

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL**

DIEGO FERNANDES

**MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO E DA
TEMPERATURA UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRAS
MULTIMODO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2017

DIEGO FERNANDES

**MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO E DA
TEMPERATURA UTILIZANDO REDES DE BRAGG EM FIBRAS
MULTIMODO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi

Co-orientadora: Prof. Dra. Andreia Gerniski Macedo

CURITIBA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Fernandes, Diego
F363m Medição simultânea do índice de refração e da
temperatura
2017 utilizando redes de Bragg em fibras multimodo / Diego
Fernandes.-- 2017.
63 f. : il. ; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Disponível também via World Wide Web
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica -
e Informática Industrial, Curitiba, 2017
Bibliografia: f. 61-63

1. Redes de Bragg. 2. Fibras ópticas. 3. Refração. 4.
Detectores. 5. Temperatura – Índices. 6. Engenharia elétrica -
Dissertações. I. Kamikawachi, Ricardo Canute. II. Macedo,
Andreia Gerniski. III. Título.

CDD: Ed. 22 – 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Dissertação Nº. _____

Medição Simultânea do Índice de Refração e da Temperatura Utilizando Redes de Bragg em Fibras Óticas Multimodo

por

Diego Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi (UTFPR)

Corientadora: Prof^a. Dr^a. Andreia Gerniski Macedo (UTFPR)

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: **FOTÔNICA EM ENGENHARIA** do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 15 de fevereiro 2017. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores doutores:

Prof. Dr. Ricardo Canute Kamikawachi
(Presidente – UTFPR)

Prof. Dr. César Augusto Dartora
(UFPR)

Prof. Dr. Jean Carlos Cardozo da Silva
(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo incondicional apoio desde o meu nascimento, e à minha noiva Juliana Gobi Schmitz, que colaborou constantemente com muito amor e incentivo.

AGRADECIMENTOS

“Quem vem das alturas está acima de todos; aquele que vem da terra é terrestre e fala da terra; quem veio do céu está acima de todos.” - Jo 3:31.

Portanto, agradeço a Deus acima de tudo e de todos, pela oportunidade de ser por Ele escolhido e capacitado.

"Honra teu pai e tua mãe, a fim de que tenhas vida longa na terra que o Senhor, o teu Deus, te dá." - Ex 20:12.

Aos meus pais, por cuidarem de cada um dos meus passos e lutarem comigo pelos meus sonhos.

“Aquele que não ama não conhece a Deus, pois Deus é amor” - 1 Jo 4:8.

Ao lado de um grande homem normalmente há uma magnífica mulher e é por isso que agradeço à minha noiva Juliana Gobi Schmitz, que me motivou através de seu amor para que eu pudesse finalizar esta importante fase de minha vida.

Aos meus amigos e colegas Rosangela Winter, Raquel de Paiva Corotti e Jean Filipe Kuhne, por todo apoio e assistência prestados.

Ao professor Ricardo Canute Kamikawachi, que me repassou parte dos seus conhecimentos e com sua orientação pudemos desenvolver um bom trabalho.

Àqueles professores que se dedicam de fato ao seu mais rico mérito que é o de transmitir conhecimentos, com amor e vontade, principalmente. Junto com eles aos demais colegas que me acompanharam na minha jornada durante o mestrado.

Aos meus demais amigos, que mesmo sem vínculo com a UTFPR, estão sempre colaborando para minha evolução.

A UTFPR e ao CPGEI pelas instalações e equipamentos cedidos para realização dos estudos relatados neste trabalho.

A CAPES, pela concessão de bolsa e apoio financeiro a este projeto, e aos demais órgãos de fomento pelo apoio à produção científica no Brasil.

A crise é a melhor benção que pode acontecer a pessoas e países, porque a crise traz progresso, a criatividade nasce da angústia e o dia lindo vem do ventre da tempestade escura.

É na crise que surge a invenção, a descoberta, a reflexão e as grandes estratégias do “marketing” do amor.

Quem supera a crise, supera a si mesmo, sem ficar superado.

E quem pendura no gancho da crise seus fracassos e lamúrias, violenta seu próprio talento e tem mais respeito a problemas que soluções.

A crise é uma farsa, a não ser a crise de incompetência, pois o problema de pessoas e países é de autogerência.

Sem crises não há desafios, sem desafios, a vida é rotina que chama o túmulo. Sem crise ninguém tem méritos.

É só na crise que você mostra que é bom, pois sem crise todo vento é carícia.

Por isso, falar da crise é promovê-la e calar na crise é exaltar o conformismo.

Em vez disso, trabalhe duro, desinflatione a crise de você mesmo e acabe de uma vez com a única crise ameaçadora que é a da tragédia de não saber por onde começar. (Maurício Góis, 1983)

RESUMO

FERNANDES, Diego. **Medição simultânea do índice de refração e da temperatura utilizando redes de Bragg em fibras multimodo.** 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Neste trabalho são apresentados os resultados experimentais para medidas simultâneas de índice de refração e da temperatura, com a utilização de uma rede de Bragg gravada em fibra multimodo corroída (EMFBGs). Foram trabalhados com os três modos de propagação restantes após a corrosão da fibra, utilizando as variações dos comprimentos de onda de Bragg destes modos para encontrar o índice de refração e/ou a temperatura. Durante os procedimentos experimentais foram observadas as influências que a variação do índice de refração tem sobre a sensibilidade térmica, bem como as que a variação de temperatura causa na sensibilidade da rede ao índice de refração. A resposta do dispositivo as variações desses parâmetros foram aproximadas por superfícies planas e as sensibilidades cruzadas foram utilizadas para corrigir a aproximação. Os resultados mostram que é possível determinar os valores de índice de refração em uma faixa de 1,33 até 1,46 com um erro da ordem de 10^{-3} .

Palavras-chave: Redes de Bragg em fibras óticas corroídas. Fibras óticas multimodo. Sensor ótico. Sensor multiparâmetro. Medição de índice de refração e temperatura.

ABSTRACT

FERNANDES, Diego. **Simultaneous measurement of refractive index and temperature using Etched Multimode Fiber Bragg Grating**. 2017. 62 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

In this work the experimental results are presented applying simultaneous refractive index and temperature measures, with an Etched Multimode Fiber Bragg Grating (EMFBGs). After the fiber corrosion, the three remaining propagation modes were used to the work, utilizing variations of the Bragg wavelengths of those modes to find the refractive index and/or temperature. During the experimental procedures the influences of the refractive index variation has on the thermal sensitivity were observed, as well as what the temperature variation causes in the sensitivity of the network to the index of refraction. The device response to the variations of those parameters were approximated by flat surfaces and the cross-sensitivities were used to correct the approximation. The results show that it is possible to determine the refractive index values in a range of 1.33 to 1.45 with an error of the order of 10^{-3} .

