se aproxima do índice de refração da casca, geralmente composta por sílica (ERDOGAN, 1997). Além disso, os modos de acoplamento da casca precisam ser otimizados para que a estrutura da LPG interaja de forma intensa com o meio externo (PATRICK, 1998). Cascas finas (<300 nm) têm a capacidade de proporcionar alta sensibilidade da LPG dentro da faixa de índices de refração desejada (ENRIQUEZ, 2011; PATRICK, 1998). Essas cascas influenciam de forma significativa as condições de propagação dos modos guiados (UDD, 1998; SMIETANA, 2016).

Quando a umidade do solo varia, as propriedades dielétricas e o índice de refração do solo ao redor da LPG também mudam (SCHAFER, 2022). Essas variações afetam a interação entre o modo fundamental e os modos da casca da LPG, resultando em mudanças no índice de refração efetivo da casca, como mencionado anteriormente. Essas

alterações levam a deslocamentos no comprimento de onda ressonante da LPG, que é o comprimento de onda central das bandas de atenuação no espectro de transmissividade da LPG (URRUTIA ***et al.,*** 2015). Monitorando o deslocamento do comprimento de onda ressonante da LPG, é possível correlacionar essas mudanças com as variações na umidade do solo. A magnitude e a direção do deslocamento fornecem informações sobre os níveis de umidade, já que o solo em contato direto com a LPG afeta diretamente o índice de refração do sensor (ZHOU ***et al.,*** 2020).

Para a detecção de umidade do solo, a variação do comprimento de onda ressonante de uma LPG revestida com material hidrofílico pode ser expressa como (SINGH, 2015):

$$\frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_{US}} = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_{\text{cl}}^{\text{m}}}\left[\frac{dn_{\text{cl}}^{\text{m}}}{dn_{\text{US}}}\right] \tag{2.28}$$

Na equação (2.29) n_{US} é o índice de refração devido à umidade do solo. Por meio da calibração do sensor utilizando níveis conhecidos de umidade ou por meio de medições de referência, é possível estabelecer uma relação entre o deslocamento do comprimento de onda e a umidade correspondente do solo.

Para analisar analiticamente esses deslocamentos em função da umidade do solo pode-se utilizar (CHIANG, 2000; ENRIQUEZ, 2011)

$$\lambda_m = \lambda_0^m + \frac{u_\infty^2 {\lambda_0^m}^3 \Lambda}{8 n_{cl} r_{cl}^3}\left(\frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{US0}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{cl}^2 - n_{US}^2}}\right) \tag{2.29}$$

onde,

λ_0^m é a posição inicial do comprimento de onda central da m-ésima banda de atenuação correspondente ao índice de refração do solo inicial n_{US0};

u_∞ é a m-ésima raiz da função de Bessel de 1ª espécie e ordem zero;

Λ é o período da LPG;

n_{US0} é o índice de refração inicial do solo;

n_{US} é o índice de referação devido à umidade do solo;

r_{cl} é o raio da casca;

λ_m é a posição final para a qual foi deslocado o comprimento de onda de ressonância após o contato com o meio cujo índice de refração do solo é n_{US}.

2.3.4 Comparação entre FBG e LPG como elementos sensores

Um dos principais diferenciais da LPG em relação à FBG é a sua capacidade intrínseca de detectar umidade do solo diretamente, sem a necessidade de revestimentos adicionais. Enquanto a LPG pode ser utilizada de forma pura (sem revestimento) para medição de umidade do solo, a FBG, em sua forma básica, não possui sensibilidade a essa grandeza, exigindo a aplicação de camadas sensíveis, como filmes de polímeros higroscópicos, para tal finalidade (YIN, 2008; D'AMATO ***et al.,*** 2021). Essa característica torna a LPG uma solução mais simples, econômica e prática para aplicações em agricultura, monitoramento ambiental e estudos geotécnicos, onde a medição de umidade do solo é crítica. A LPG é particularmente preferível para sensoriamento de umidade do solo devido à sua alta sensibilidade a variações no índice de refração do meio externo, que é diretamente influenciado pela presença de água no solo (HALLETT ***et al.,*** 2017). Essa sensibilidade intrínseca elimina a necessidade de modificações complexas ou revestimentos adicionais, reduzindo custos e simplificando a sua implementação em campo. Por outro lado, a FBG, que é amplamente utilizada para medição de deformações mecânicas e temperatura, requer revestimentos especializados para detectar umidade, o que aumenta a complexidade e o custo do sensor (KERSEY, 1997; WANG, 2021).

Além disso, a LPG apresenta alta sensibilidade às variações do índice de refração, o que as torna adequadas para detectar mudanças associadas à presença de água ou outros materiais orgânicos no solo (WANG ***et al.,*** 2019). Isto faz da LPG uma escolha superior para aplicações de sensoriamento de umidade do solo em comparação com a FBG (HALLETT ***et al.,*** 2017).

3– MONTAGEM DO SENSOR E CALIBRAÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

Neste capítulo, é apresentada a metodologia utilizada para investigar o uso de um sensor de rede de período longo como sensor de umidade do solo. O capítulo está estruturado para cobrir a caracterização experimental do sensor LPG, desde a preparação da amostra de solo até a análise dos dados coletados. Inicialmente, são descritos os procedimentos para a montagem do sensor e a preparação do solo (substrato para plantio), escolhido por suas propriedades ideais de retenção de água e sua relevância em aplicações agrícolas. Em seguida, detalha-se o processo de calibração do sensor e o monitoramento em tempo real dos espectros de transmissividade da LPG. A análise dos dados, é feito com o auxílio dos *softwares* OriginPro e MATLAB, que permitem estabelecer uma relação precisa entre a umidade do solo e os deslocamentos do comprimento de onda.

3.1 Caracterização experimental do sensor LPG

Esta seção detalha a metodologia empregada na caracterização experimental do sensor LPG. A caracterização do sensor é um passo fundamental para compreender as capacidades e limitações do sensor. O processo envolveu a obtenção da resposta espectral da LPG devido às mudanças no índice de refração induzidas por diferentes fatores (ar e água). Esta análise tem como objetivo proporcionar uma compreensão do comportamento do sensor ao interagir com meios caracterizados por diferentes índices de refração.

Contudo, nesse estudo, opta-se pela utilização da LPG sem revestimento exposta diretamente ao solo. Essa abordagem visa simplificar o design do sensor, eliminando a necessidade de materiais adicionais, além de explorar diretamente a interação entre o meio do solo e a fibra ótica. É importante destacar que a LPG utilizada neste projeto foi doada pela Universidade do Porto/INESC TEC, uma vez que não foi possível fabricá-la no laboratório devido à ausência de equipamentos apropriados para a gravação da rede na fibra ótica. A escolha por utilizar uma LPG pronta permite que o foco do trabalho permanecesse na análise experimental do sensor em contato com o solo.

3.1.1 Montagem Experimental

A configuração experimental para medir o índice de refração (IR) usando um sensor de rede de período longo está ilustrada na Figura 9. Esta configuração consiste de uma fonte de luz de banda larga (Thorlabs Fiber Coupled SLD), um sensor LPG, um analisador de espectro ótico (OSA, modelo AQ6370B, Yokogawa) e um sistema de aquisição de dados utilizando um computador pessoal. Uma extremidade da fibra ótica contendo a LPG é conectada à fonte de luz de banda larga para garantir uma passagem de luz uniforme, enquanto a outra extremidade é ligada ao OSA para registrar o espectro de luz transmitido. As extremidades da fibra são fixadas de forma segura para minimizar efeitos de deformação, garantindo a integridade estrutural da LPG. O ambiente do laboratório é mantido a uma temperatura controlada de 25°C ± 1°C para reduzir variações térmicas que poderiam influenciar a sensibilidade do índice de refração durante todo o experimento.

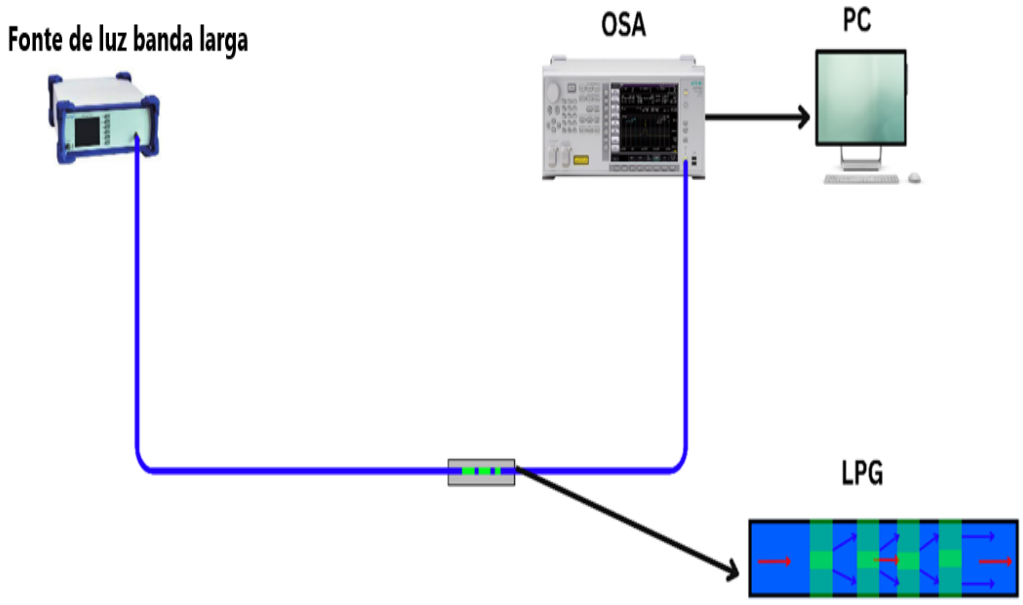


Figura 9- Esquema da montagem experimental

Durante o processo de medição, a fonte de luz de banda larga injeta luz no sensor LPG, que sofre influência do meio externo levando a deslocamentos no comprimento de onda de ressonância. O OSA captura e exibe esses deslocamentos no espectro de transmissividade em tempo real, com os dados espectrais registrados no computador para análise posterior.

Na Figura 10, está ilustrado o setup experimental para caracterização do sensor LPG feito no Laboratório de Fotônica (Lafot) do CEFET-RJ.

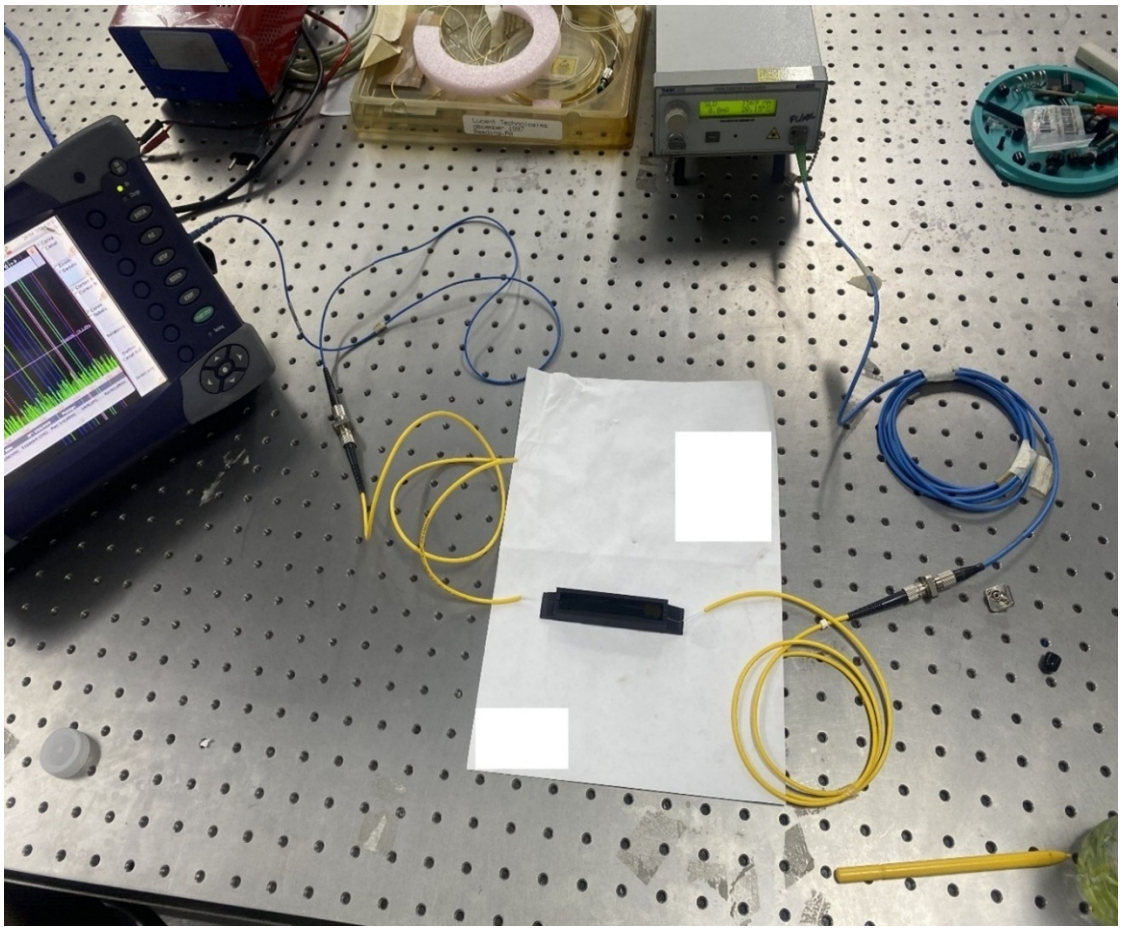


Figura 10- Setup experimental para caracterização da LPG no laboratório.

Para a caracterização do sensor LPG, ele é exposto a dois meios diferentes, água e ar, a fim de analisar a direção do deslocamento do comprimento de onda em relação às mudanças no índice de refração do meio externo. Quando o sensor é exposto à água,

observa-se um deslocamento (*blueshift*) no comprimento de onda de ressonância, indicando um aumento no índice de refração do meio. Em contraste, quando exposto ao ar, o deslocamento foi em direção a comprimentos de onda mais longos (*red shift*) quando comparado com a LPG na água, refletindo a menor densidade ótica do ar em comparação com a água. Os resultados, essenciais para compreender o comportamento do sensor LPG em diferentes condições e a sua calibração em relação à umidade do solo, serão discutidos no próximo capítulo. A análise desses deslocamentos permite validação da eficácia do sensor para medições de umidade do solo (LEONE ***et al.,*** 2017; WANG ***et al.,*** 2019).

3.2 Calibração da umidade do solo

A precisão das medições de umidade do solo depende da qualidade e da preparação da amostra de solo utilizada. Para este experimento, foram utilizados quatro tipos de solo diferentes, mas o substrato para plantio foi escolhido devido às suas características favoráveis para o estudo de umidade. O solo substrato para plantio possui uma composição equilibrada de areia, limo e argila, o que faz com que ele tenha uma capacidade de retenção de água uniforme e uma boa permeabilidade (AVRELLA ***et al.,*** 2021; SCHAFER, 2015). A preparação da amostra de solo é realizada seguindo um protocolo rigoroso para minimizar a variabilidade e garantir a precisão das medições.

3.2.1 Materiais e Equipamentos

Para a preparação das amostras de solo, são utilizados os seguintes materiais e equipamentos (CAPUTO, 2017).

- Amostras de solo: Amostras de solo são coletadas de diferentes locais e tipos para garantir variabilidade. Utilizamos areia de construção, areia de praia, solo argiloso e substrato para plantio.
- Seringa: Uma seringa com capacidade de 10 ml é utilizada para adicionar água às amostras de solo.
- Balança de precisão: Para pesar as amostras de solo.

- Forno: Um forno regulado foi utilizado com temperatura constante de 105°C para secagem do solo.
- Recipientes: Recipiente limpo e seco com peso total de 51g é utilizado para armazenar as amostras de solo durante o experimento. O recipiente utilizado foi escolhido baseando na sua geometria regular, que facilita a distribuição uniforme da água e a inserção do sensor. Ele tem as seguintes dimensões, 29 cm de diâmetro e uma altura de 2 cm.