Keywords: *Etched Fiber Bragg Grating*. Multimode optical fibers. Optical sensor. Multi-parameter sensor. Measurement of refractive index and temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Representação de uma rede de Bragg em fibra multimodo; (b) Espectros incidente, transmitido e refletido.	23
Figura 2 - Esquema do perfil do campo elétrico propagante para os modos 0, 1 e 2 e suas porções de campo elétrico evanescente.	26
Figura 3 - Estudo do coeficiente b da função hiperbólica de ajuste.	27
Figura 4 - Estudo do coeficiente c da função hiperbólica de ajuste.	28
Figura 5 - Estudo do coeficiente a da função hiperbólica de ajuste.	29
Figura 6 - Gráficos de funções que melhor representam as curvas de caracterização, com coeficientes para o conjunto de valores iniciais dos ajustes dos valores experimentais encontrados.	30
Figura 7: Processo de corrosão da fibra em ácido fluorídrico.	34
Figura 8 - Imagem da fibra corroída obtida em um microscópio. O seu diâmetro medido foi de 18,73 μm	35
Figura 9 - Rede sensora em um tubo de ensaio mergulhado no banho térmico.	36
Figura 10 - Índice de refração em função da concentração de glicerina em água em cada uma das temperaturas adotadas, já com a aproximação a um polinômio do segundo grau.	38
Figura 11 - Índice de refração de cada uma das amostras em função da temperatura.	39
Figura 12 - Espectro de reflexão adquirido a partir de uma rede de Bragg gravada em uma fibra multimodo após o processo de corrosão, em água a uma temperatura de 22 $^{\circ}\text{C}$	40
Figura 13 - Comprimento de onda de cada um dos modos encontrados em função do índice de refração, com temperatura de $22 \pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$	41
Figura 14 - Sensibilidade da rede ao índice de refração quando a temperatura é de $22 \pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$	42
Figura 15 - Separação entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3 e a aproximação para uma hipérbole.	43
Figura 16 - Sensibilidade ao índice de refração da diferença entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3, quando a temperatura é constante em $22 \pm 0,5$ $^{\circ}\text{C}$	43
Figura 17 - Resolução do sensor utilizando a variação entre os modos 1 e 3.	44

Figura 18 - Comprimento de onda dos dois primeiros modos do sensor, em diferentes temperaturas.....	45
Figura 19 - Diferença entre os comprimentos de onda para o modo 2 em função de índice de refração e temperatura.....	46
Figura 20 - Sensibilidade do modo 2 em relação com o índice de refração e temperatura.....	47
Figura 21 - A diferença entre as posições dos picos de modo 2 e modo 1 em relação à índice de refração e temperatura.....	47
Figura 22 - Sensibilidade da FBG ao índice de refração em função da temperatura.....	48
Figura 23 - Diferença entre o comprimento de onda do primeiro e segundo modos em função da temperatura, para as diferentes amostras de água e glicerina.....	49
Figura 24 - Sensibilidade térmica da FBG em função do índice de refração.	50
Figura 25 - Planificação do primeiro modo da fibra, sendo o índice de refração uma função do comprimento de onda λ_1 e da temperatura.	52
Figura 26 - Planificação do segundo modo da fibra, sendo o índice de refração uma função do comprimento de onda λ_2 e da temperatura.....	53
Figura 27 - Valores medidos (em preto) e calculados (em vermelho) para índice de refração e temperatura.....	54
Figura 28 - Planificação da diferença entre os comprimentos de onda dos dois primeiros modos da fibra, sendo o índice de refração uma função da diferença comprimento de onda $\lambda_1-\lambda_2$ e da temperatura.	55
Figura 29 - Valores medidos (em preto) e valores calculados (em vermelho) para os índices de refração e temperatura, com seus respectivos erros calculados.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Regressão linear do índice de refração em função da temperatura	39
Tabela 2 - Parâmetros encontrados na aproximação para uma hipérbole, utilizando os dados da Figura 13	41
Tabela 3 - Regressão linear da sensibilidade cruzada do índice de refração com temperatura.	48
Tabela 4 - Regressão linear da sensibilidade cruzada da temperatura com o índice de refração.	50
Tabela 5 - Aproximação plana do índice de refração em função do comprimento de onda e temperatura.	55
Tabela 6 - Valores encontrados para os coeficientes do plano usando os valores das sensibilidades cruzadas.....	56

LISTA DE SIGLAS

ASE	<i>Amplified Spontaneous Emission</i> (Emissão Espontânea Amplificada)
EFBG	<i>Etched Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em fibra Corroída)
EMFBG	<i>Etched Multimode Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em fibra multimodo corroída)
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg)
IR	Índice de refração
LPG	<i>Long Period Grating</i> (Rede de Período Longo)
MFBG	<i>Multimode Fiber Bragg Grating</i> (Rede de Bragg em fibra Multimodo)
MMF	<i>Multimode Fiber</i> (Fibra ótica multimodo)
MZI	<i>Mach-Zehnder Interferometer</i> (Interferômetro Mach-Zehnder)
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i> (Analisador de Espectro Ótico)
PVC	Policloreto de Vinila
SMF	<i>Singlemode Fiber</i> (Fibra ótica monomodo)
UIR	<i>Refractive Index Unit</i> (Unidade de Índice de Refração)
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	<i>Ultraviolet</i> (Ultravioleta)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO	13
1.2	ESTADO DA ARTE	14
1.3	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	FIBRAS ÓTICAS	20
2.2	FOTOSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS	21
2.3	REDES DE BRAGG	21
2.4	FIBRAS ÓTICAS MULTIMODO	23
2.4.1	Fibras Multimodo de Índice Degrau	24
2.4.2	Fibras Multimodo de Índice Gradual	24
2.5	REDE DE BRAGG ATUANDO COMO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO ...	25
2.6	SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	FABRICAÇÃO DAS REDES DE BRAGG	32
3.2	CORROSÃO DAS FIBRAS ÓTICAS COM REDES DE BRAGG.....	33
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG EM ÍNDICE DE REFRAÇÃO E TEMPERATURA	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5	CONCLUSÕES	58
5.1	CONCLUSÕES GERAIS	58
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	59
5.3	PUBLICAÇÕES	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a contextualização deste trabalho, organizado pela sua motivação e com base na sua relevância. É apresentado o estado da arte, com as pesquisas relacionadas ao assunto estudado, que é útil para partir de seus princípios e perspectivas. Por fim é traçado o conjunto de objetivos gerais e específicos, bem como a descrição resumida da estrutura da dissertação, em toda sua extensão.

1.1 MOTIVAÇÃO

A utilização das fibras óticas é imprescindível para o avanço de diversas tecnologias. O seu desenvolvimento proporcionou uma verdadeira revolução nas telecomunicações devido às baixas perdas contidas em conexões e em seus cabos, que interligam até mesmo continentes através de cabos submarinos (KASHYAP, 1999; OTHONOS; KALLI, 1999). Em sistemas de telecomunicações, as fibras óticas também são utilizadas em sistemas de roteamento, filtragem de sinais, amplificação e multiplexação (HILL; MELTZ, 1997). O desenvolvimento desta tecnologia também fez surgir um novo ramo de estudos e um novo mercado: o de sensores óticos. Esses estão presentes em sistemas de sensoriamento industrial, com aplicações para medições de temperatura, deformação mecânica, detecção de elementos químicos, medição de índice de refração, entre outros (PATRICK; KERSEY; BUCHOLTZ, 1998).

Em termos financeiros, o mercado de sensores óticos gerou U\$ 656,4 milhões em receitas em 2014 e estima-se que tal receita chegue a U\$ 3,31 bilhões em 2017. Isso se deve à ampliação de sua utilização em setores fundamentais, como de energia, segurança, monitoramento estrutural de construções civis, indústria e defesa (FROST & SULLIVAN, 2015).

Uma das tecnologias de sensores óticos atualmente utilizadas são as redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*). Estes dispositivos apresentam como vantagens a imunidade à interferência eletromagnética, a possibilidade de utilização em ambientes hostis, a passividade elétrica, a monitoração remota, a capacidade de multiplexação, o baixo peso e as dimensões reduzidas (CUSANO *et al.*, 2005).

Os sensores óticos baseados em FBG's são empregados para medição de diversos parâmetros físicos, tais como temperatura, pressão, curvatura e deformação (ZHANG *et al.*, 2002). As redes de Bragg também podem apresentar

sensibilidade ao índice de refração após serem submetidas a um processo de corrosão química. O índice de refração pode ser utilizado para auxiliar na identificação de substâncias, verificação do seu nível de pureza, concentração, viscosidade, entre outros.

Uma aplicação direta pode ser encontrada na eletrotécnica, em ensaios especiais de óleos isolantes de transformadores de potência. De acordo com a norma “ASTM D2140” a determinação da composição carbônica é expressa em porcentagem de compostos naftênicos, parafínicos e aromáticos presentes no óleo mineral, e é determinada através da viscosidade, da densidade específica e do índice de refração do óleo (ASTM, 2008).

A medição do índice de refração, porém, é dependente da variação da temperatura. Devido ao fato das redes de Bragg também apresentarem sensibilidade à temperatura, surge um fenômeno chamado de sensibilidade cruzada, o qual é um problema inerente a sistemas sensores que fazem uso desse dispositivo. Desta forma, estudos direcionados às medições simultâneas de índice de refração e temperatura, foco principal deste trabalho, tornam-se importantes para o desenvolvimento de sensores químicos e bioquímicos.

1.2 ESTADO DA ARTE

Em 1978 os pesquisadores do *Communications Research Centre Canada* demonstraram a existência da fotossensibilidade em fibras óticas (HILL *et al.*, 1978). A descoberta da fotossensibilidade permitiu a escrita das primeiras FBGs (Fiber Bragg Grating). Os primeiros métodos de gravação utilizavam técnicas interferométricas de inscrição externa, usando um laser Excímero na faixa de 486 a 500 nm. As fontes coerentes subdividiam-se em duas de 244 nm, formando um padrão de interferência na fibra e criando a estrutura de uma rede de Bragg (MELTZ; MOREY; GLENN, 1989). Esse método possibilitou as diferentes combinações para variadas gravações de estruturas periódicas com diferentes espaçamentos.

A continuidade dos estudos levou ao desenvolvimento de sistemas de gravação que utilizam máscaras de fase (HILL; MELTZ, 1997). O que chamou a atenção nessa técnica foi o fácil alinhamento, uma melhor estabilidade do padrão de interferência e a sua alta reprodutibilidade. Uma das desvantagens do método é que cada máscara de fase apresenta um único comprimento de onda de Bragg, fazendo

com que sejam necessárias mais de uma máscara de fase para gravações de diferentes comprimentos de onda na fibra.

Como já citado, as redes de Bragg em fibras óticas quando utilizadas como sensor podem medir a temperatura, as deformações mecânicas e o índice de refração, além de medidas simultâneas desses parâmetros (CAUCHETEUR; MÉGRET, 2005).

Quanto a gravação, as redes de Bragg podem ser gravadas tanto em fibras monomodo quanto em fibras multimodo, dependendo das necessidades e as vantagens que cada uma proporciona. Uma condição para que uma rede de Bragg em fibra ótica seja sensível ao índice de refração do meio externo é através da redução do diâmetro da casca da fibra, ou até mesmo sua remoção total, fazendo com que o contato seja direto entre o núcleo da fibra e o meio. É dessa maneira que o índice efetivo do modo fundamental passa a ser influenciado pelo índice de refração do meio externo à fibra. À medida que se diminui o diâmetro da fibra, há um aumento de sensibilidade da rede a este parâmetro, fato que ocorre devido ao campo evanescente do modo de núcleo ter uma interação maior com o meio externo à fibra (CUSANO *et al.*, 2005).

Tsigaridas e colaboradores, em 2014, demonstraram que há um aumento da sensibilidade ao índice de refração externo quando é feito um processo de corrosão para se chegar até a região do núcleo da fibra. Entretanto, conforme esta região é alcançada, há um comprometimento na robustez mecânica da fibra, fazendo com que a relação entre o aumento da sensibilidade e a estabilidade mecânica torne-se um ponto crítico (TSIGARIDAS *et al.*, 2014).

Uma das formas de se contornar esse problema é gravar redes de Bragg em fibras multimodo. Devido ao maior diâmetro do núcleo, a corrosão necessária para que se tenha acesso ao campo evanescente não torna o dispositivo tão frágil como no caso das fibras monomodo. Assim, ao estudar a gravação de FBGs em fibras óticas multimodo, Mizunami e colaboradores observaram o surgimento de múltiplos picos no espectro de reflexão. Segundo os autores, a quantidade de picos de reflexão é dependente da condição de excitação dos modos propagados. Eles utilizaram uma fibra ótica multimodo de perfil gradual de índice de refração, com núcleo de 50 μm , conectada a uma extensão ótica monomodo. Foi possível identificar quatro comprimentos de onda em reflexão quando a energia radiante acoplada ao núcleo da fibra originou-se de uma fonte emitindo no infravermelho.

Estes modos identificados correspondem aos modos de baixa ordem da fibra ótica multimodo (MIZUNAMI *et al.*, 2000).

Isso motivou o desenvolvimento de trabalhos recentes na UTFPR, onde foram gravadas redes de Bragg em fibras multimodo. Corotti e colaboradores demonstraram que esses sensores são capazes de medir maiores faixas de índices de refração, quando comparadas com as redes gravadas em fibras monomodo. Foi possível, dessa forma, utilizá-las na caracterização da qualidade do biodiesel sem a necessidade do uso de técnicas adicionais para a redução do índice de refração (COROTTI, 2015).

Ainda na UTFPR, dando sequência a esses estudos, Kuhne e colaboradores fizeram uma análise comparativa das sensibilidades das redes de Bragg corroídas (EFBG – *Etched Fiber Bragg Grating*) gravadas em fibras monomodo e multimodo, com diâmetros aproximados. Isso permitiu a percepção que as EFBG's multimodo apresentam sensibilidade superior à proporcionada pelas EFBG's monomodo (KUHNE *et al.*, 2015).

É preciso considerar que nas duas situações anteriores os resultados consideraram uma temperatura ambiente em 22,0 °C. Kamikawachi e colaboradores, anteriormente, demonstraram a influência do meio externo com diferentes índices de refração na sensibilidade térmica de uma FBG corroída (KAMIKAWACHI, 2007). Concluíram que em muitas aplicações os efeitos da variação de temperatura na resposta das redes são indesejados e devem ser compensados ou corrigidos. Com isso, é necessária uma cuidadosa caracterização das sensibilidades térmicas, que considerem toda uma faixa de temperatura na qual o sensor irá operar com a rede imersa, evitando assim erros devidos à extrapolação da temperatura tolerável da FBG.

Em uma aplicação em que seja necessária a observação do índice de refração com sensores óticos é fundamental, portanto, acompanhar a variação da temperatura do meio em que o sensor está imerso, pois devido ao efeito termo-ótico, os índices de refração tanto do meio quanto da sílica sofrerão alterações. É por esse motivo que atualmente muitos pesquisadores exploram medidas simultâneas de temperatura e índice de refração, resultando em novas técnicas de medição e monitoramento desses parâmetros.

Ao encontrar uma solução para essa necessidade, Pereira e colaboradores produziram um sensor multiparâmetro que utiliza duas redes simultaneamente,

sendo uma corroída para a identificação do parâmetro do índice de refração e outra não corroída para a correção proveniente da variação de temperatura (PEREIRA; FRAZÃO; SANTOS, 2004). Uma técnica semelhante foi apresentada por Sang e colaboradores com uma FBG parcialmente corroída, em que a região corroída apresentou sensibilidade à temperatura e índice de refração enquanto a região não corroída apresentou sensibilidade à temperatura e não ao índice de refração (SANG *et al.*, 2007).

Em 2006, Zhao e colaboradores propuseram um sensor baseado em uma FBG em fibra multimodo (MFBG – *Multimode Fiber Bragg Grating*) para medição simultânea de temperatura e índice de refração. A MFBG mostra dois grupos de comprimento de onda em seu espectro de transmissão: um grupo é sensível tanto ao índice de refração como à temperatura enquanto o outro é sensível apenas à temperatura (ZHAO *et al.*, 2006).

Em 2014, Bai e colaboradores elaboraram um sensor multiparâmetro utilizando a diferença da largura de banda e do comprimento de onda aplicados tanto ao índice de refração quanto à temperatura. Os dois parâmetros puderam ser distinguidos e medidos simultaneamente usando uma FBG em forma de cone parcial. Os resultados experimentais mostraram que o sensor proposto teria uma sensibilidade média ao índice de 18,027 nm/UIR com índices entre 1,33 e 1,42, e uma sensibilidade à temperatura de 9,8 pm/°C, variando entre 20 e 80 °C (BAI *et al.*, 2014).