A preparação da amostra de solo e a calibração da umidade do solo envolve uma série de etapas, visando garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados. O processo consiste em duas etapas principais: a primeira é a caracterização da umidade do solo utilizando o método gravimétrico, que permite determinar com precisão a quantidade de água presente no solo (CAPUTO, 2017) e a segunda etapa envolve a calibração do sensor, onde a LPG é enterrada no solo e exposta a diferentes níveis de umidade, permitindo a análise dos deslocamentos do comprimento de onda em resposta às variações de umidade.

Inicialmente, foram feitos testes preliminares com diferentes tipos de solo, incluindo areia de praia, areia de construção, solo argiloso e substrato para plantio. Esses testes tinham como objetivo avaliar as propriedades de retenção e absorção de água de cada tipo de solo, bem como sua adequação para o experimento. Após uma análise detalhada das propriedades de cada material, o substrato para plantio foi selecionado como o material do estudo, devido às suas características ideais para o experimento e suas aplicações práticas na agricultura. A seguir, descreve-se em detalhes os passos envolvidos na caracterização do solo e da umidade do solo para a calibração do sensor:

a. Solo substrato para plantio

O substrato para plantio foi escolhido devido às suas propriedades físicas e químicas, que o tornam ideal para o experimento de medição de umidade do solo. A principal razão para essa escolha é a sua distribuição granulométrica equilibrada, que inclui uma proporção adequada de partículas de areia e argila (AVRELLA ***et al.,*** 2021; SCHAFER, 2022). Essa composição influencia diretamente na capacidade de retenção de água do solo, uma vez que a presença de argila aumenta a superfície específica e a capacidade de adsorção de água, enquanto a areia contribui para a aeração e drenagem (SCHAFER, 2015; SCHAFER, 2022). Essa caracterização é essencial para assegurar que

o solo um comportamento consistente em relação à umidade. Essa etapa é importante para obter dados confiáveis que podem ser utilizados em aplicações práticas na agricultura (CAPUTO, 2017).

b. Secagem do solo

É realizada a secagem do solo a 105°C no forno em um intervalo de 16 a 24 horas para eliminar completamente a umidade residual. Esta temperatura é padrão em análises de solo para garantir a remoção da água higroscópica sem alterar a estrutura do solo (ALPANA ***et al.,*** 2014).

c. Pesagem do solo

A pesagem do solo seco é realizada utilizando uma balança para garantir a precisão das medições. A massa do recipiente vazio é medida e subtraída do peso total, para que somente a massa do solo seja utilizada nos cálculos.

d. Adição de água

A água é adicionada incrementalmente em volumes de 20 ml para permitir um controle preciso da umidade no solo. Após cada adição de água, a amostra de solo é deixada em repouso por um período de 10 minutos para garantir a absorção e a distribuição uniforme da água. Este processo foi monitorado para garantir a homogeneidade (CAPUTO, 2017). O volume de água adicionado variou de 0 ml a 140 ml, para que fosse possível cobrir um intervalo de umidade que o sensor possa encontrar em aplicações reais.

Para a caracterização e cálculo da umidade do solo é utilizado um método tradicional, que é o método gravimétrico. O método gravimétrico é uma técnica amplamente utilizada para determinar o valor de umidade do solo (CAPUTO, 2017). Ele se baseia na medição direta da massa da água presente na amostra de solo em relação à massa do solo seco. Esta técnica é considerada um padrão devido à sua precisão, sendo frequentemente utilizada para calibrar outros métodos de medição de umidade do solo, tanto diretos quanto indiretos (ZHAO ***et al.,*** 2019). Ao comparar os resultados obtidos por outros métodos com os resultados do método gravimétrico, é possível determinar a precisão e a confiabilidade desses métodos.

Para se calcular a umidade do solo em porcentagem usa-se (CAPUTO, 2017):

$$\text{Umidade de solo (\%)} = \frac{m_{\text{água}}}{m_{\text{solo seco}}} \times 100 \quad (3.1)$$

onde a $m_{\text{água}} = m_{\text{solo úmido}} - m_{\text{solo seco}}$ é a equação que representa a massa da água presente na amostra de solo, calculada pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa do solo seco. $m_{\text{solo úmido}}$ corresponde à massa do solo úmido após cada adição de água. $m_{\text{solo seco}}$ refere-se à massa da amostra de solo seco após a secagem completa no forno, onde toda a água foi removida.

A segunda etapa foca na implementação prática do sensor LPG no solo, variando sistematicamente a umidade para observar sua resposta. Assim como na configuração inicial na Figura 10 para a investigação das mudanças no índice de refração, nesta montagem experimental, o sensor LPG foi inserido no solo para medição da umidade, conforme ilustrado na Figura 11. O sensor foi enterrado no solo a uma profundidade de aproximadamente 1 cm, permitindo a interação direta com o solo e a detecção das variações no índice de refração causadas pelas mudanças na umidade no solo.

A montagem experimental para medição da umidade do solo utilizando o sensor LPG está mostrada na Figura 11.

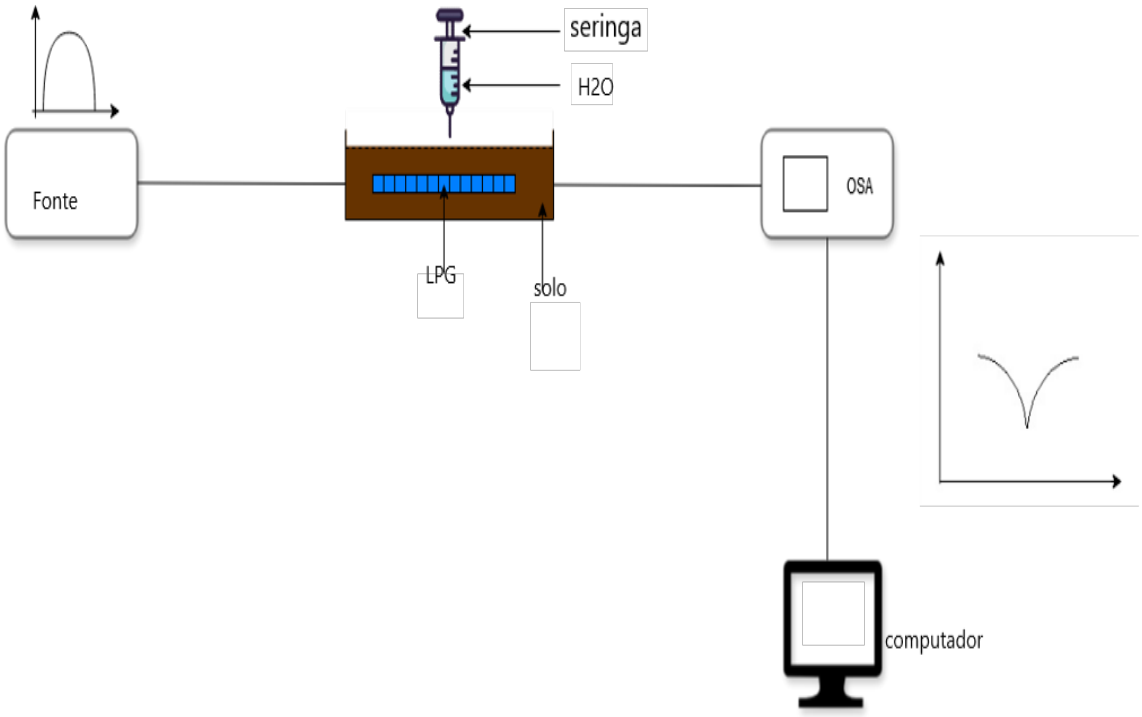


Figura 11- Montagem experimental para medição da umidade do solo utilizando o sensor LPG

É feito um vale de retenção na superfície do solo onde é colocada a água para melhorar e garantir a distribuição uniforme da água, como pode ser visto na Figura 12. A água é adicionada em incrementos de 20 ml (0 a 140 ml) e o monitoramento em tempo real dos espectros de transmissividade é feito utilizando o OSA. Os registros dos deslocamentos do comprimento de onda ressonante são feitos em intervalo de 10 minutos após cada adição de água. Observa-se um *blueshift* com o aumento da umidade, indicando a sensibilidade do sensor às mudanças no índice de refração do solo. O setup experimental usado para a medição da umidade do solo utilizando o sensor LPG está mostrado na Figura 12.

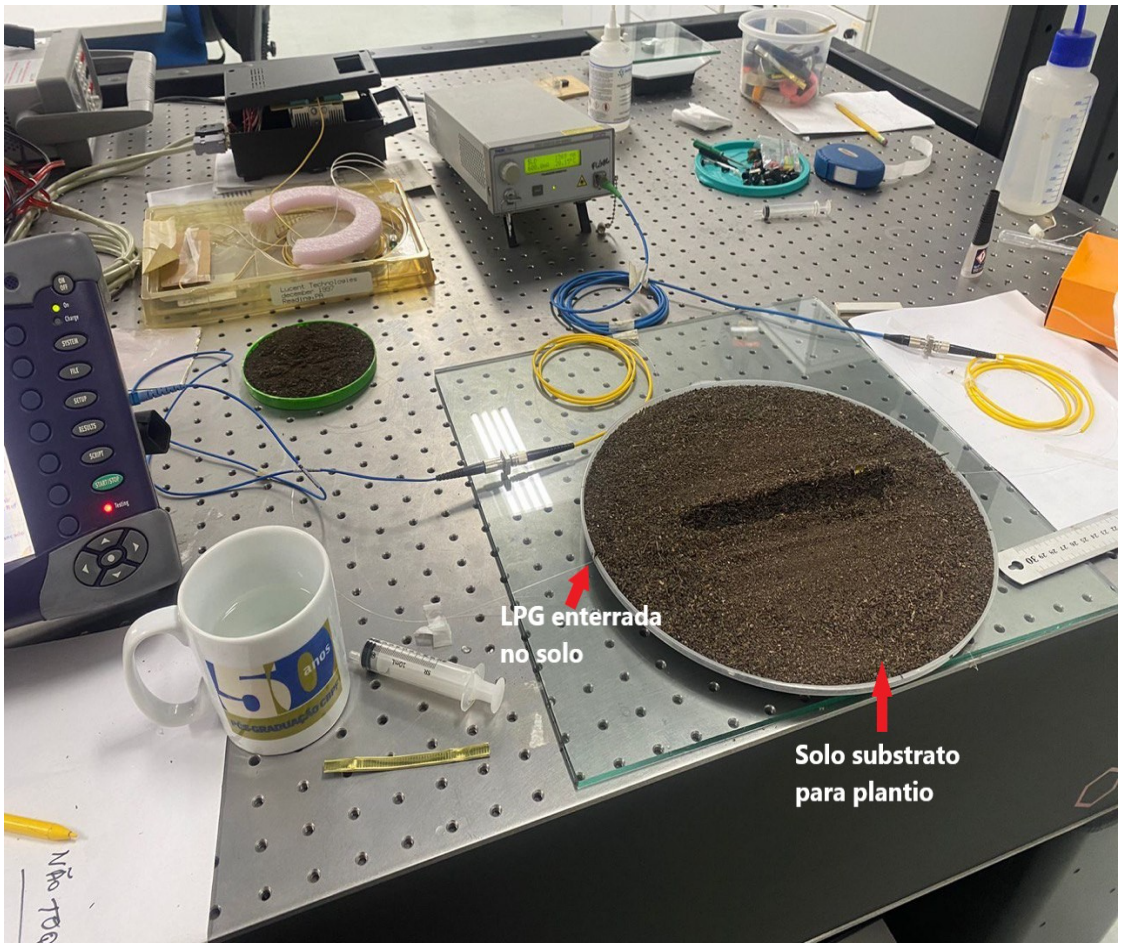


Figura 12- Montagem experimental no LAFOT/CEFET-RJ para análise e aquisição dos efeitos da variação de umidade do solo no espectro de transmissividade do sensor LPG.

Os dados coletados são analisados utilizando o *software* OriginPro para estabelecer uma relação precisa entre a umidade do solo e os deslocamentos do comprimento de onda. Os espectros de transmissividade são plotados para cada nível de umidade, evidenciando os deslocamentos das bandas de atenuação. Com o auxílio do OriginPro, os deslocamentos do comprimento de onda foram calculados e plotados em função da umidade, gerando uma curva de calibração que demonstrou uma clara tendência de deslocamento (*blueshift*) com o aumento da umidade.

Para garantir a confiabilidade e a consistência dos resultados, o experimento de medição da umidade do solo utilizando o sensor LPG é realizado quatro vezes. Essa repetição é essencial para assegurar a reprodutibilidade e a repetibilidade do método, minimizando possíveis variações causadas por fatores externos, como distribuição não uniforme de água, flutuações ambientais ou heterogeneidades no solo. A repetição dos

testes permite uma análise robusta dos dados e a aplicabilidade do sensor em condições reais de monitoramento agrícola. Este procedimento experimental detalhado, a metodologia e o monitoramento em tempo real, permitem a obtenção de dados confiáveis e uma boa calibração. Além disso, controlar a temperatura ambiente durante os experimentos é essencial, pois mudanças de temperatura podem alterar o índice de refração efetivo da fibra ótica. Isso afeta diretamente o comprimento de onda de ressonância do sensor LPG, o que pode gerar leituras incorretas. Ao manter a temperatura constante, garante-se que os deslocamentos no espectro observados sejam causados apenas pelas variações na umidade do solo, evitando interferências que possam comprometer a precisão dos resultados. O ambiente do laboratório neste projeto foi mantido a uma temperatura controlada de 25°C ± 1°C.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta uma análise dos resultados do estudo de um sensor LPG projetado para medir umidade do solo. A medição confiável da umidade do solo é importante para otimizar cronogramas de irrigação nas práticas agrícolas. A medição confiável da umidade do solo é fundamental para otimizar cronogramas de irrigação nas práticas agrícolas, onde costuma-se buscar uma precisão na faixa de $\pm 2\%$ a $\pm 3\%$ de quantidade volumétrica de água para garantir eficiência e evitar desperdícios (TOPP, 1980). O objetivo principal deste capítulo é validar e investigar a capacidade de uma LPG para detectar com precisão a umidade do solo.

A análise envolve simulações teóricas, baseadas na teoria do modo acoplado, e experimentos feitos no laboratório. Verifica-se as previsões teóricas do comportamento do sensor LPG por meio da validação experimental. A sensibilidade, precisão e reprodutibilidade do sensor sob condições controladas no laboratório são analisadas, e finalmente as implicações práticas desses resultados para aplicações agrícolas são discutidas.

4.1 Resultado da simulação

São apresentados e analisados os resultados da simulação do sensor LPG para detecção de umidade do solo. A simulação tem como objetivo validar o desempenho e a sensibilidade do sensor LPG sob diferentes condições de umidade do solo, investigar a resposta espectral e os deslocamentos do comprimento de onda de ressonância causados pelas mudanças no índice de refração (IR) do meio circundante. Foram obtidos experimentalmente os comprimentos de onda de ressonância para diferentes níveis de umidade e a partir desses dados, junto com o auxílio da equação (2.29), calculou-se analiticamente o índice de refração correspondente a cada umidade. Assim, o valor de IR pode ser correlacionado diretamente com a umidade do solo.

Desta forma, o deslocamento do comprimento de onda do sensor LPG foi simulado para diferentes porcentagens de umidade do solo utilizando o software

MATLAB. Os resultados demonstram como a variação de umidade impacta o índice de refração do meio circundante e, consequentemente, o desempenho espectral do sensor LPG.

4.1.1 Análise da resposta espectral

A Figura 13, exibe os resultados da simulação feita utilizando a equação (2.29), para analisar o índice de refração calculado em função dos valores de umidade do solo. A interpolação dos dados experimentais, mostra uma tendência assintótica que ocorre à medida que a umidade aumenta. Esta correlação confirma que, à medida que a umidade do solo aumenta, o índice de refração também aumenta consistentemente, até a saturação do solo.