Ainda em 2014, Xiong e colaboradores propuseram uma configuração simples de sensores de fibra ótica para medição simultânea do índice de refração e temperatura, com base na interferência modal. O dispositivo é formado emendando dois trechos de fibra multimodo entre três trechos de fibra monomodo. Devido às diferentes sensibilidades de dois vales de transmissão formados pela interferência destrutiva entre os modos de núcleo e casca, é possível medir o índice de refração e a temperatura através do monitoramento dos desvios do comprimento de onda de cada vale (XIONG *et al.*, 2014).

Outro sensor multiparâmetro foi proposto e demonstrado por Cao e colaboradores em 2015. Uma ponta do sensor é composta por um interferômetro Mach-Zehnder (MZI - Mach-Zehnder Interferometer) e uma rede de Bragg. Os resultados experimentais mostram que as sensibilidades à temperatura da FBG e do MZI são 0,01228 nm/°C e 0,08329 nm/°C, respectivamente. A FBG é insensível ao

índice de refração do meio enquanto o MZI apresenta uma sensibilidade de 26,965 nm/UIR (CAO *et al.*, 2015).

Recentemente, Yang e colaboradores apresentaram um sensor para medições simultâneas de índice de refração e temperatura fabricado através da inscrição de uma rede no núcleo de uma fibra multimodo com apenas dois modos de propagação. Uma técnica de corrosão química é realizada para remover a casca, deixando seu diâmetro em 14,1 μm , com dois comprimentos de onda Bragg distintos. Como vantagem apresentou uma melhor robustez mecânica em comparação com uma rede de Bragg em fibra monomodo (YANG *et al.*, 2015).

Estes trabalhos motivaram o estudo de uma técnica capaz de realizar medidas simultâneas da temperatura e do índice de refração com uma FBG gravada em uma fibra multimodo padrão de telecomunicações, assim como o desenvolvimento de uma análise da resposta do dispositivo aprimorada quando comparada com a técnica apresentada por Yang e seus colaboradores.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um sensor para medidas simultâneas de temperatura e índice de refração, com o uso de um sensor ótico que utiliza os princípios das redes de Bragg em fibras óticas multimodo corroídas (EMFBGs).

Além disso, como objetivo específico propõe-se estudar o processo de produção dos sensores óticos. Nesta etapa pretende-se realizar a corrosão da casca da fibra até um ponto em que com o diâmetro da fibra corroída torne o sensor suficientemente robusto e apresente sensibilidade ao índice de refração. A segunda etapa destina-se a desenvolver uma técnica de análise da resposta do sensor para se discriminar os valores de temperatura e índice de refração.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação divide-se em cinco capítulos. Este Capítulo inicial traz a parte introdutória, estado da arte de objetivos da dissertação. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica essencial para o desenvolvimento do trabalho. São descritos os conceitos de fotossensibilidade, definição das redes de Bragg, sensibilidade da FBG ao índice de refração do meio externo e as propriedades térmicas da fibra.

No Capítulo 3 é descrita toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento das atividades laboratoriais, respeitando toda a teoria e, principalmente criando uma sequência de passos a serem seguidos, também de acordo com outros trabalhos observados.

Já com os passos descritos e resultados obtidos, o Capítulo 4 apresenta esses resultados com suas discussões. As conclusões principais, bem como os trabalhos futuros que podem ser obtidos a partir deste estudo, são apresentadas no Capítulo 5.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo encontram-se as teorias elementares utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 FIBRAS ÓTICAS

As fibras óticas, popularmente utilizadas em sistemas de telecomunicações, são guias de onda fabricadas com material transparente que transportam luz (como imagens ou sinais codificados, com alto rendimento). Geralmente são fabricados com sílica (SiO_2) em seu núcleo, com uma casca de mesmo material, porém, com menor índice de refração, devido a existirem diferentes concentrações dos elementos dopantes (KASHYAP, 1999).

As fibras são como capilares formados por dielétricos, amplamente utilizados em sistemas de comunicações e de sensoriamento ótico, guiando a luz nas regiões do visível e infravermelho. Seus diâmetros externos são tipicamente de 125 μm , sendo que o núcleo pode variar de 8 a 65 μm , dependendo do tipo da fibra.

O índice de refração do núcleo da fibra normalmente é maior que o da casca cerca de 1%, fazendo com que ocorra a reflexão interna total, obedecendo a Lei de Snell-Descartes. Normalmente há uma terceira camada na fibra que serve apenas para a proteção (HECHT, 2002).

Quanto à classificação, as fibras óticas podem ser distinguidas tanto quanto ao perfil do índice de refração (degrau – quando há um índice de refração uniforme ao longo do núcleo – ou gradual – quando o núcleo tem um índice de refração não uniforme, que diminui radialmente do centro em direção à interface entre o núcleo e a casca), como à quantidade de modos que se propagam no guia de onda (monomodo – um único modo de propagação – ou multimodo – muitos modos de propagação) (AGRAWAL, 1997).

A propagação das ondas eletromagnéticas em uma fibra ótica, assim como em quaisquer guias de onda, é descrita pelas equações de Maxwell. As equações de onda resultantes do processo de desenvolvimento e rearranjo das equações de Maxwell são da forma:

$$\vec{\nabla}^2 \Psi = \frac{n^2}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

em que Ψ representa o vetor campo elétrico ou campo magnético, n é o índice de refração, c é a velocidade da luz no vácuo e t é o tempo (HECHT, 2002).

As condições de contorno da fibra, quando aplicadas à equação de onda, levam a soluções discretas. É possível afirmar, então, que a luz acoplada a uma fibra ótica será propagada com distribuições de campo que satisfazem as equações de Maxwell e correspondem aos modos de propagação no guia de onda (AGRAWAL, 1997).

2.2 FOTOSSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS

Em 1978 foi descoberto por Hill e colaboradores que as fibras óticas apresentavam o fenômeno da fotossensibilidade (HILL *et al.*, 1978). A partir disso, surgiram novos dispositivos em fibras óticas, como filtros, equalizadores de ganho e os sensores óticos.

O fenômeno consiste na mudança permanente do índice de refração do núcleo da fibra após sua exposição à luz, com certo comprimento de onda e intensidade, dependendo do material de composição (OTHONOS; KALLI, 1999). Com a incidência da radiação, há rompimento das ligações entre os átomos que então formam novas ligações, fazendo com que haja um novo nível eletrônico. A alteração no índice de refração do meio resulta da destruição dos defeitos existentes na fibra, posteriormente com um rearranjo das ligações e uma formação de novos defeitos. As fibras dopadas com germânio são as mais importantes na fabricação de dispositivos em fibra, pois tem uma melhor resposta ao procedimento.

A fotossensibilidade das fibras é de extrema importância e interesse para as gravações das redes de Bragg, pois não há necessidade de utilizar um feixe de escrita com alta potência, nem tampouco tempo de exposição longo. Há ainda técnicas que permitem o aumento da sensibilidade, como a inserção de hidrogênio na estrutura vítrea da fibra (OTHONOS; KALLI, 1999).

2.3 REDES DE BRAGG

A rede de Bragg gravada em uma fibra ótica (*FBG – Fiber Bragg Grating*) é uma modulação periódica longitudinal que ocorre no índice de refração do núcleo da fibra. Quando um feixe de luz guiado pelo núcleo da fibra é difratado por cada plano

da rede e as frequências, que satisfazem à condição de Bragg, ocorre a contribuição construtiva na direção contrária à propagação (contra-propagante), formando uma banda de reflexão com comprimento de onda central específico (HILL; MELTZ, 1997). Para que aconteça o acoplamento entre os modos de propagação na fibra é preciso que a condição de casamento de fase seja satisfeita. Isso significa que é necessário ocorrer o sincronismo de fase e superposição suficientes na região onde estão as redes de difração. A condição para que ocorra o casamento de fase, que garante uma troca coerente de energia entre os modos é dada por:

$$n_{eff} - \frac{\lambda_B}{\Lambda_Z} = n'_{eff} \quad (2)$$

em que, n_{eff} é o índice de refração modal efetivo da onda incidente, n'_{eff} é o índice de refração efetivo do modo para o qual a energia é acoplada na rede, λ_B é o comprimento de onda de ressonância e Λ_Z é o período espacial da modulação do índice de refração ao longo da fibra.