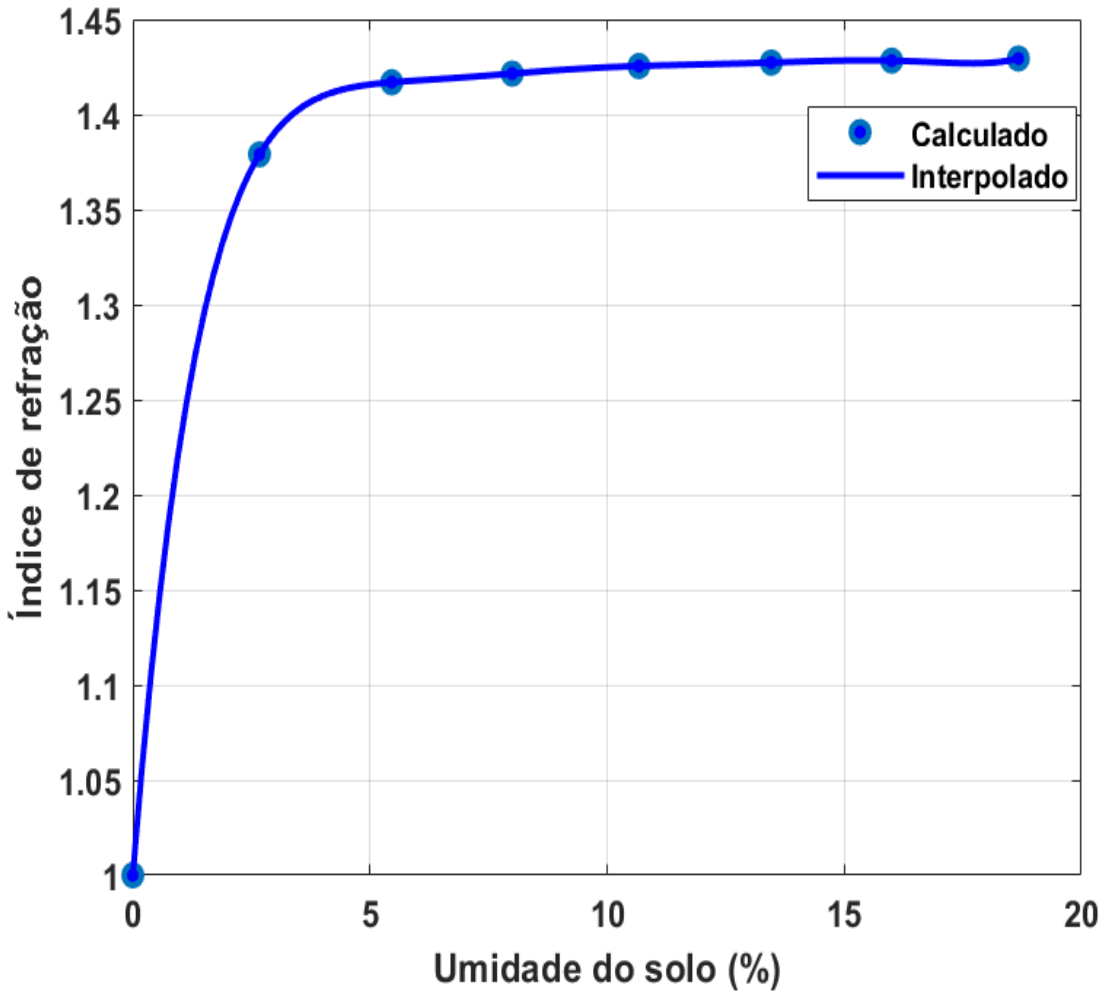


Figura 13 - Índice de refração em função dos valores de umidade do solo.

Observa-se que, inicialmente, o índice de refração sofre um aumento drástico à medida que a umidade do solo cresce, estabilizando-se em valores próximos a 1,41 a partir de aproximadamente 5% de umidade. Este comportamento indica que, após atingir certo nível de saturação, aumentos adicionais na umidade do solo têm efeito limitado sobre o índice de refração do solo. Estes valores de índice de refração obtidos são utilizados posteriormente para plotar o espectro de transmissividade simulado da LPG como sensor de umidade do solo.

A simulação do espectro de transmissividade do sensor LPG, mostrado na Figura 14 obtida utilizando as equações (2.25) e (2.29), ilustra as mudanças nos comprimentos de onda de ressonância para os diversos níveis de umidade do solo. Cada nível de umidade do solo está associado a um índice de refração distinto, que influencia a resposta espectral do sensor. Na equação (2.29), se se alterar o índice de refração n_{US} correspondendo a uma porcentagem distinta de umidade do solo, isto causará um deslocamento no comprimento de onda de ressonância. A resposta espectral exibe picos distintos e bem definidos, enfatizando a alta sensibilidade do sensor LPG às mudanças de IR do meio circundante.

O resultado da simulação mostra um *blueshift* no comprimento de onda de ressonância com o aumento do índice de refração. O sensor LPG demonstrou um deslocamento de aproximadamente 6,9 nm à medida que o IR aumentou de 1,00 (representando 0% de umidade do solo) para 1,429 (representando 18,67% de umidade do solo). A sensibilidade foi, portanto, de 14,1 nm/RIU. O deslocamento do comprimento de onda está alinhado com a interação esperada entre os modos de casca da LPG e o meio externo.

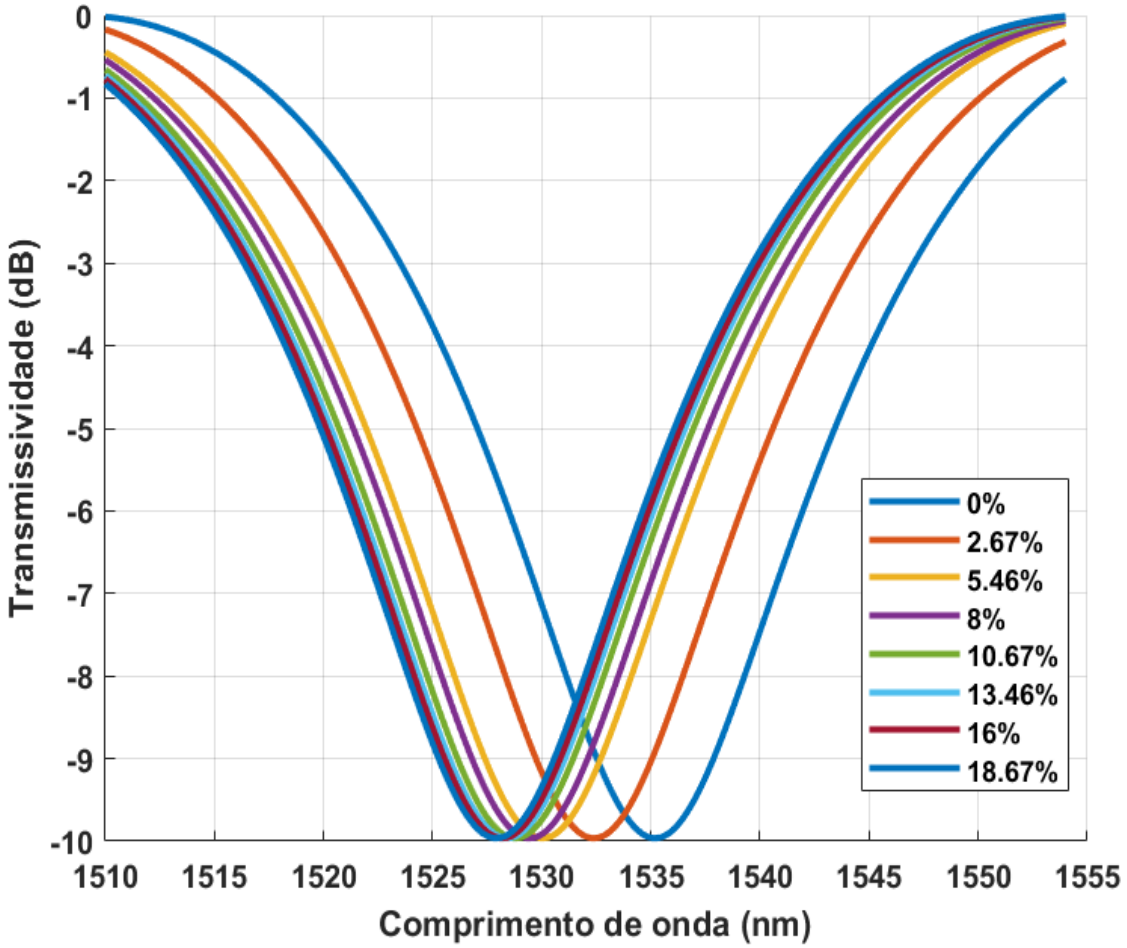


Figura 14- Simulação dos espectros de transmissividade da LPG quando imersa em diferentes níveis de umidade do solo.

Essa resposta da simulação foi obtida com base nos seguintes parâmetros: comprimento de onda ressonante inicial $\lambda_r = 1535{,}19$ nm, comprimento da rede $L = 0{,}03\,m$, período da LPG $\Lambda = 660\,\mu m$, raio da casca de $r_c = 62{,}5\,\mu m$, índice de refração do núcleo de $n_{co} = 1{,}45$, a m-ésima raiz da função de Bessel de ordem zero u_∞ =8,6537 e o coeficiente de acoplamento $\kappa = \pi/2$. Os passos detalhados da simulação do sensor LPG como sensor de umidade do solo, e o fluxograma do processo computacional, encontram-se apresentados no Anexo A.

Para entender o comportamento do comprimento de onda com o aumento da umidade do solo, o comprimento de onda de ressonância do sensor LPG foi plotado em função da umidade do solo. A Figura 15, mostra uma tendência de diminuição no

comprimento de onda de ressonância à medida que a umidade aumenta, o que é consistente com o princípio ótico de que um maior volume de água aumenta o índice de refração do solo e isso reduz a diferença do índice de refração efetivo do modo da casca e do modo do núcleo da fibra. O *fitting* exponencial resultou em um valor de $R^2 = 0{,}996$, indicando um alto grau de correlação entre o comprimento de onda e a umidade do solo.

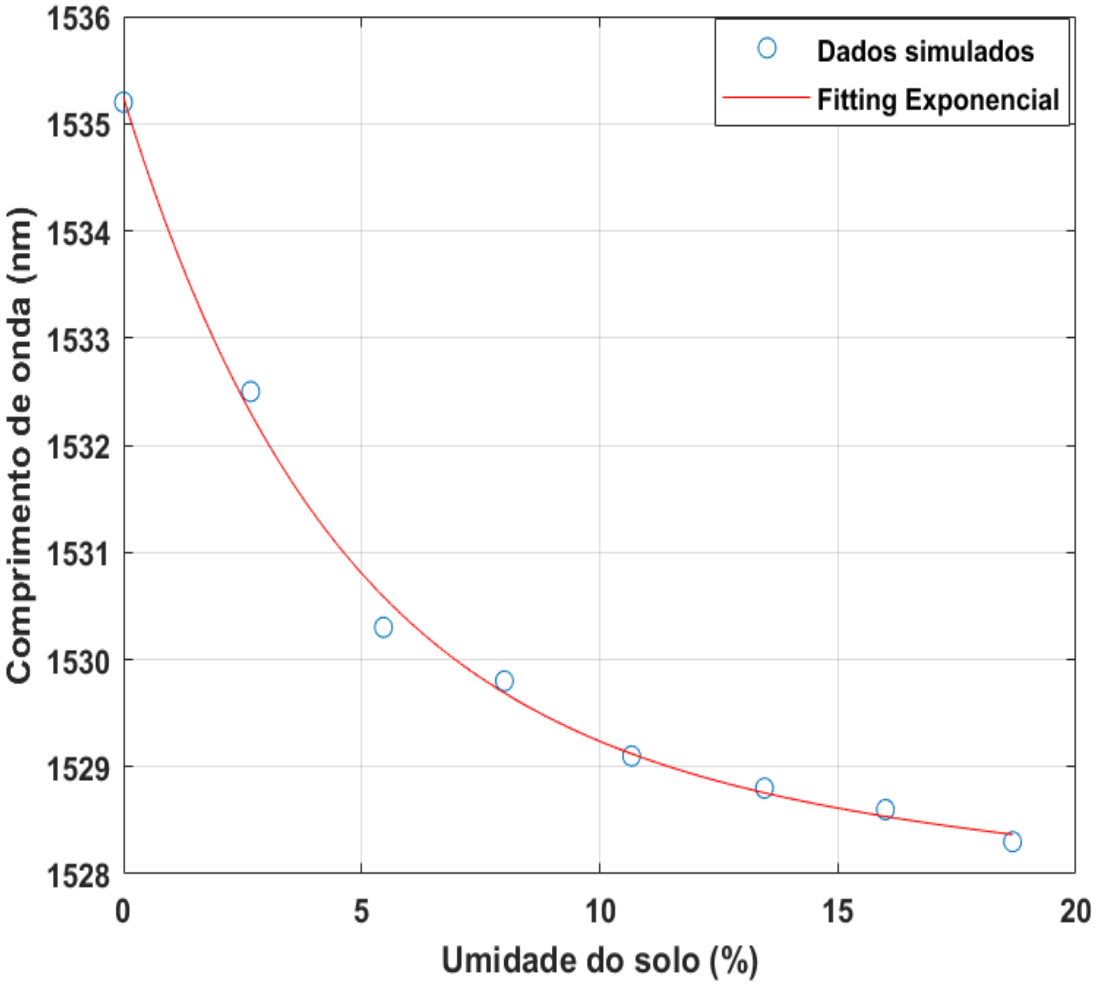


Figura 15- Relação entre a umidade do solo e os deslocamentos de comprimento de onda em um sensor LPG.

As simulações realizadas comprovam a eficiência do sensor LPG na detecção de umidade do solo. A sensibilidade máxima e a sensibilidade mínima obtidas na simulação do sensor são 1,38 nm/% e 0,033 nm/%, respectivamente. A sensibilidade do sensor às variações do índice de refração, evidenciada pelos deslocamentos de comprimento de

onda, valida seu potencial para aplicações práticas em agricultura e monitoramento ambiental.

4.2 Resultados e análises experimentais

A investigação experimental começou com a caracterização da umidade do solo por meio da adição precisa de volumes de água ao solo substrato para plantio sob condições controladas de temperatura ambiente. A Figura 16, ilustra uma relação linear entre o volume de água adicionado e o aumento percentual resultante na umidade do solo. Esta calibração é fundamental para quantificar e reproduzir com precisão condições específicas de umidade do solo durante experimentos subsequentes de caracterização do sensor.

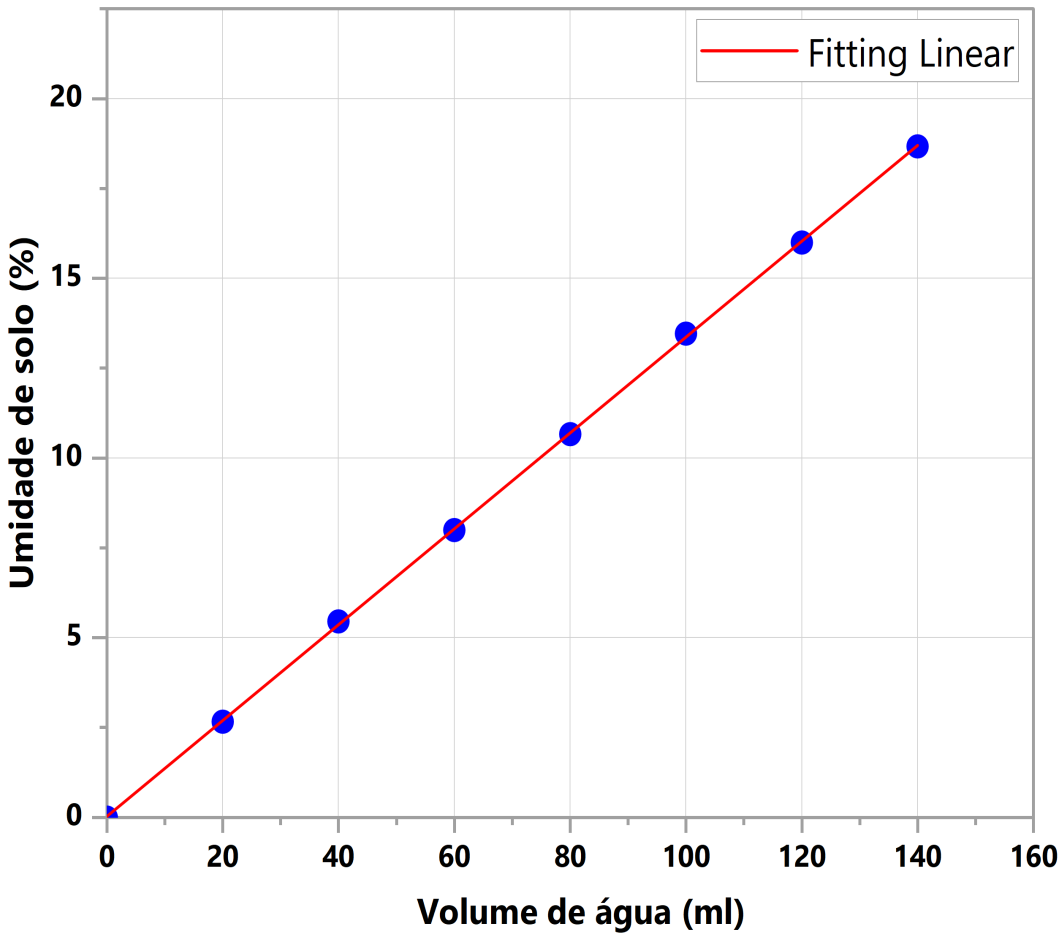


Figura 16- Relação entre umidade do solo e volume de água para solo substrato para plantio realizado em temperatura ambiente.

Após a caracterização da umidade do solo, o desempenho e a sensibilidade do sensor LPG foram avaliados. O sensor foi exposto a oito níveis de umidade mostrados na Figura 16. As variações na umidade do solo foram investigadas monitorando mudanças correspondentes no índice de refração, por meio de mudanças observadas nos espectros de transmissividade do sensor. A Figura 17, apresenta as respostas espectrais do sensor para adições de volumes de água de 20 ml a 140 ml, juntos com as curvas de referência da LPG no ar (LPG_ar) e no solo seco (LPG_enterrado). O comprimento de ressonância da LPG no ar é 1532,05 nm e da LPG enterrada é 1535,76 nm.

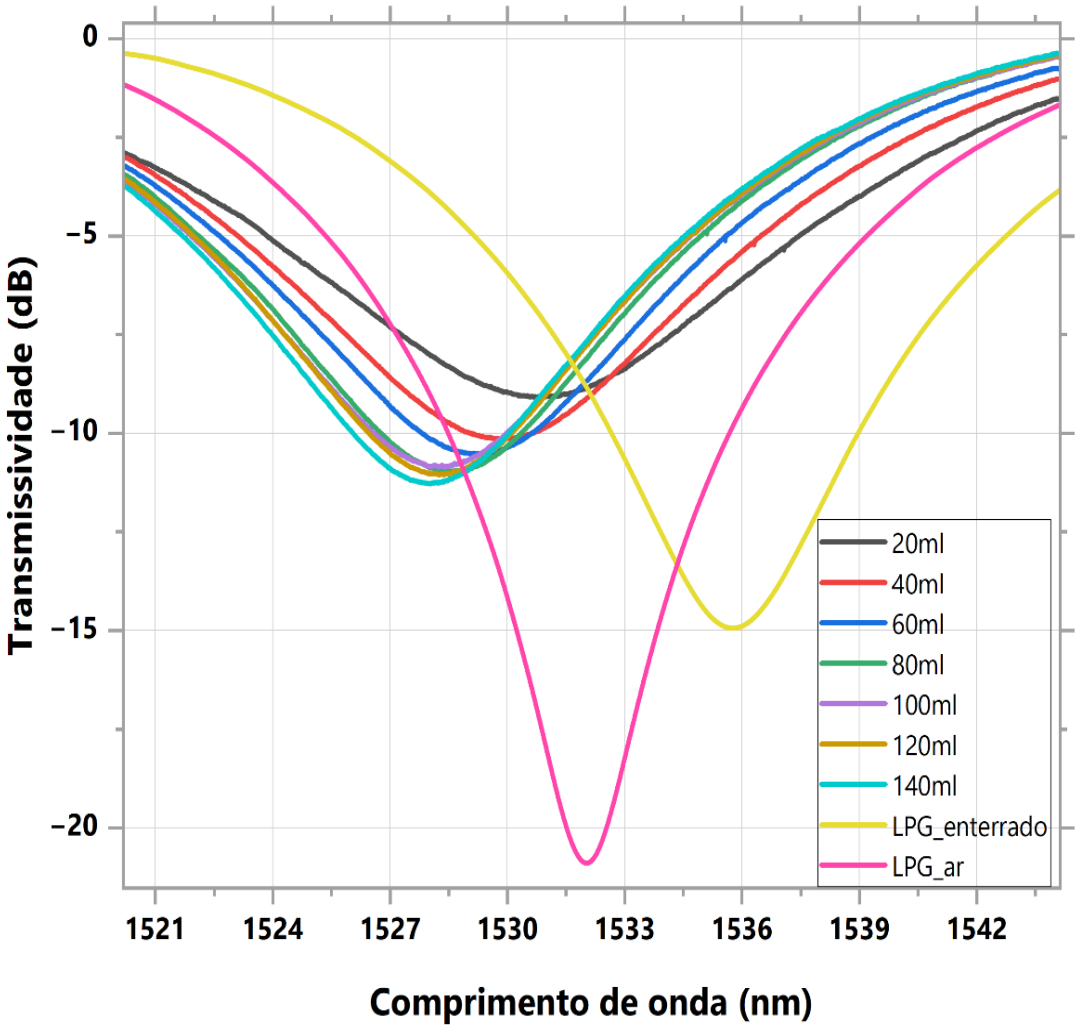


Figura 17- Espectros de transmissividade de um sensor LPG enterrado no solo para vários níveis de umidade.

Observa-se na Figura 17, que o aumento do volume de água desloca o comprimento de onda de ressonância para comprimentos de onda mais curtos, demostrando a sensibilidade do sensor às mudanças no índice de refração.

O resultado da interação entre a LPG e a umidade do solo de 0% a 18,67% sem a referência da LPG no ar.

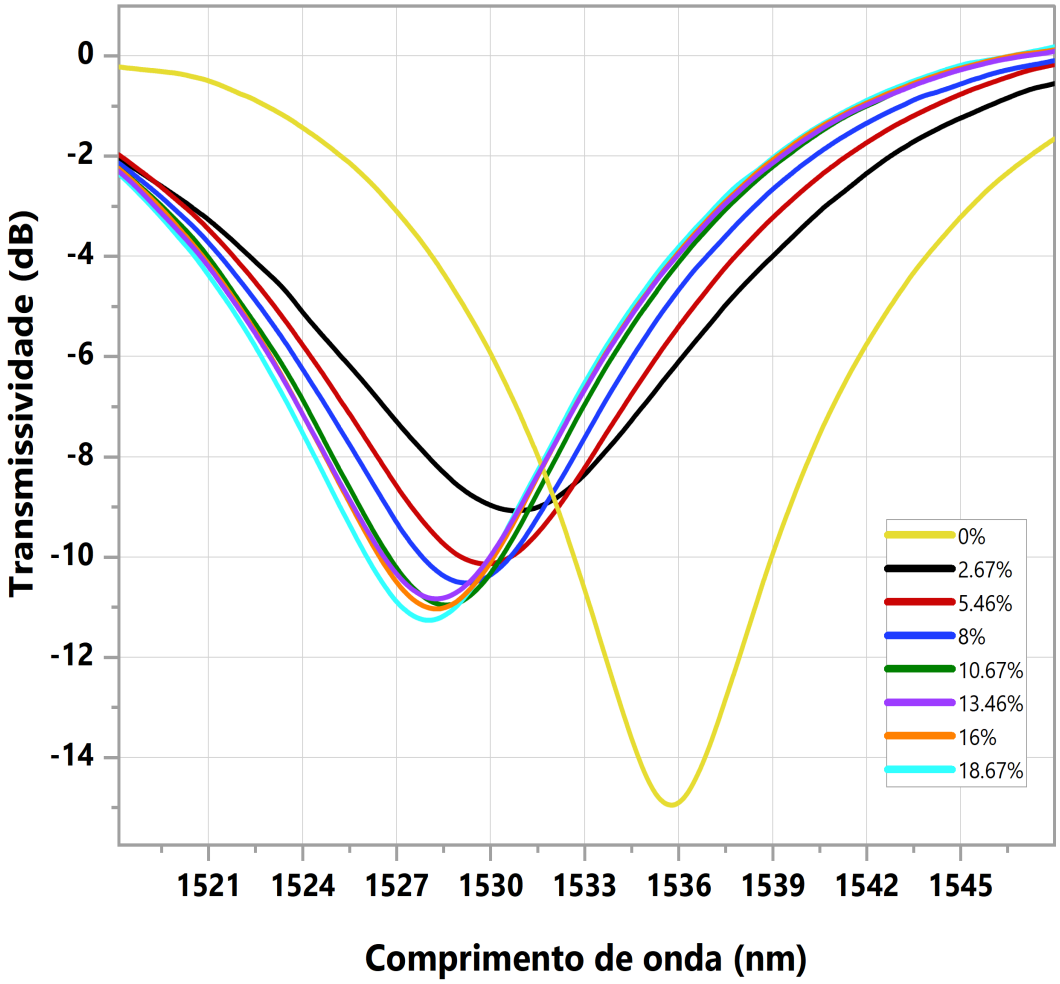


Figura 18- Espectros de transmissividade da LPG quando exposto a diferentes níveis de umidade do solo.

É evidente que o comprimento de onda de ressonância se move em direção à região de menor comprimento de onda. A LPG exibiu um total desvio à esquerda de aproximadamente 7,78 nm quando o meio circundante mudou do solo seco (0%) para solo úmido (18,67%).

4.2.1 Análise da reprodutibilidade do sensor

Para avançar no desenvolvimento do sensor LPG de umidade do solo, a relação entre a umidade do solo e a caracterização do sensor foi estabelecida. Para garantir a absorção de água consistente e uniforme em todo o solo, o sensor LPG foi enterrado dentro da amostra de solo substrato para plantio, e as medições foram realizadas em três intervalos específicos: 3 minutos, 6 minutos e 10 minutos após a adição de água em cada etapa. Esta abordagem foi projetada para eliminar possíveis inconsistências causadas pela distribuição não uniforme da água ou absorção incompleta, conforme mencionado no capítulo 3. Os espectros da transmissividade do sensor foram monitorados continuamente durante todo o processo. As Figuras 19 e 20 mostram a relação entre a transmissividade e o comprimento de onda para os três intervalos de aquisição de dados com volumes de água constantes de 80 ml e 140 ml.

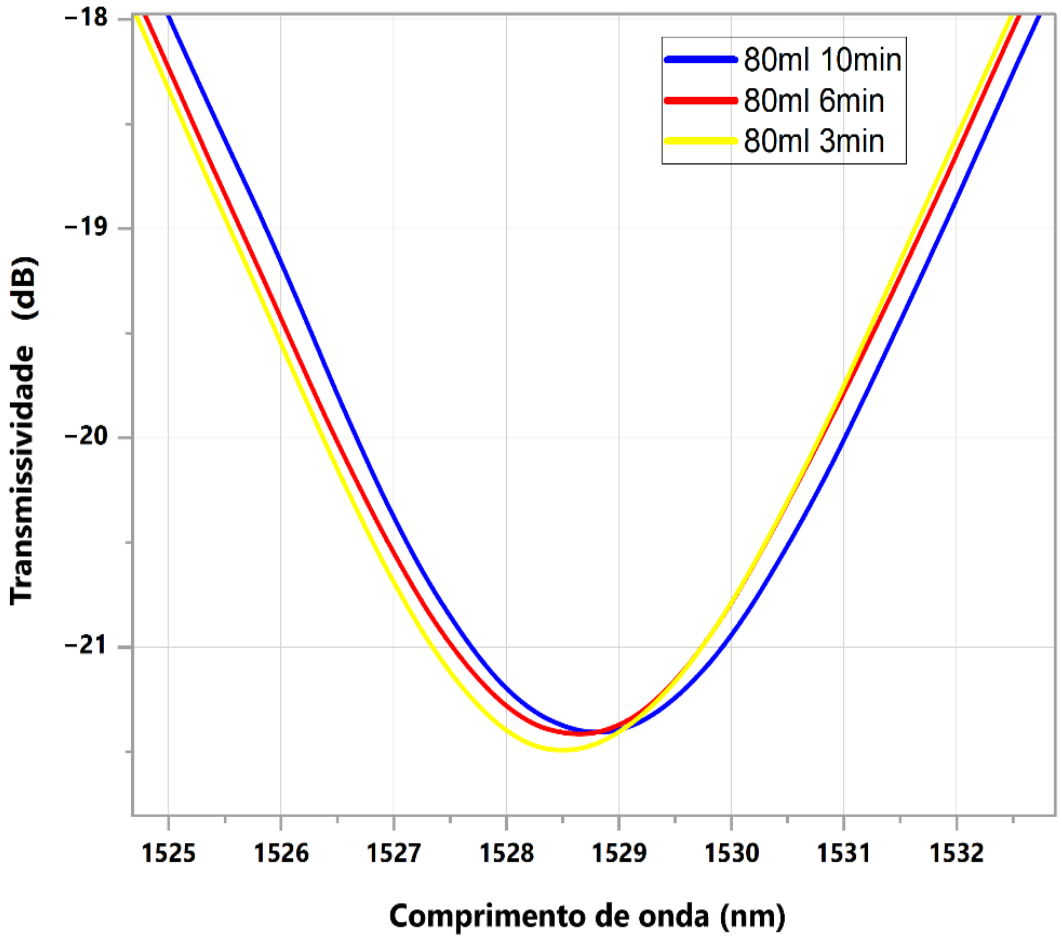


Figura 19 - Espectros de transmissividade do sensor LPG a um volume de água constante de 80 ml, com dados coletados em três intervalos de tempo diferentes.

A partir da Figura 19, observa-se que após 3 minutos, o comprimento de onda e a transmissividade foram registrados como aproximadamente 1528,5 nm e -21,5 dB, respectivamente. Conforme o tempo aumentou, uma mudança foi observada na marca de 10 minutos, com um comprimento de onda de 1528,8 nm e transmissividade de -21,4 dB, sugerindo a estabilização do sistema ao longo do tempo.

Da mesma forma, para um volume de água de 140 ml, a Figura 20, mostra que os tempos de exposição mais longos (10 minutos) resultaram em atenuação menor, com uma transmissividade de -21,52 dB em comparação com -21,63 dB após 3 minutos. Por sua estabilidade e consistência observadas, as medições feitas na marca de 10 minutos foram utilizadas durante todos os outros experimentos.