A condição de Bragg deve satisfazer a conservação da energia, em que o comprimento de onda da faixa incidente seja o mesmo da refletida, e de momento, em que a radiação incidente k_i quando somada ao vetor de onda da FBG K deverá ser igual ao vetor de onda da radiação espalhada k_f , de acordo com a equação (3):

$$k_i + K = k_f \quad (3)$$

em que K tem direção normal aos planos e possui módulo $2\pi/\Lambda$ (OTHONOS; KALLI, 1999). Desse modo, tem-se que o vetor de onda difratada é igual em intensidade, mas tem direção oposta ao vetor de onda incidente. Da relação da conservação de momento obtém-se a equação (4):

$$2 \cdot \left(\frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

que de forma simplificada pode ser escrita pela equação (5):

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \Lambda \quad (5)$$

em que λ_B é o comprimento de onda de Bragg, n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado na fibra e Λ é o período de modulação do índice de refração do núcleo da fibra. A Figura 1 representa um conjunto de redes de Bragg com três diferentes

períodos de modulação, bem como as características dos espectros incidentes, transmitidos e refletidos.

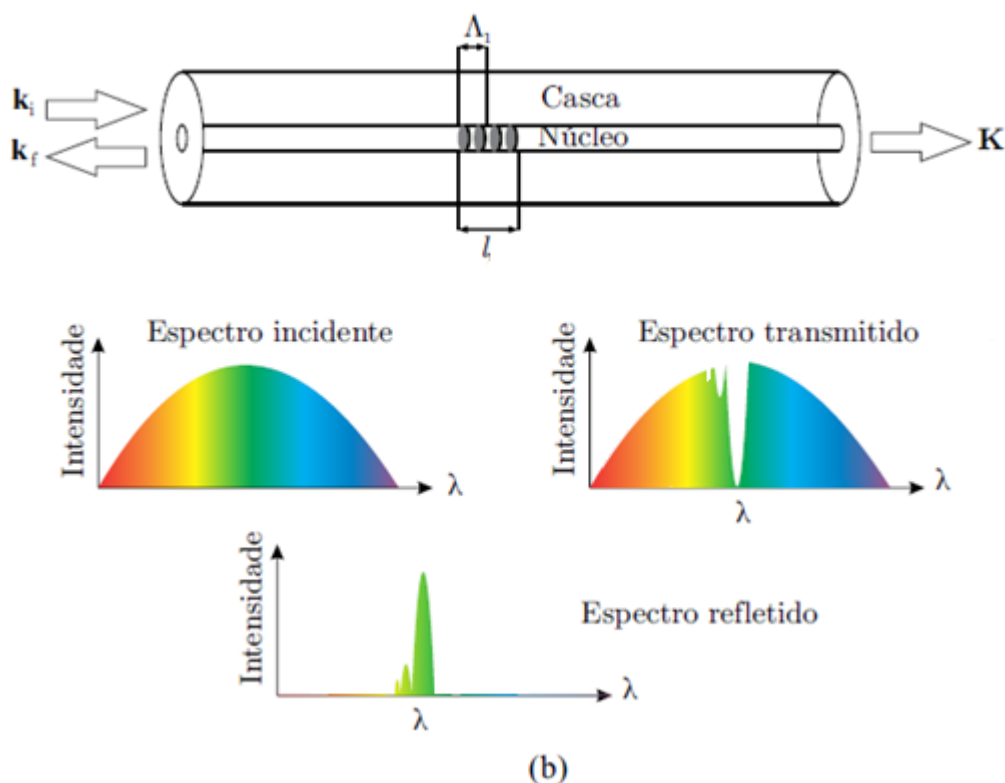


Figura 1 - (a) Representação de uma rede de Bragg em fibra multimodo; (b) Espectros incidente, transmitido e refletido.

2.4 FIBRAS ÓTICAS MULTIMODO

Um modo de propagação é uma onda estacionária que viaja através de uma fibra. Uma das classificações das fibras óticas se dá por suas características básicas de transmissão, essencialmente pelo perfil do índice de refração da fibra e pelo número de modos propagados por elas.

Uma fibra ótica multimodo tem como característica a transmissão em mais de um modo. Uma fibra multimodo de índice degrau apresenta uma fácil operação e simplicidade operacional, porém apresenta uma capacidade de transmissão mais limitada em comparação com uma com índice gradual. Por sua vez, a fibra multimodo com perfil gradual tem uma média dificuldade para a sua fabricação. Já a fibra monomodo tem apenas um modo de propagação, possui dimensões menores e

por isso apresenta maior dificuldade para sua conectividade. Entretanto possui uma capacidade de transmissão altamente superior às fibras multimodo (GIOZZA; CONFORTI; WALDMAN, 1991).

2.4.1 Fibras Multimodo de Índice Degrau

São fibras conceitualmente mais simples, sendo as pioneiras em termos de aplicações práticas. Caracterizam-se pela variação abrupta do índice de refração do núcleo em relação à casca. Uma das principais propriedades de uma fibra multimodo com índice degrau é a sua grande capacidade de captação de energia luminosa, que depende apenas da diferença relativa do índice de refração.

Como vantagens permitem o uso de fontes luminosas de baixa coerência, como LED's. Tem aberturas numéricas e diâmetros do núcleo relativamente grandes, o que facilita o acoplamento e faz com que seja requerida menos precisão nos conectores, quando comparadas com a fibra monomodo (CHERIN, 1983).

2.4.2 Fibras Multimodo de Índice Gradual

Foram desenvolvidas especialmente para a utilização em sistemas telecomunicações. Caracterizam-se especialmente por apresentarem um perfil gradual do índice de refração do núcleo com relação à casca e por suas diferenças relativas de índice de refração, implicando na existência de múltiplos modos de propagação.

Neste tipo de fibra, o núcleo não apresenta um índice de refração constante, mas sim variável radialmente, de um valor maior de dentro para fora da fibra. A variação gradual do índice de refração do núcleo é dada por:

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & , r < a \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} = n_2, r \geq a \end{cases} \quad (6)$$

onde n_1 é o índice de refração do núcleo no eixo, n_2 é o índice de refração na casca, Δ é a diferença relativa de índices, a é o raio do núcleo e α é o parâmetro de perfil

gradual que define o perfil de índices característico da fibra multimodo de índice gradual.

O número de modos propagados em uma fibra depende da abertura numérica, bem como o diâmetro do seu núcleo e o comprimento de onda da luz. Em uma fibra ótica multimodo de perfil gradual é dado pela expressão:

$$M = \frac{\alpha}{\alpha + 2} \left(\frac{2\pi a}{\lambda} n_1 \right)^2 \times \Delta \quad (7)$$

onde M é o número de modos propagados (GIOZZA; CONFORTI; WALDMAN, 1991).