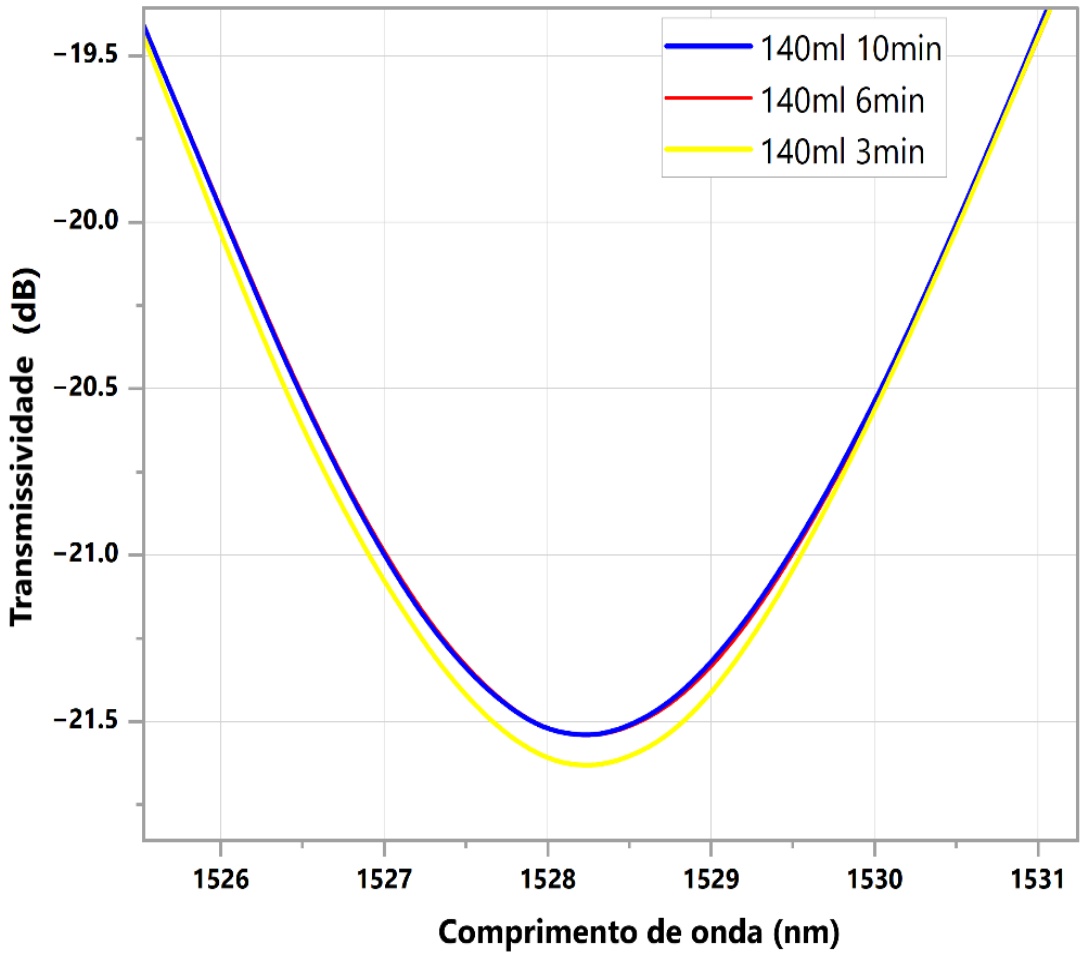


Figura 20- Espectros de transmissividade do sensor LPG a um volume de água de 140 ml, com dados coletados em três intervalos de tempo diferentes.

Para avaliar o desempenho do sensor e garantir sua reprodutibilidade, o experimento foi repetido quatro vezes sob condições idênticas. Os espectros de transmissividade desses testes repetidos são rotulados como: 1ºTESTE, 2ºTESTE, 3ºTESTE, 4ºTESTE.

O resultado do primeiro teste, apresentado na Figura 21, mostra que os comprimentos de onda ressonantes se deslocam para comprimentos de onda mais curtos conforme a umidade aumenta.

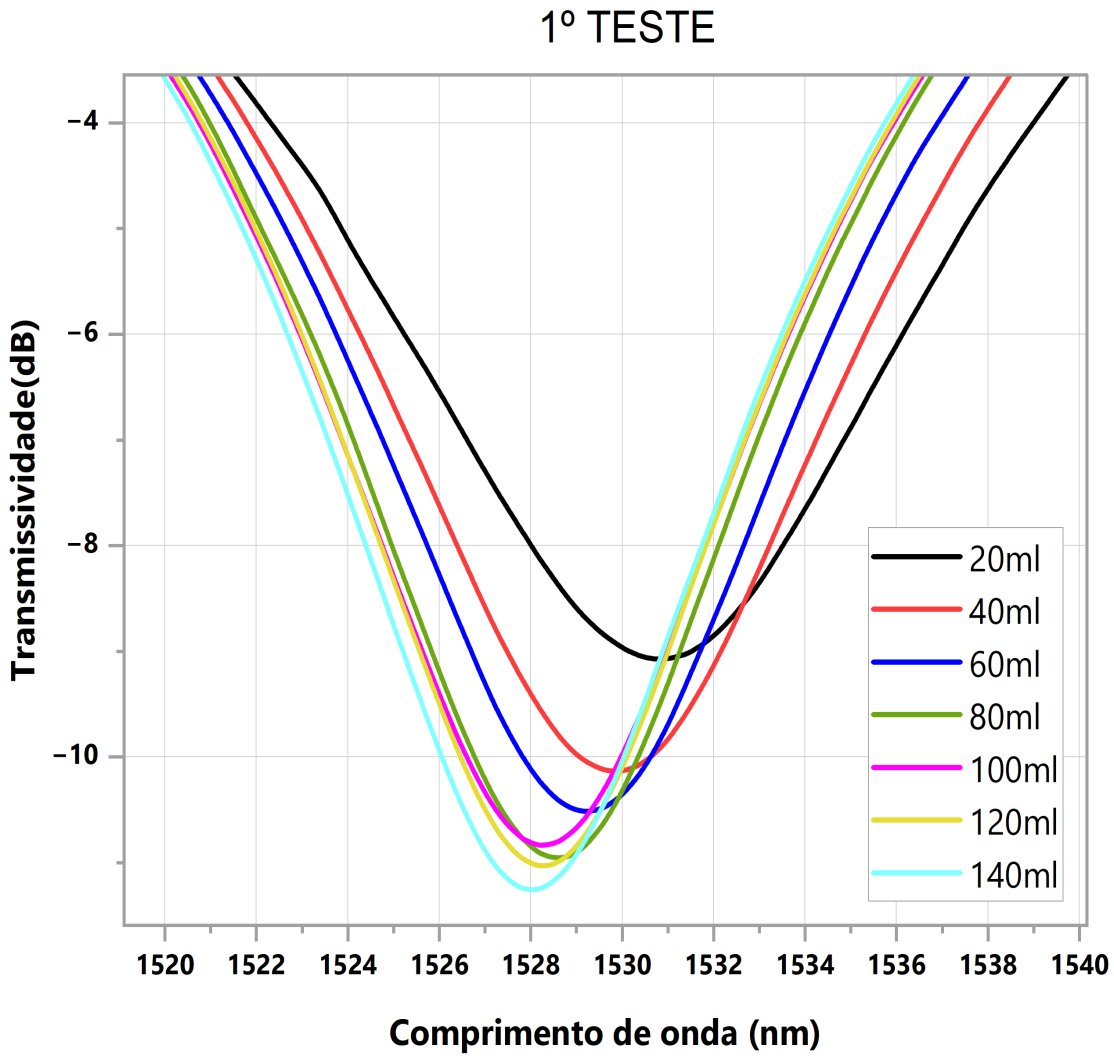


Figura 21- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20ml a 140 ml no primeiro experimento no laboratório.

Pode-se ver também que a profundidade da atenuação é maior para volumes mais altos, sendo mais pronunciada para o volume de 140 ml. Essa atenuação crescente é

devida ao efeito de tração na LPG (ENRIQUEZ, 2011). A consistência no deslocamento gradual para a direção esquerda com níveis crescentes de umidade valida a sensibilidade do sensor.

O resultado do segundo teste, apresentado na Figura 22, reforça essas observações com mudanças de comprimento de onda semelhantes às do primeiro teste. Embora os comprimentos de onda exatos na ressonância sejam pouco diferentes em comparação ao primeiro teste, o comportamento geral e a tendência permanecem consistentes. Essas pequenas diferenças podem ser atribuídas a fatores experimentais, incluindo variações na compactação do solo, distribuição de água ou flutuações mínimas da temperatura ambiente durante os períodos de medição.

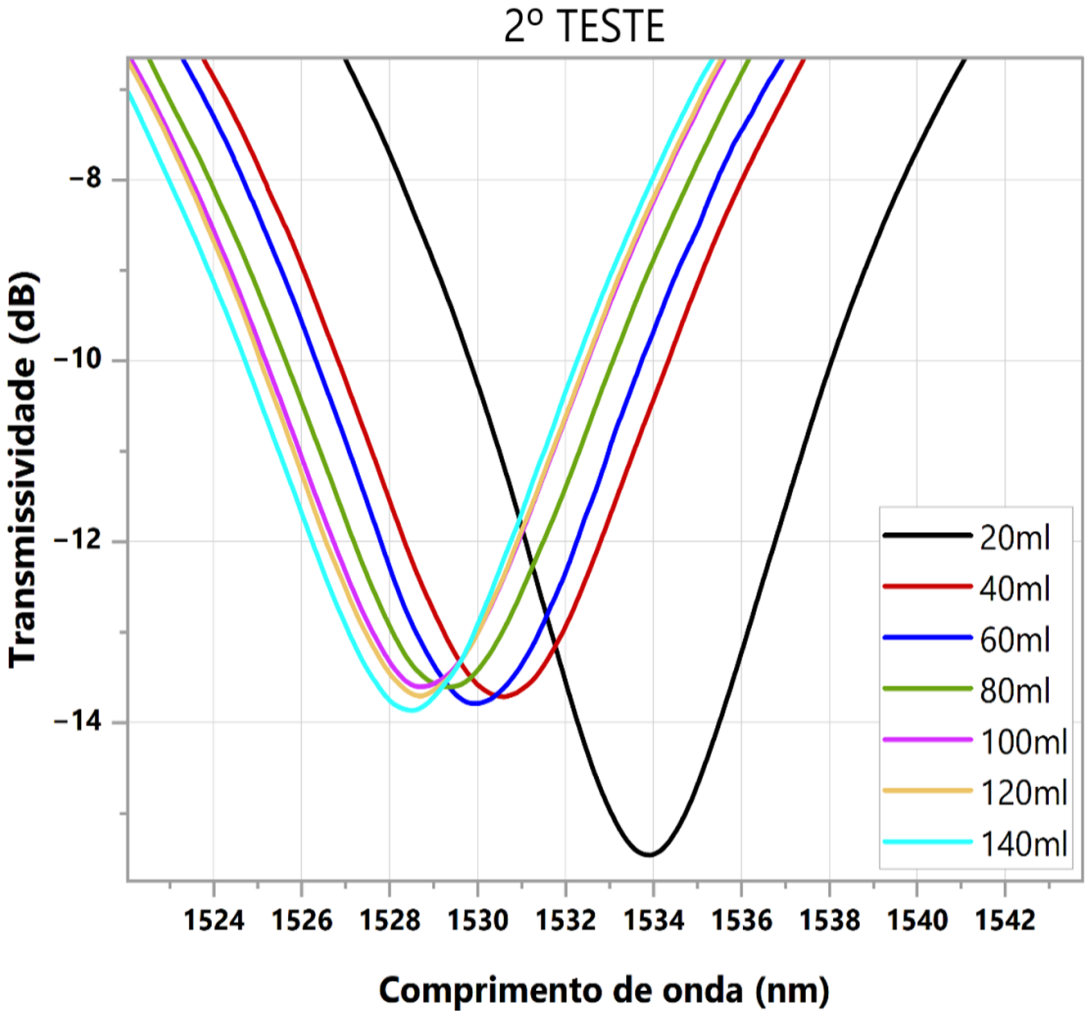


Figura 22- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20ml a 140 ml no segundo experimento no laboratório.

O segundo teste exibe atenuações na transmissão mais profundas em comparação ao primeiro teste, o que pode ser atribuído a tração causada pelo peso do solo na LPG, como citado anteriormente (ENRIQUEZ, 2011). Essa atenuação é bem evidente no espectro de transmissividade para o volume de 20 ml. Ao comparar os dois testes, observa-se que o comprimento de onda ressonante muda consistentemente para comprimentos de onda mais curtos com adições incrementais de umidade. As imagens rotuladas como "3º TESTE" e "4º TESTE" nas figuras 23 e 24 ilustram os resultados dos espectros de transmissividade do sensor LPG exposto a níveis de umidade variando de 20 ml a 140 ml utilizando a mesma configuração experimental e condições dos dois testes anteriores (1º e 2º TESTES).

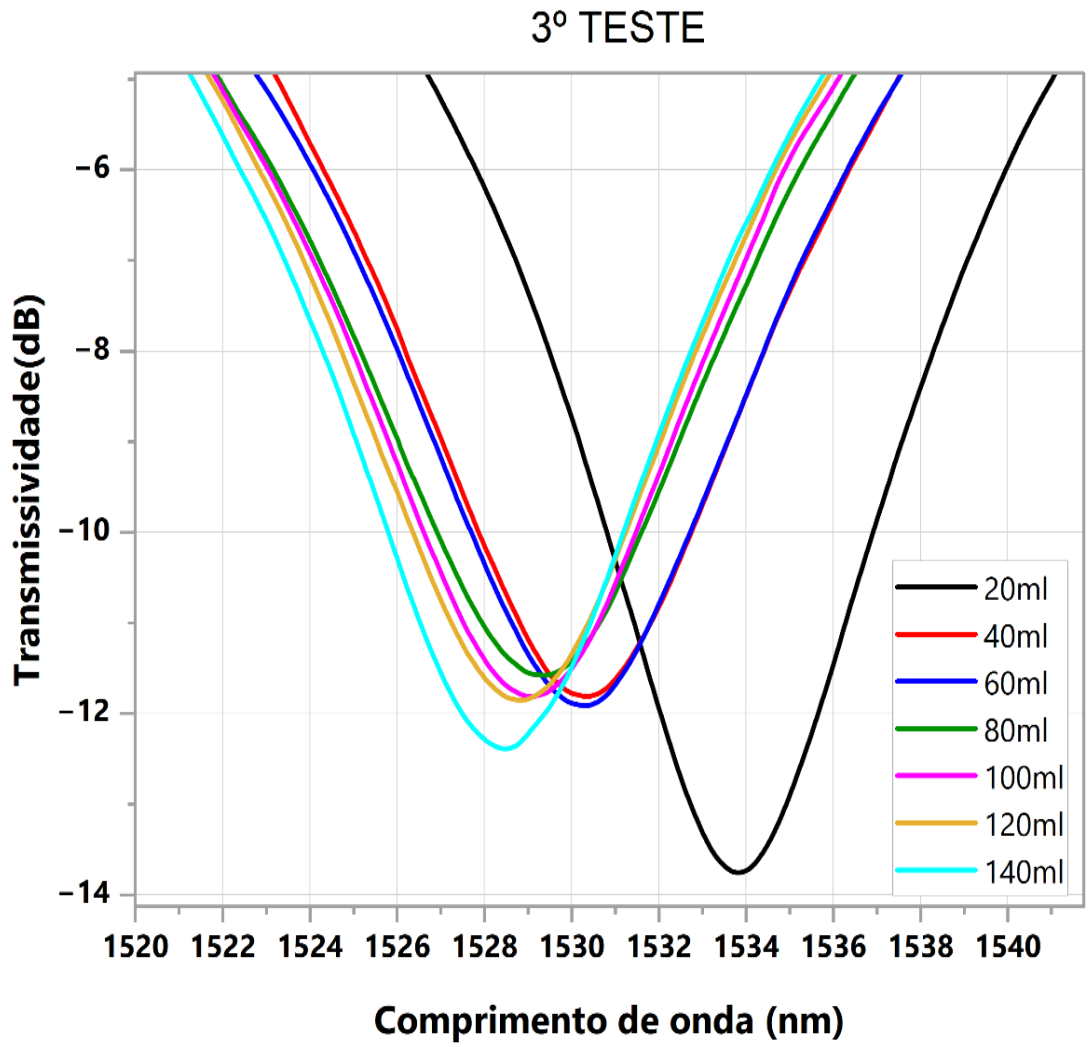


Figura 23- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20ml a 140 ml no terceiro experimento no laboratório.