2.5 REDE DE BRAGG ATUANDO COMO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO

O fenômeno da reflexão interna total ocorre na fibra ótica, como seu princípio de funcionamento. O campo elétrico evanescente na fronteira de separação entre o núcleo e casca se origina devido à diminuição do índice de refração da casca em relação ao núcleo. A componente radial desse campo é atenuada ao penetrar na casca da fibra (KASAP, 2013), que pode ser observada com a equação (8) da profundidade de penetração δ , em função do coeficiente α_2 de atenuação do campo elétrico penetrante na casca da fibra, que possui equação (9), com λ_0 sendo o comprimento de onda no vácuo.

$$\delta = \frac{1}{\alpha_2} \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \frac{2\pi \cdot n_0}{\lambda_0} \sqrt{\left(\frac{n_1}{n_0}\right)^2 \sin^2 \theta_i - 1} \quad (9)$$

Conforme a casca da fibra ótica é removida, observa-se que o campo evanescente interage mais com o meio no qual a fibra está imersa. O meio externo, portanto, altera as características de guiamento, que afetam o índice de refração efetivo do modo. É este, portanto, o princípio de funcionamento de sensores de índice de refração baseados em FBG's (SCHROEDER *et al.*, 2001).

A Figura 2 mostra o comportamento do campo elétrico propagante para os modos de ordem m iguais a 0, 1 e 2, bem como suas parcelas evanescentes. A

penetração que ocorre no ambiente fora do núcleo é uma parcela do campo elétrico que decai exponencialmente.

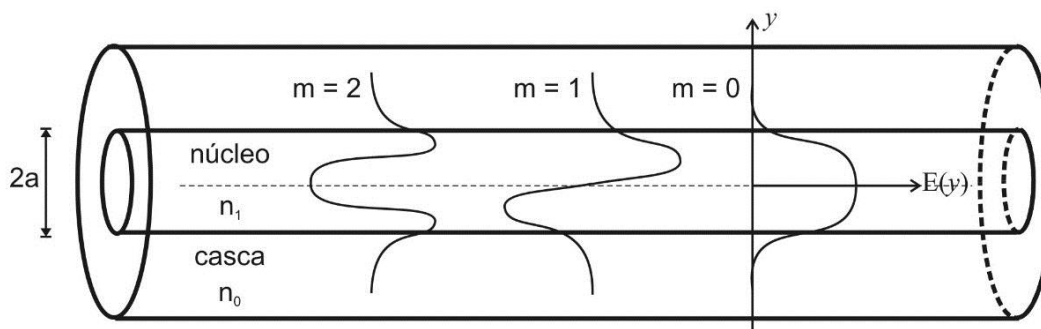


Figura 2 - Esquema do perfil do campo elétrico propagante para os modos 0, 1 e 2 e suas porções de campo elétrico evanescente.

Fonte: KUHNE, 2016

Tsigaridas e colaboradores demonstraram que a porção evanescente do modo propagante é protegida do meio externo devido à espessura da casca, o que torna o índice de refração efetivo do modo fundamental independente do índice de refração do meio externo. Mas, conforme há a redução da espessura da casca, ocorre uma redução exponencial do índice de refração efetivo da fibra, ocasionando um deslocamento no comprimento de onda ressonante de Bragg (TSIGARIDAS *et al.*, 2014).

Já Pereira e colaboradores demonstraram que quando o modo guiado em uma fibra óptica corroída é afetado pelo meio externo, a constante de propagação toma formato da equação (10):

$$\beta = \beta_0 + k \cdot n_{em} (n_{ext} - n_0) \quad (10)$$

em que $\beta_0 = (2\pi / \lambda) \cdot n_{eff}$ é a constante de propagação para a fibra sem corrosão, n_{ext} é o índice de refração do meio externo, n_0 é o índice de refração da casca da fibra e k é o número de onda, definido como $2\pi / \lambda$. Há ainda o fator n_{em} que representa uma fração da energia total do modo não perturbado, que flui na região corroída, sendo essa parcela perdida para o meio externo no qual a fibra está inserida. A variação do comprimento de onda de Bragg ressonante assume, então, o formato da equação (11), relacionado com a variação entre o índice de refração do meio externo e o do núcleo da fibra (PEREIRA; FRAZÃO; SANTOS, 2004):

$$\Delta\lambda_B = 2 \cdot n_{em0} (n_{ext} - n_0) \quad (11)$$

Esses estudos concluem que a variação do comprimento de onda de Bragg ressonante em função das variações de índice de refração externo possibilita a utilização das EFBGs como sensores de índice de refração.

Após alguns trabalhos desenvolvidos na UTFPR, constatou-se que as medidas do comprimento de onda de Bragg em função do índice de refração do meio externo à fibra aproximam-se de um ajuste hiperbólico (COROTTI, 2015; KAMIKAWACHI, 2007; KUHNE, 2016). Assim, as curvas de ajuste para a caracterização da fibra em índice de refração foram retiradas de uma função hiperbólica empírica de equação (12):

$$f(x) = a + \frac{b}{x+c} \quad (12)$$

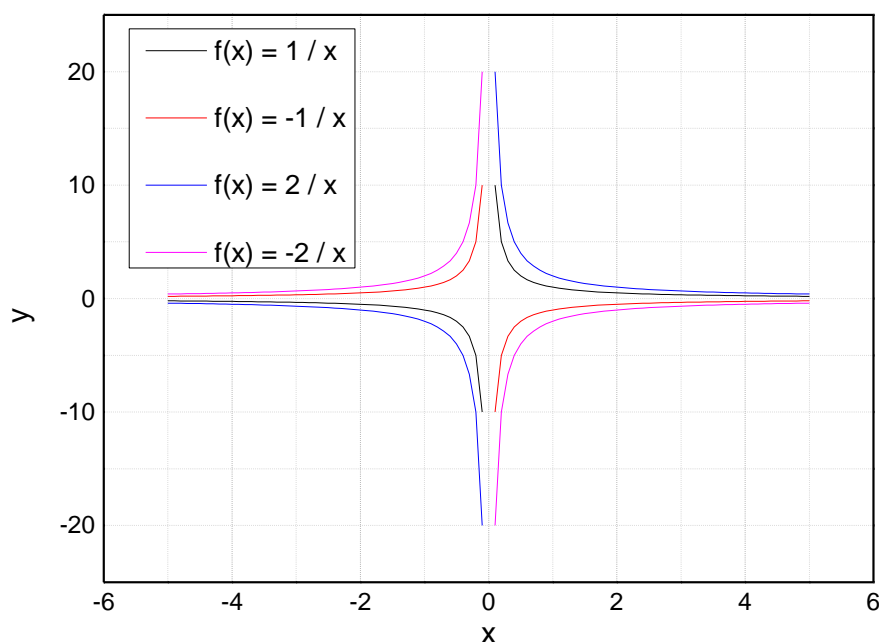


Figura 3 - Estudo do coeficiente b da função hiperbólica de ajuste.

É preciso identificar a contribuição de cada um dos coeficientes da função para uma melhor compreensão sobre o ajuste a ser feito, principalmente para definir os valores iniciais durante a aplicação do ajuste no *software*. Pela facilidade, inicialmente tomou-se a função $f(x) = 1/x$ como base e variou-se cada um dos coeficientes a , b e c , observando graficamente o seu significado.

Primeiramente, optou-se por variar o coeficiente b . Observa-se pela Figura 3 que b está relacionado com a taxa de crescimento da curva.

O comportamento de uma rede de Bragg como sensor de índice de refração tem a peculiaridade de ter menor taxa variação de comprimento de onda para valores de índices de refração externos mais afastados do índice de refração do núcleo. Já quando o índice do meio está muito próximo ao índice de refração do núcleo, ocorre uma divergência e o guia de onda deixa de existir. Assim, a parcela do gráfico que é interessante para essa aplicação é a anterior à assíntota vertical, neste caso em $x=0$.

Com a variação do coeficiente c , representado pela Figura 4, é possível perceber que há um deslocamento horizontal da função para esquerda, quando c é positivo, e para direita, quando c é negativo. O valor de c pode ser atribuído ao índice de refração com o qual a luz deixa de ser guiada, ou seja, seu valor será próximo a $-1,5$, que é o índice de refração aproximado da sílica, com o sinal do deslocamento à direita.