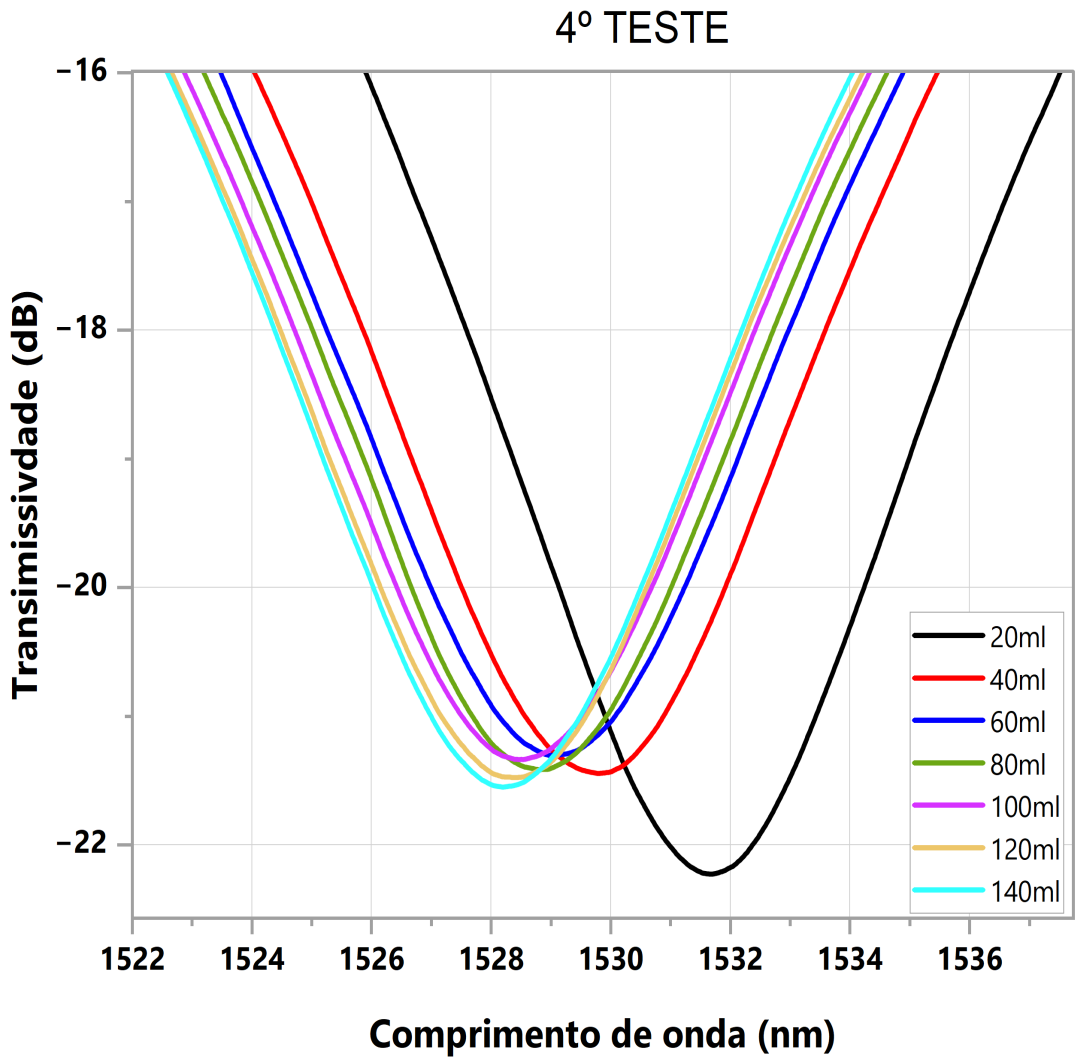


Figura 24- Espectro de transmissividade da LPG para volumes de água variando de 20ml a 140 ml no quarto experimento no laboratório.

É evidente das Figuras 23 e 24, que ambos os testes demonstraram a tendência esperada de mudança de comprimento de onda associada a variações na umidade do solo, com o aumento nos níveis da umidade causando consistentemente um *blueshift* no comprimento de onda ressonante. A similaridade no comportamento do sensor nesses quatro testes independentes afirma sua estabilidade operacional e adequação para o seu uso em condições de campo. Um resumo destes testes está apresentado na Tabela 1, detalhando as medições do comprimento de onda de ressonância em níveis de umidade incrementais para cada teste. Pode-se ver a comparação entre os resultados do deslocamento de comprimento de onda obtidos nos quatro testes.

Tabela 1- Valor do comprimento de onda nos quatro testes.

Umidade do solo (%)	Comprimento de onda (nm) 1º teste (30/10/2024)	Comprimento de onda (nm) 2º teste (6/11/2024)	Comprimento de onda (nm) 3º teste (13/11/2024)	Comprimento de onda (nm) 4º teste (24/11/2024)
0	1535,76	1534,92	1535,50	1534,59
2,67	1530,85	1533,70	1533,84	1531,65
5,47	1529,80	1531,06	1530,39	1529,82
8	1529,15	1530,25	1530,31	1529,08
10,67	1528,48	1529,55	1529,39	1528,84
13,47	1528,30	1528,95	1529,08	1528,51
16	1528,25	1528,57	1528,87	1528,31
18,67	1527,98	1528,40	1528,47	1528,09

4.2.2 Análise da sensibilidade

Apresenta-se na Figura 25, o resultado dos deslocamentos do comprimento de onda de ressonância em função da umidade do solo para os quatro testes utilizando o sensor LPG. Cada curva corresponde a um teste distinto, mostrando como o sensor respondeu ao aumento da umidade do solo. Durante toda a faixa de teste (0% a aproximadamente 18% de umidade do solo), o sensor apresentou uma sensibilidade média de cerca de 0,37 nm/%. Ao comparar com a literatura, o trabalho de Leone ***et al.*** (2015) relata sensores baseados em FBG com sensibilidade de 2,1 pm/%RH, ou seja, 0,0021 nm/%, o que é inferior ao valor obtido neste projeto (LEONE ***et al.,*** 2015). Isto mostra a vantagem dos sensores LPG em aplicações de alta sensibilidade sem a necessidade de materiais de revestimento adicionais.

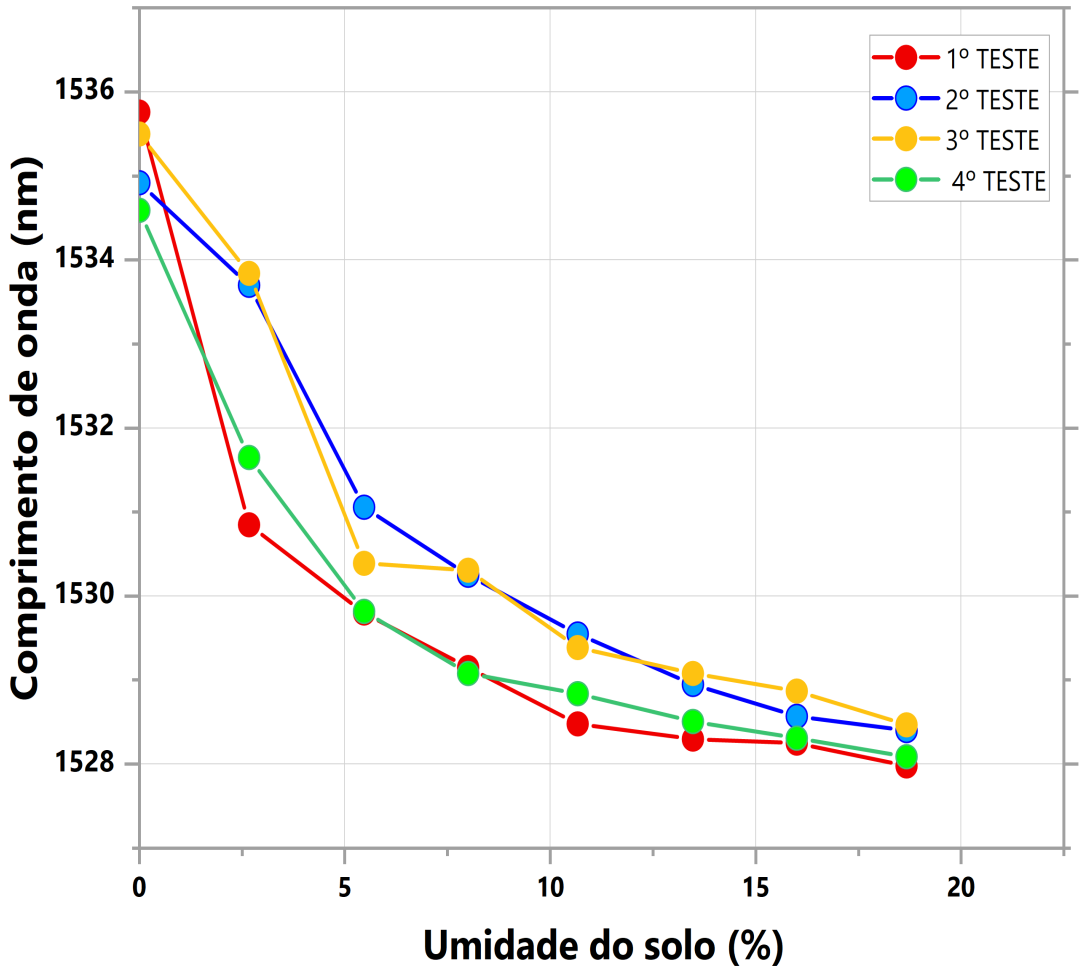


Figura 25- Relação entre a umidade do solo e a mudança de comprimento de onda ressonante em todos os quatro testes.

Em todos os testes, uma tendência decrescente e consistente é observada à medida que a umidade aumentou de 0% para 18,67%, com o comprimento de onda resonante do sensor LPG diminuindo de cerca de 1536 nm para aproximadamente 1528 nm. Observa-se que as curvas correspondentes ao 1º teste e ao 4º teste apresentam valores de comprimento de onda próximos em praticamente todos os níveis de umidade do solo. A magnitude de deslocamento do comprimento de onda em função do aumento da umidade do solo é muito similar entre esses dois testes. Pode-se ver que as curvas do 2º teste e do 3º teste também demonstram uma proximidade significativa nos valores de comprimento de onda para cada nível de umidade.

A relação entre o comprimento de onda ressonante do sensor LPG e a umidade do solo, representado como as mudanças médias de comprimento de onda derivadas dos quatro testes experimentais, está ilustrada na Figura 26. As barras de erro incluídas neste gráfico indicam o desvio-padrão observado em cada nível de umidade, fornecendo informações sobre a consistência e a confiabilidade experimental do sensor.

A variação representada pelas barras de erro diminui significativamente à medida que os níveis de umidade aumentam, indicando maior estabilidade e precisão da medição em umidades médias. Em contraste, uma maior variabilidade em níveis de umidade mais baixos pode refletir pequenas inconsistências experimentais como heterogeneidade na distribuição da umidade do solo. No entanto, o desvio-padrão permaneceu dentro de uma faixa aceitável, com o resultado mostrando uma margem de erro de $\pm 2{,}56\ \mathrm{nm}$. Isto confirma a confiabilidade e reprodutibilidade da configuração do sensor LPG.

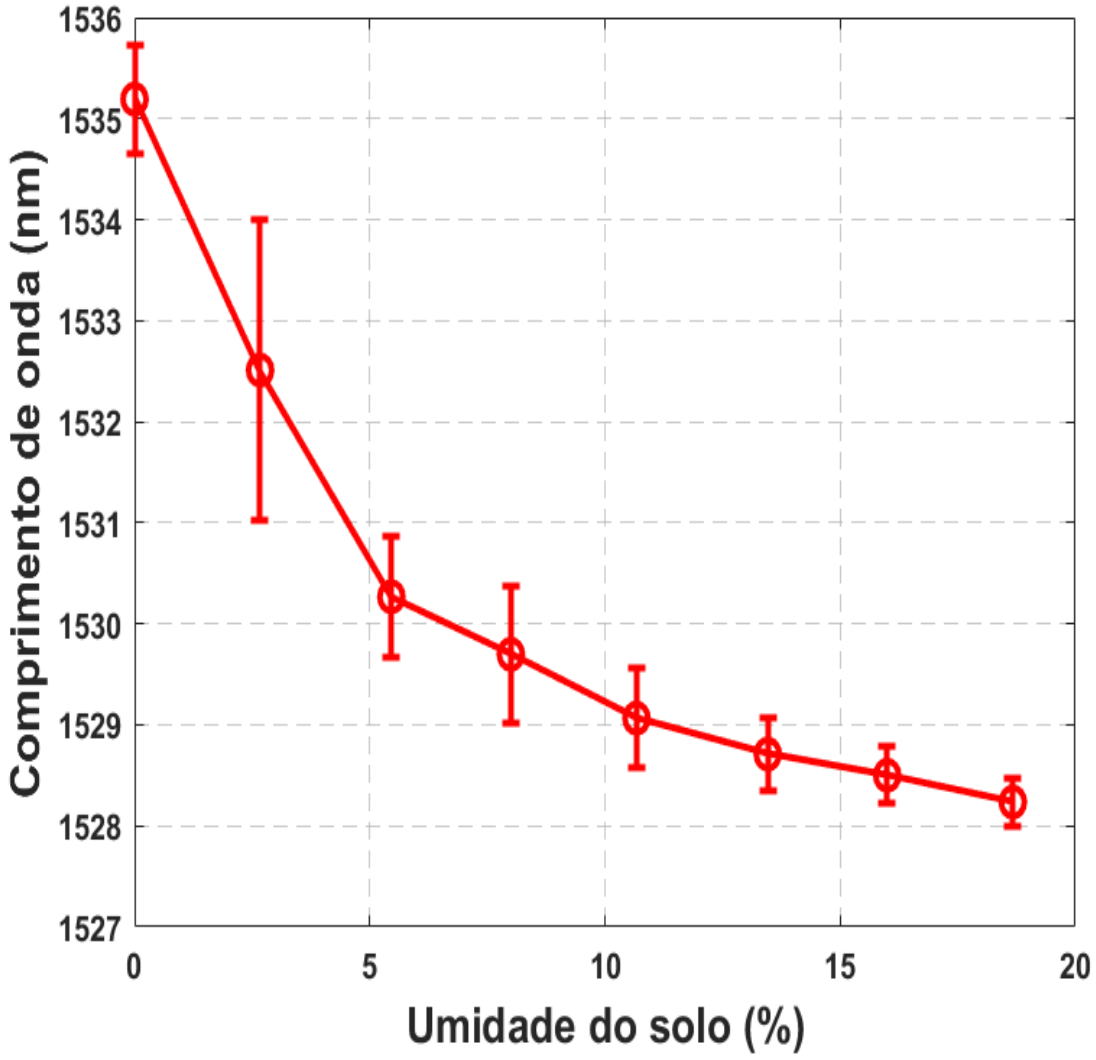


Figura 26- Valor médio e desvio-padrão do comprimento de onda para todos os quatro testes em função da umidade do solo.

Para investigar a sensibilidade e aplicação do sensor, um modelo exponencial foi aplicado aos dados plotados das medições médias de todos os quatro testes. Isto está apresentado na Figura 27.

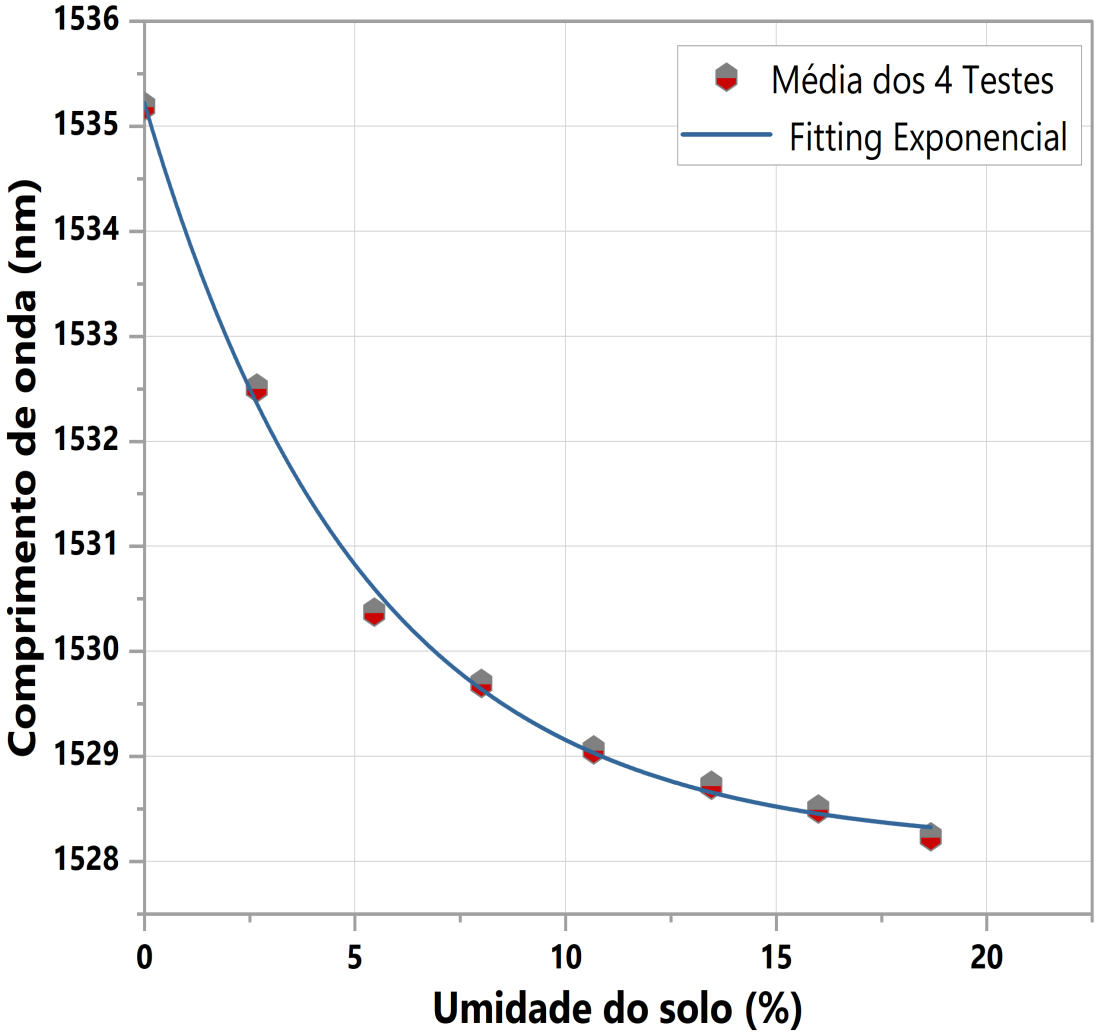


Figura 27- Valor médio de comprimento de onda em função da umidade do solo para o sensor LPG.

Conforme ilustrado na Figura 27, a análise estatística resultou em um valor de $R^2 = 0{,}998$, demonstrando uma correlação forte entre os dados experimentais. A análise de sensibilidade dos testes feitas no laboratório, indicaram que, em baixos níveis de umidade (menor do que 8%), o sensor LPG exibiu uma alta sensibilidade de -1,39 nm/%. No entanto, à medida que os níveis de umidade aumentaram para 10,67% e subsequentemente se aproximaram da saturação (18,67%), a sensibilidade diminuiu progressivamente para -0,18 nm/% e -0,04 nm/%, respectivamente.

Essa variação na sensibilidade do sensor em diferentes faixas de umidade é uma característica a ser considerada em suas aplicações práticas. A análise da sensibilidade do sensor indica que o sensor LPG possui uma característica de desempenho satisfatória em regiões de umidade mais baixas. Essa alta sensibilidade em baixos níveis de umidade o torna ideal para monitorar condições de seca ou para irrigação de precisão em solos mais secos. Isto também sugere que os sensores LPG podem ser calibrados para o monitoramento de umidade do solo em tempo real, uma vez que oferece capacidades de detecção sensíveis nesses níveis, tornando-o adequado no âmbito de agricultura, especificamente para a gestão de recursos hídricos e irrigação.

4.3 Comparação entre o resultado da simulação e do experimento

Apresenta-se na Figura 28, uma comparação direta entre os valores de comprimento de onda obtidos da simulação e e dos experimentos do sensor LPG de umidade do solo.

Observa-se uma concordância entre os valores experimentais e simulados ao longo da faixa completa de umidade do solo avaliada, demonstrando a validade do modelo teórico desenvolvido. Ambos os conjuntos de dados exibem um deslocamento para menores comprimentos de onda (*blue shift)* à medida que a umidade do solo aumenta. Pode-se ver que a sensibilidade observada em ambos diminui com o aumento da umidade do solo.

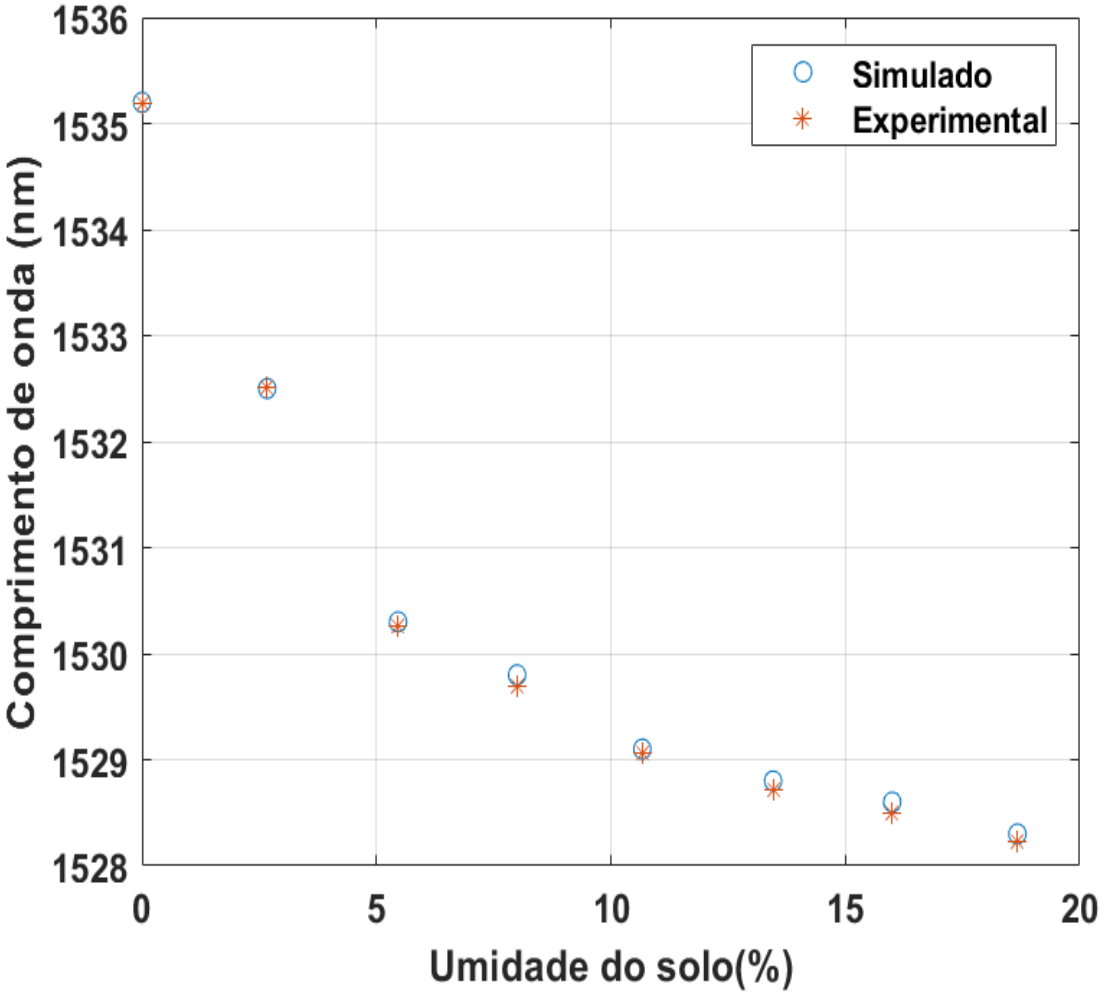


Figura 28- A comparação entre os valores de comprimento de onda obtidos da simulação e dos experimentos do sensor LPG de umidade do solo.

Mesmo em níveis mais elevados de umidade, as diferenças entre os valores experimentais e simulados são pequenas, ressaltando a precisão e confiabilidade do método da simulação adotado. Estes resultados reforçam a adequação do modelo proposto para aplicações práticas na agricultura de precisão, ao demonstrar sua capacidade de fornecer medições precisas e reprodutíveis da umidade do solo.

A Figura 29, mostra a comparação entre as curvas de sensibilidade obtidas por simulação (linha vermelha contínua) e experimentalmente (linha azul tracejada).

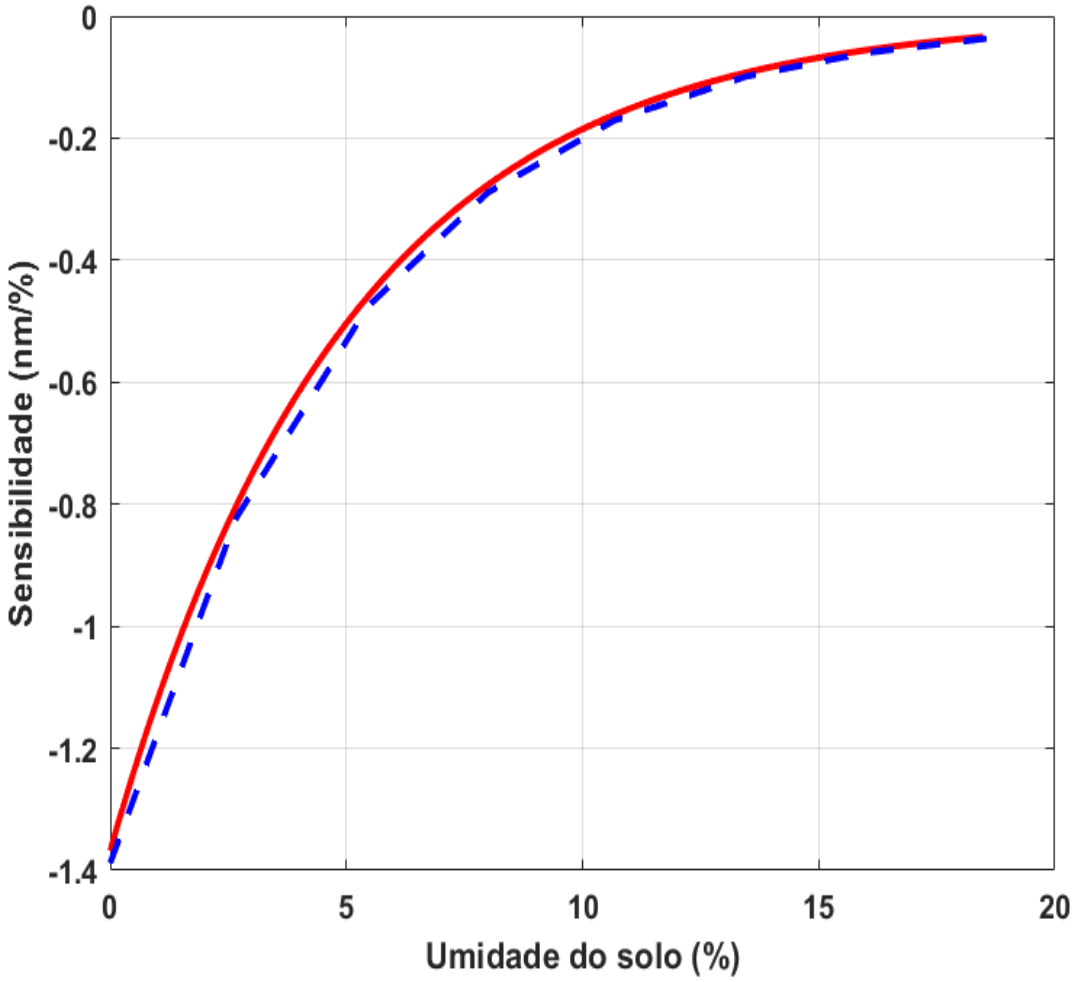


Figura 29- Comparação entre os valores da sensibilidade obtidos da simulação e do experimento utilizando o sensor LPG de umidade do solo.

Observa-se que ambas as curvas seguem a mesma tendência exponencial decrescente, evidenciando que a sensibilidade do sensor é maior em solos secos e diminui conforme a umidade aumenta. Pequenas diferenças (~0,01 nm/%), podem ser atribuídas a simplificações assumidas no modelo numérico ou a variações nas propriedades óticas do solo nos ensaios laboratoriais. No entanto, o resultado reforça a confiabilidade do sensor LPG e do método de modelagem para aplicações em agricultura de precisão.

5- CONCLUSÃO

Nesta dissertação, o objetivo principal foi projetar, desenvolver e validar um sensor ótico de umidade do solo utilizando Redes de Período Longo (LPG), visando contribuir para o avanço da agricultura, especialmente sob condições climáticas desafiadoras como as encontradas em Gana. A pesquisa foi motivada pela necessidade de um monitoramento preciso, contínuo e confiável dos níveis de umidade do solo. Métodos tradicionais, como sensores gravimétricos ou baseados em capacitância, são frequentemente limitados por sua natureza trabalhosa, tempos de resposta lentos e pelas complexidades envolvidas em sua calibração e manutenção.

O estudo começou com uma revisão dos princípios teóricos relevantes, incluindo difração ótica e teoria de modos acoplados, que forneceram a base necessária para entender e otimizar a operação do sensor LPG. Uma vantagem fundamental dos sensores LPG, conforme destacado nesta pesquisa, é sua sensibilidade intrínseca a variações no índice de refração do meio circundante à fibra. Ao contrário das Redes de Bragg em Fibra, que normalmente requerem revestimentos especiais ou métodos indiretos para medir a umidade, os sensores LPG detectam diretamente as mudanças no índice de refração causadas por variações na umidade do solo. Isso simplifica o projeto do sensor, reduz custos e torna a tecnologia mais adequada para o monitoramento agrícola em larga escala.

Simulações foram inicialmente conduzidas utilizando o *software* MATLAB para estabelecer expectativas teóricas para o desempenho do sensor. Os resultados dessas simulações revelaram uma correlação com os resultados experimentais subsequentes, confirmando efetivamente a precisão e a validade do modelo teórico. A análise de desempenho derivada dessas simulações feitas no MATLAB demonstrou uma sensibilidade máxima do sensor de aproximadamente – 1,38 nm/%. Esta sensibilidade destaca a capacidade do sensor de detectar pequenas mudanças na umidade, uma característica particularmente vantajosa para aplicações de agricultura de precisão que exigem um monitoramento meticuloso dos recursos hídricos.

Após as validações teóricas, a montagem experimental foi feita incorporando uma fonte de luz de banda larga, um analisador de espectro ótico para medições espectrais

precisas e um computador pessoal dedicado à aquisição e análise de dados. A fase de calibração empregou um método gravimétrico padrão, permitindo a medição e o controle precisos dos níveis de umidade nas amostras de solo. Observações experimentais confirmaram que aumentos incrementais na umidade do solo foram consistentemente acompanhados por deslocamentos no comprimento de onda de ressonância do sensor. O *blueshift* foi observado em resposta ao aumento da umidade, validando a sensibilidade do sensor a variações no índice de refração do meio circundante, causadas diretamente pelas mudanças na umidade do solo. A análise de desempenho do sensor derivada dos experimentos feitos no laboratório demonstrou uma sensibilidade máxima de aproximadamente –1,39 nm/%.

Para garantir consistência e reprodutibilidade, o experimento foi conduzido quatro vezes. Os resultados de todos os testes mostraram resultados consistentes, com discrepâncias atribuídas a pequenas diferenças nas condições experimentais, como distribuição não uniforme de água, temperatura ambiente ou a compactação do solo. Essa consistência reforçou ainda mais a confiabilidade e a adequação do sensor para implantação prática em ambientes agrícolas.

O estudo também identificou algumas limitações. Fatores como flutuações de temperatura e variações na composição do solo podem afetar a precisão do sensor. Portanto, pesquisas futuras devem abordar essas influências desenvolvendo técnicas de calibração adaptativas e métodos de compensação. Além disso, estender os testes de condições de laboratório para o campo em larga escala será necessário para avaliar completamente o desempenho do sensor em condições agrícolas reais.

Praticamente, o sensor baseado em LPG desenvolvido nesta pesquisa apresenta vantagens significativas, como imunidade à interferência eletromagnética e facilidade de integração em redes de sensores em larga escala. Essas características tornam os sensores LPGs altamente atraentes para a agricultura de precisão, oferecendo capacidades de monitoramento contínuo e preciso da umidade do solo. Com dados precisos, os agricultores podem otimizar as práticas de irrigação, melhorando a produtividade das culturas e promovendo o uso eficiente da água.

A principal contribuição deste trabalho reside na demonstração prática e teórica da viabilidade de um sensor LPG não revestido para detecção direta de umidade do solo.

O projeto do sensor é simples, mas mesmo assim apresentou um desempenho bom nos testes de laboratório. Isto mostra que pode ser usado de forma eficiente em situações reais em campo, especialmente em regiões de recursos limitados como Gana. Esta pesquisa, portanto, pode ser um passo na adaptação de tecnologias óticas para promover soluções acessíveis e eficazes para o monitoramento de umidade do solo na agricultura.