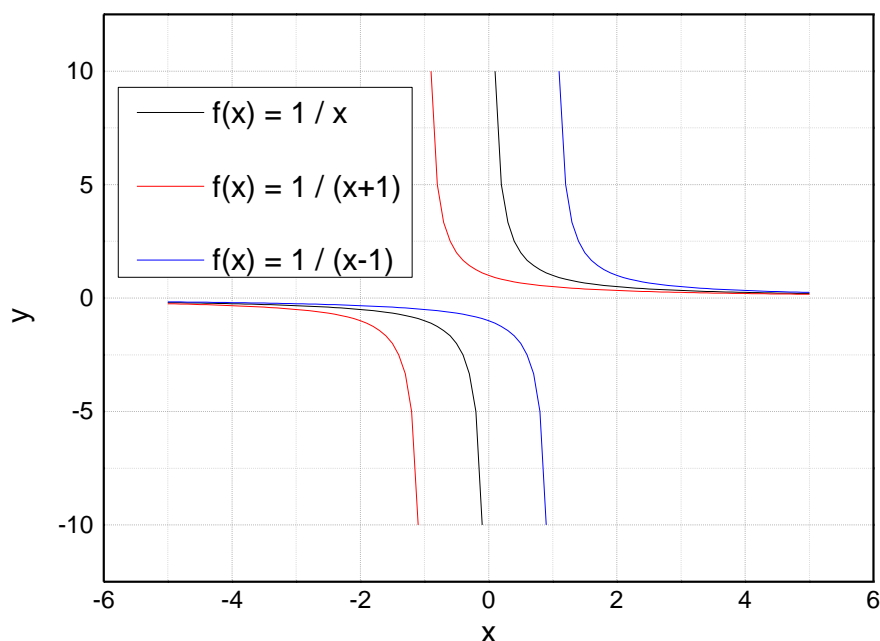


Figura 4 - Estudo do coeficiente c da função hiperbólica de ajuste.

Já o coeficiente a representa um deslocamento vertical da função, que pode ser representado na Figura 5. Seu valor será próximo ao comprimento de onda de Bragg.

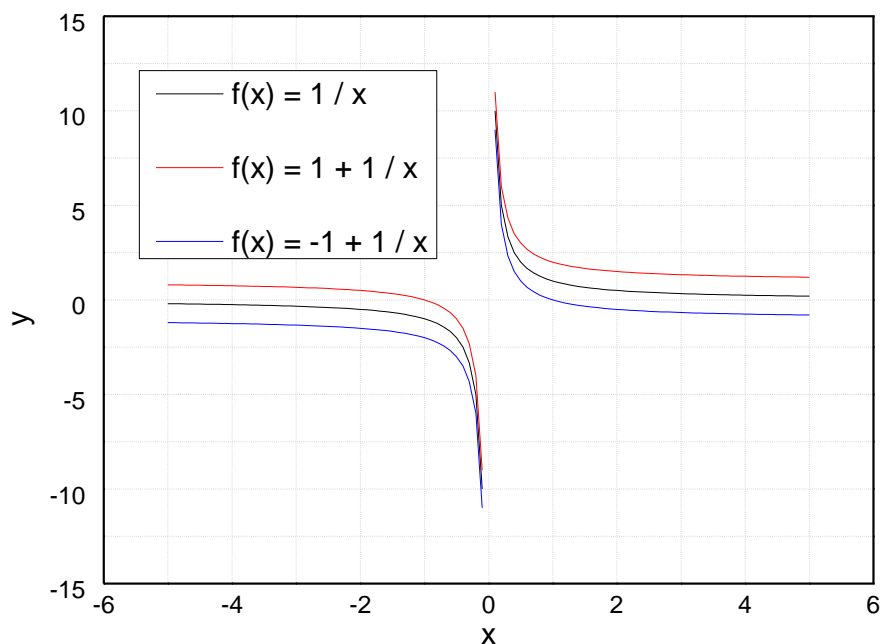


Figura 5 - Estudo do coeficiente a da função hiperbólica de ajuste.

Com essas conclusões sobre as atribuições dos coeficientes, é possível prever os melhores valores iniciais para o ajuste. A Figura 6 mostra o comportamento da função com coeficientes próximos aos valores encontrados em laboratório. Desse modo, a equação (13) será utilizada para o ajuste.

$$\lambda_B = a + \frac{b}{n + c} \quad (13)$$

Devido à equação ser apenas um modelo teórico, não é possível afirmar o significado físico de cada coeficiente. Porém, pelas observações em diversos modelos de curvas, o coeficiente a pode estar relacionado com o comprimento inicial da rede quando ela está no ar / vácuo (que é o menor valor de índice de refração). O coeficiente b pode estar associado com a sensibilidade da rede e, portanto, com a porção do campo evanescente que penetra no meio. Já o coeficiente c pode ser associado ao índice de refração do núcleo da fibra.

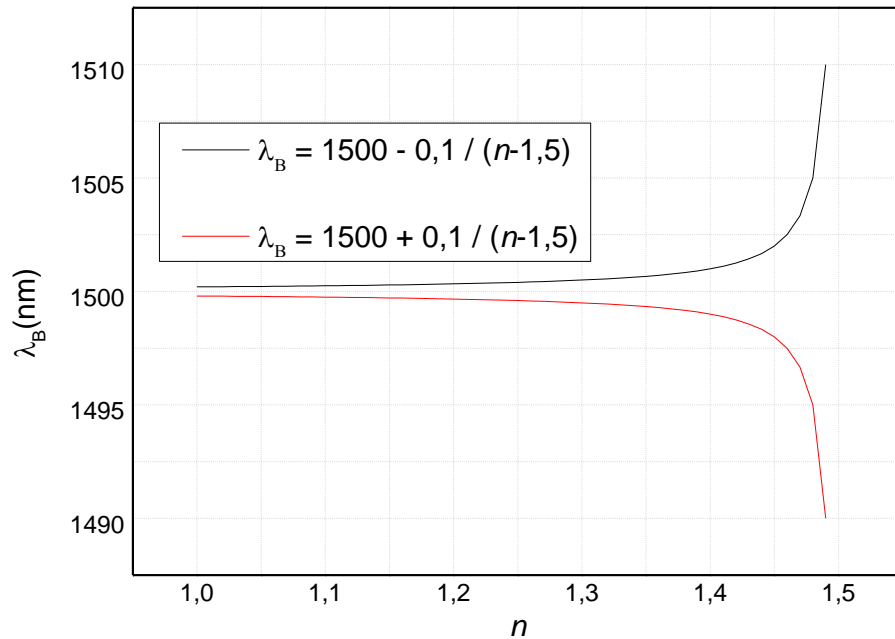


Figura 6 - Gráficos de funções que melhor representam as curvas de caracterização, com coeficientes para o conjunto de valores iniciais dos ajustes dos valores experimentais encontrados.

2.6 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA

Uma alteração na periodicidade espacial ou no índice de refração efetivo de uma fibra provoca uma mudança na posição do espectro de reflexão da rede de Bragg. Dessa forma, uma deformação mecânica ou variações de temperatura afetam o espectro de reflexão da rede. A mudança no comprimento de onda de Bragg da rede é dada pela equação (14) (OTHONOS; KALLI, 1999):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e) \cdot \varepsilon_z + (\alpha + \eta) \cdot \Delta T . \quad (14)$$

A primeira parcela da equação refere-se ao efeito da deformação da rede, que está relacionada a uma mudança no seu espaçamento. É possível, portanto, usar uma rede de Bragg para sensoriamento em deformações mecânicas. Na equação, ε_z representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento e p_e representa a constante fotoelástica efetiva.