Em conclusão, esta dissertação demonstrou a viabilidade e os benefícios potenciais do uso de sensores óticos baseados em LPG para o monitoramento da umidade do solo. Através de análises teóricas, experimentação e simulações validadas, a pesquisa pode contribuir para os desenvolvimentos futuros em tecnologia de sensores agrícolas.

5.1 Trabalhos futuros

Os estudos apresentados nesta dissertação permitiram analisar as características e as sensibilidades da LPG para unidade do solo. Em função disto, podem-se apresentar alguns itens como proposta de trabalhos futuros:

- A validação extensiva em campo do sensor LPG sob condições agrícolas. Isto incluiria a implantação de sensores em diversos tipos de solo e condições climáticas para avaliar seu desempenho a longo prazo, durabilidade e confiabilidade fora de ambientes de laboratório controlados.
- Integração do sensor LPG com redes de sensores sem fio (WSN) e plataformas de Internet das Coisas (IoT). Esta integração permitiria o monitoramento remoto e contínuo da umidade do solo, facilitando a coleta de dados em grandes áreas agrícolas. Isso poderia levar a processos automatizados de tomada de decisão, otimizando estratégias de irrigação, reduzindo o desperdício de água e aumentando a produtividade geral das culturas.
- Conduzir simulações e medições experimentais utilizando sensores híbridos de FBG-LPG. Tais configurações híbridas permitiriam o monitoramento de parâmetros duplos, avaliando simultaneamente a umidade do solo juntamente com outros parâmetros críticos, como tração ou temperatura. Essa abordagem poderia aumentar a versatilidade e a aplicabilidade dos sensores de fibra ótica, permitindo

avaliações em tempo real das condições do solo, cruciais para a agricultura de precisão e o monitoramento ambiental.

- O sensor híbrido de FBG-LPG pode ser explorado como método adaptativo de calibração e compensação. Isto seria essencial para mitigar as influências potenciais de flutuações de temperatura, heterogeneidade do solo e variações de salinidade na precisão do sensor.

5.2 Publicações da Dissertação

1. Artigo apresentado e publicado no LAWOFS2024: Corsi Mawuli Atiglo, Maria Thereza M. Rocco Giraldi, e Maria Aparecida G. Martinez, “Development of an optical soil moisture sensor for agricultural applications”, Latin American Workshop on Optical Fiber Sensors – LAWOFS2024, Campinas, SP, 2024.

2. Artigo submetido ao Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications: Corsi Mawuli Atiglo, Maria Thereza M. Rocco Giraldi, e Maria Aparecida G. Martinez, “Study and development of a long-period grating as a soil moisture sensor for agricultural applications”, 2025.

Referências

ADEYEMI, O., GROVE, I., PEETS, S., ***et al.,*** "Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling." **Sensors,** v.18(10), pp. 3408, 2018.

AGRAWAL, G. P., **Nonlinear Fiber Optics**. New York: **Academic**, 1995.

ALPANA, S., HARSH, P., MAYANK, M., ***et al.,*** "Soil moisture estimation using gravimetric technique and FDR probe technique: a comparative analysis", **American International Journal of Research in Formal, Applied & Natural Sciences,** v. 14, pp. 89-92, 2014,

ALWIS, L., SUN, T., GRATTAN, K. T. V., "Optical fibre-based sensor technology for humidity and moisture measurement: review of recent progress," **Measurement**, v. 44(10), pp. 4052-4074, 2013.

ASSEH, A., SANDGREN, S., AHLFELDT, H., ***et al.,*** "Fiber optical Bragg grating refractometer." **Fiber and Integrated Optics**, v. 17(1), pp. 51-62, 1998.

AVRELLA, E. D., PAIM, L. P., TEDESCO, M. ***et al.,*** "Mineral soil as a component of substrate for plants." **Revista de Investigación Agraria y Ambiental**, v. 12, n.2, p. 85-98, 2021.

BHATIA, V. "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing." **Optics Express**, v. 4(11), pp. 457-466, 1999.

BHATIA, V., VENGSARKAR, A. M., "Optical fiber long-period grating sensors." **Optics Letters**., v. 21(9), pp. 692–694, 1996.

CAO, D., FANG, H., WANG, F., ***et al.,*** "A fiber Bragg-grating-based miniature sensor for the fast detection of soil moisture profiles in highway slopes and sub-redes" **Sensors**, v. 18(12), pp. 4431, 2018.

CAPUTO, H. P., CAPUTO, A. N. " Mecânica dos solos e suas aplicações", 7. Ed. Rio de Janeiro: **LTC,** 2017.

CHIANG, K. S., LIU, Y., NG, M. N., ***et al.,*** "Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index." **Electronics Letters**, v. 36(11), pp. 966-967, 2000.

CHEN, M. Q., ZHAO, Y., WEI H. M., ***et al.,*** "3D printed castle style Fabry-Perot microcavity on optical fiber tip as a highly sensitive humidity sensor", **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 328, pp. 123981, 2021.

CULSHAW, B., KERSEY, A., "Fiber-optic sensing: a historical perspective", **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 26 (9), pp. 1064 – 1078, 2008.

CUSANO, A., CUTOLO, A., ALBERT, J., "Fiber Bragg grating sensors: recent advancements, industrial applications and market exploitation." **Bentham Science Publishers**, v. 322, 2011.

D'AMATO, R., POLIMADEI, A., TERRANOVA, G., *et al*. "Humidity sensing by chitosan coated Fibre Bragg Gratings (FBG)" **Sensors**, v. 21(10), pp. 3348, 2021.

DANE, J. H., TOPP, G. C., "Methods of soil analysis: Part 4. Physical methods" **Soil Science Society of America**, v. 4 (5), pp. 1692, 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 052/94 – **Solos e agregados miúdos –determinação da umidade com emprego do "Speedy"**. DNER, 1994.

DONG, X., LI, T., LIU, D., ***et al.,*** "Polyvinyl alcohol-coated hybrid fiber grating for relative humidity sensing" **Journal of Biomedical Optics**, v. 16(7), pp. 077001, 2011.

ENRÍQUEZ . D., "Análise de sensores baseados em fibra ótica", Dissertação de Mestrado, **Instituto Militar de Engenharia**, 2011.

EIRA, C. J., "Estruturas sensoras em fibra ótica para monitorização ambiental baseadas em redes de período longo", Dissertação de Mestrado**, Departamento de Física Faculdade de Ciências da Universidade do Porto,** 2007.

FAO, "The future of food and agriculture – Trends and challenges" **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2017. Disponível em: http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf

ERDOGAN, T. "Fiber grating spectra" **Journal of Lightwave Technology**, v. 15(8), pp. 1277-1294, 1997.

GAMAGE, V. D. N., BISWAS, A., STRACHAN, I. B., ***et al.,*** "Soil water measurement using actively heated fiber optics at field scale" **Sensors,** v. 18(4), pp. 1116, 2018.

GANGWAR, R., KUMARI, S., PATHAK, A., ***et al.,*** "Optical fiber-based temperature sensors: a review", **Optics**, v. 4(1), pp. 171–197, 2023.

GHATAK, A. K. **Optics**, 1 ed., McGraw-Hill, Capitulo 27, 2010.

GUO, W., HOLMBERG, P., LAURELL, F., ***et al.,*** "Fabrication of long-period fiber gratings through periodic ablation using a focused CO2-laser beam." **Optical Materials Express**, v. 5(11), pp. 2702-2714, 2015.

HALLETT, J.S., PARTRIDGE, M., JAMES, S.W., ***et al.,*** "Soil moisture content measurement using optical fiber long period gratings." **25th International Conference on Optical Fiber Sensors**, v. 10323, pp. 24-28, 2017.

HILL, K.O., MELTZ, G. “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview.” **Journal of Lightwave Technology**, v. 15(8), pp. 1263–1276, 1997.

HONARKAR, H., BARIKANI, M., “Applications of biopolymers I: Chitosan”, **Chemical Monthly**, v. 140, pp. 1403–1420, 2009.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. Academic Press. 2003.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., ***et al.,*** “Fiber grating sensors”, **Journal of Lightwave Technology**, v. 15(8), pp. 1442-1463, 1997.

KOGELNIK. H., “Theory of optical waveguides”, **Guided-Wave Optoelectronics**, v. 26, 1990.

KOJIMA, Y., SHIGETA, R., MIYAMOTO, N., ***et al.,*** “Low-cost soil moisture profile probe using thin film capacitors and a capacitive touch sensor.” **Sensors**, v. 16(8), pp. 1292, 2016.

LAYLOR, M. H., CALVERT, S., TAYLOR, T., ***et al.,*** “Fiber optic grating moisture and humidity sensors”, **Smart Structures and Materials**, v. 4694, 2002.

LEONE, M., CONSALES, M., LAUDATI, A., ***et al.,*** “Fiber optic thermo-hygrometers for soil moisture and temperature measurements”, **Sensors**, v. 17(6), pp. 96342P, 2015.

LEONE, M., PRINCIPE S., CONSALES, M., ***et al.,*** “Fiber optic thermo-hygrometers for soil moisture and temperature measurements”, **Sensors**, v. 17(6), pp. 1451, 2017.

MATHEWS, C. B., LIBISH, T. M., BISWAS, P., ***et al.,*** “A chitosan coated fiber optic long period grating biosensor for the detection and estimation of cholesterol”, **12th International Conference on Fiber Optics and Photonics (Photonics),** n. S5A.22, 2014.

MINARDO, A., ZENI, L., COSCETTA, A., ***et al.,*** "Distributed optical fiber sensor applications in geotechnical monitoring." **Sensors,** v. 21(22), pp. 7514, 2021.

NCHANJI, E. B., "Sustainable urban agriculture in Ghana: What governance system works*?"* **Sustainability***,* v. 9(11), pp. 2090, 2017.

PATRICK, H.J., KERSEY, A.D., BUCHOLTZ, F. "Analysis of the response of long period fiber gratings to external index of refraction." **Journal of Lightwave Technology**., v. 16(9), pp. 1606–1612, 1998.

RAO, Y. J., "In-fiber Bragg grating sensors," **Measurement Science and Technology**, v. 8(4), pp. 355–375, 1997.

RAO, Y. J., "Recent progress in applications of in-fiber Bragg grating sensors." **Optics and Lasers in Engineering**, v. 47(11), pp. 1141-1146, 2009.

RASHEED MW, TANG J, SARWAR A, ***et al.,*** "Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review." **Sustainability,** v. 14(18), pp. 11538, 2022.

REYNOLDS, S. G., "The gravimetric method of soil moisture determination Part I A study of equipment and methodological problems" **Journal of Hydrology** v. 11(3), pp 258-273, 1970.

SCHAFER, G., LERNER, B.L., "Physical and chemical characteristics and analysis of plant substrate." **Ornamental Horticulture**, v.29, n.2, pp.191-192, 2022.

SCHAFER, G, SOUZA, P.V.D., FIOR, C.S. "An overview of the physical and chemical properties of substrates used in horticulture at southern Brazil." **Ornamental Horticulture**, v. 21, n.3, pp.299-306, 2015.

SINGH, A., "long period fiber grating based refractive index sensor with enhanced sensitivity using Michelson interferometric arrangement," **Photonic Sensors**, v. 5(2), pp. 172–179, 2015.

SMIETANA. M., KOBA. M., MIKULIC. P., ***et al.,*** "Towards refractive index sensitivity of long-period gratings at level of tens of μm per refractive index unit: fiber cladding etching and nano-coating deposition", **Optics Express**, v. 24, issue 11, pp. 11897, 2016.

SU, D., QIAO, X., RONG, Q., *et al*. "A fiber Fabry-Perot interferometer based on a PVA coating for humidity measurement", **Optics Communications**, v. 311, pp.107-110, 2013.

TOPP, G.C., DAVIS, J.L., ANNAN, A.P. "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines", **Water Resource Research**, v. 16, pp. 574-582, 1980.

UDD, E., SCHULZ, W. L. and SEIM, J. M. "Advanced fiber optic sensors capable of multi parameter sensing." **Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE Proceedings)**, v. 3489, pp. 66, 1998.

URRUTIA, A., GOICOECHEA, J., ARREGUI, F. J., "Optical fiber sensors based on nanoparticle-embedded coatings", **Journal of Sensors**, v. 2015, 2015.

VAN BRAKEL, A., SWART, P.L. "Temperature-compensated optical fiber Michelson refractometer." **Optical Engineering**, v. 44(2), pp. 020504, 2005.

VENGSARKAR, A. M., LEMAIRE, P. J., BHATIA, V., ***et al.,*** "Long-period fiber gratings as band-rejection filters." **Journal of Lightwave Technology**., v. 14(1), pp. 58–64, 1996.

WANG, H., GAO, S., YUE, X., ***et al.,*** "Humidity-sensitive PMMA fiber Bragg grating sensor probe for soil temperature and moisture measurement based on its intrinsic water affinity." **Sensors**, v. 21(21), pp. 6946, 2021.

WANG, Y., LIU, Y., ZOU, F., ***et al.,*** "Humidity sensor based on a long-period fiber Grating Coated with Polymer Composite Film", **Sensors**, v. 19, pp. 2263, 2019.

WANG, Y., SHEN, C., LOU, W., ***et al.,*** "Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film", **Optics Communications**, v. 372, pp.229-234, 2016.

YEO, T. L., SUN, T., GRATTAN, K. T. V., ***et al.,*** "Characterization of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing." **Sensors and Actuators B: Chemical,** v.110(1), pp 148-156, 2005.

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

ZHAO, Y., WANG, Y., WANG, L., ***et al.,*** "Exploring the role of land restoration in the spatial patterns of deep soil water at watershed scale". **Catena, v.**172, pp. 387–396, 2019.

ZHOU, W., RAN, Y., YAN, Z., ***et al.,*** "Sensitivity characterization of cascaded long-period gratings operating near the phase-matching turning point.", **Sensors**, v. 20(21), pp. 5978, 2020.

ZOU, F., LIU, Y., DENG, C., ***et al.,*** "Refractive index sensitivity of nano-film coated long-period fiber gratings", **Optics Express**, v. 23(2), pp. 1114, 2015.

ANEXO A

A. Simulação do sensor LPG para medição de umidade do solo

A simulação do sensor baseado em redes de período longo (LPG) para detecção da umidade do solo foi realizado com o objetivo de prever seu comportamento espectral diante de variações no índice de refração externo, que muda conforme a umidade no solo aumenta. Para isso, utilizou-se o *software* MATLAB, que permitiu implementar modelos teóricos baseados na equação de acoplamento dos modos de uma LPG.

Inicialmente, foram definidos os parâmetros estruturais da fibra ótica incluíndo o raio da casca $r_C = 62{,}5\,\mu m$, comprimento de onda ressonante inicial $\lambda_r = 1535{,}19$ nm, comprimento da rede $L = 0{,}03\,m$, período da LPG $\Lambda = 660\,\mu m$, índice de refração do núcleo de $n_{co} = 1{,}45$, a m-ésima raiz da função de Bessel de 1ª espécie em ordem zero u_∞ =8,6537 e o coeficiente de acoplamento $\kappa = \pi/2$.

A simulação levou em conta o princípio de que o comprimento de onda de ressonância de uma LPG depende diretamente da diferença entre os índices efetivos do modo do núcleo e dos modos da casca. Como o índice de refração do meio externo ao sensor varia com o conteúdo de água presente no solo, essa variação impacta o acoplamento modal, resultando em deslocamentos espectrais no comprimento de onda de ressonância. Para modelar esse efeito, foram utilizados valores crescentes de índice de refração externo, calculados a partir de dados experimentais coletados correlacionando a umidade do solo (%) ao redor da fibra.

A equação da transmissividade da LPG é utilizada para calcular a transmissividade espectral e o deslocamento do comprimento de onda ressonante ao longo de um intervalo de comprimentos de onda entre 1520 nm e 1580 nm. A simulação foi realizada para diferentes valores de índice de refração, e a resposta espectral resultante apresentou o esperado deslocamento no comprimento de onda central da atenuação para valores menores *(blueshift*), indicando maior sensibilidade em solos secos. Os resultados revelaram um comportamento coerente com a teoria e com dados experimentais disponíveis, com sensibilidade simulada máxima de aproximadamente –1,38 nm/% em baixos níveis de umidade.

B. Fluxograma da simulação do sensor LPG