Já a segunda parcela representa o efeito térmico na rede. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg para uma variação de temperatura ΔT pode ser escrito pela equação (15):

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \zeta) \cdot \Delta T. \quad (15)$$

em que $\alpha = (1/\Lambda) \cdot (\partial\Lambda/\partial T)$ é o coeficiente de expansão térmica para a fibra, cujo valor típico para a sílica é de $0,55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. O parâmetro $\zeta = (1/n_{eff}) (\partial n_{eff} / \partial T)$ representa o coeficiente termo ótico da fibra, que tipicamente é de $8,6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ para a fibra de sílica dopada com germânio. Com esses valores, para comprimentos de onda de Bragg na faixa de 1500 nm tem-se fator térmico de aproximadamente 13,7 pm / $^\circ\text{C}$ (OTHONOS; KALLI, 1999).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo está descrita a metodologia utilizada para a produção das redes de Bragg, bem como a técnica de corrosão adotada para reduzir o diâmetro da casca da fibra e parte do seu núcleo. São apresentados, também, os métodos adotados para caracterização da sensibilidade das redes à variação do índice de refração e temperatura.

3.1 FABRICAÇÃO DAS REDES DE BRAGG

Os procedimentos de gravação e corrosão ocorreram no Laboratório FOTON. Nele há um sistema de ar condicionado capaz de manter a temperatura em aproximadamente 22,0 °C. A Figura 7 mostra parte da estrutura de trabalho no laboratório FOTON.

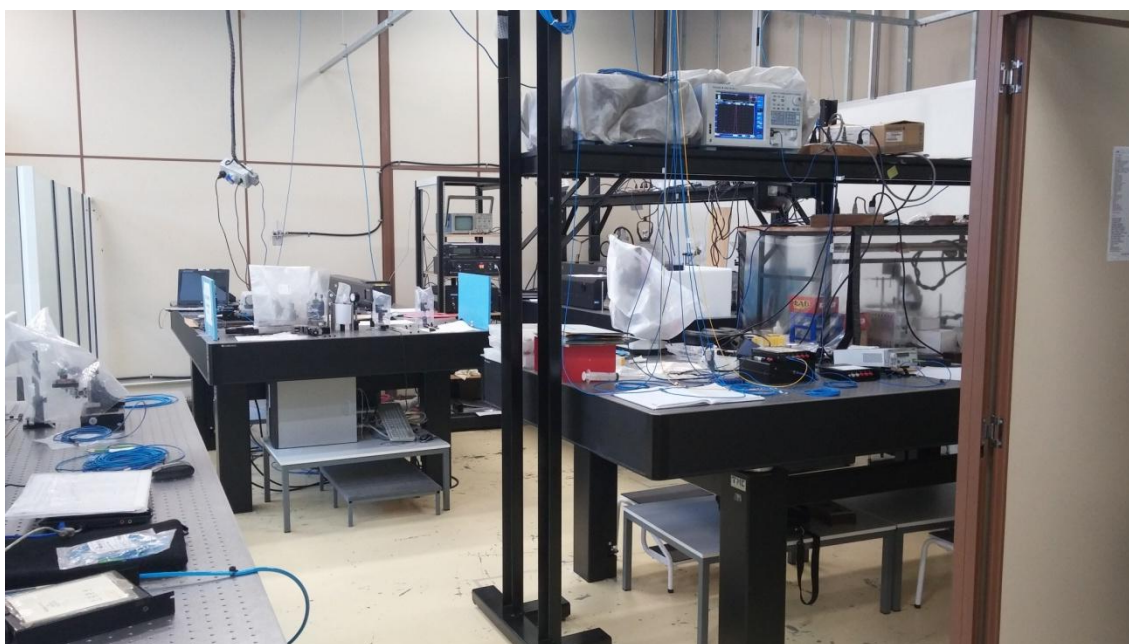


Figura 7 - Laboratório FOTON na UTFPR em Curitiba.

Para o trabalho, a fibra multimodo adotada foi da marca *Furukawa*[®], que tem como características típicas um diâmetro de núcleo de $(50,0 \pm 2,5) \mu\text{m}$ com perfil de índice de refração gradual, com valor máximo de 1,479 no seu núcleo e diâmetro da casca de $(125 \pm 1) \mu\text{m}$.

Foi utilizado cerca de 50 cm desta fibra para a realização do trabalho. Na região onde a rede de Bragg é gravada foi necessária a remoção do acrilato (camada de proteção mecânica da fibra ótica) - com a utilização de um alicate - em um comprimento aproximado de 2 cm. A fibra multimodo foi conectada a um *pigtail*

monomodo, utilizando o equipamento de fusão com arco voltaico *Fujikura*[®] (FSM-50S).

Para a gravação da rede de Bragg utilizou-se um laser Exímero ArF (Xantos XS, Coherent) operando em 193 nm. A técnica adotada foi a de exposição direta de uma máscara de fase *IBSEN*[®], com passo de 1064,9 nm. A taxa de repetição adotada foi de 250 Hz, com pulsos de 4,0 mJ e o tempo de exposição foi de 4 minutos, que é o tempo médio para resultar em uma rede com refletividade de 7 dBm. Durante o processo de gravação o espectro da rede foi monitorado com um analisador de espectros óticos - OSA - (*Yokogawa*[®], AQ6375, ± 5 pm). A Figura 8 mostra um esquema das conexões utilizadas para as interrogações com a FBG.

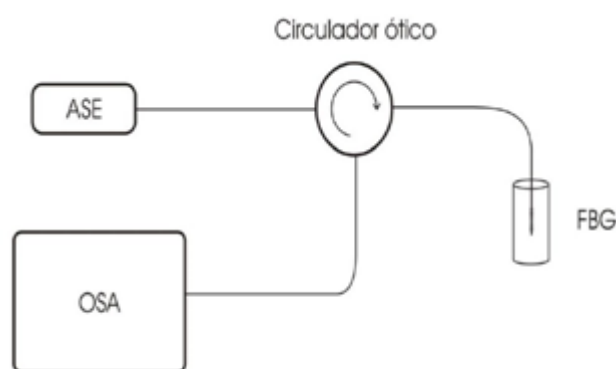


Figura 8 - Esquema das conexões para a interrogação com a FBG.

3.2 CORROSÃO DAS FIBRAS ÓTICAS COM REDES DE BRAGG

Para reduzir o diâmetro da fibra ótica foi adotada a técnica de corrosão com ácido fluorídrico (HF). As medidas de segurança adotadas para o manuseio do produto foram a utilização de luvas de PVC e de uma capela com exaustão de gases.

A fibra com a rede sensora foi colocada em uma haste de PVC, que não sofre ataque químico do ácido fluorídrico, de modo que a região gravada da fibra ficasse imersa em um recipiente contendo o ácido em uma concentração aproximada de 40%. As dimensões da haste são 18 cm de comprimento e 1 cm de largura, sendo que a sua extremidade apresenta um formato de garfo trinchante, onde a fibra ficava exatamente no meio dos seus dois dentes e assim tinha um

contato maior com as soluções nas suas respectivas etapas de imersão. A Figura 9 mostra a fibra em processo de corrosão no ácido.



Figura 9 - Processo de corrosão da fibra em ácido fluorídrico.

Com base em trabalhos anteriores realizados no grupo de pesquisa (COROTTI, 2015; KUHNE, 2016), a exposição ao ácido deveria ocorrer em um intervalo aproximado de 77 minutos para reduzir-se o diâmetro a aproximadamente 15 μm . Neste diâmetro a rede apresenta sensibilidade ao índice de refração suficiente para aplicações como sensor, com vantagem de ter uma robustez mecânica superior àquelas gravadas em fibra monomodo. Para encerrar o processo de corrosão a rede foi imersa em uma solução básica de hidróxido de sódio (NaOH), ocorrendo assim a neutralização do ácido presente na fibra. Todo o procedimento foi acompanhado no OSA.

A Figura 10 representa a imagem da fibra corroída obtida com o auxílio de um microscópio ótico (Olympus BX51RF). O diâmetro da fibra foi medido cinco vezes com o equipamento e apresentou um valor médio de $(18,7 \pm 0,1) \mu\text{m}$.

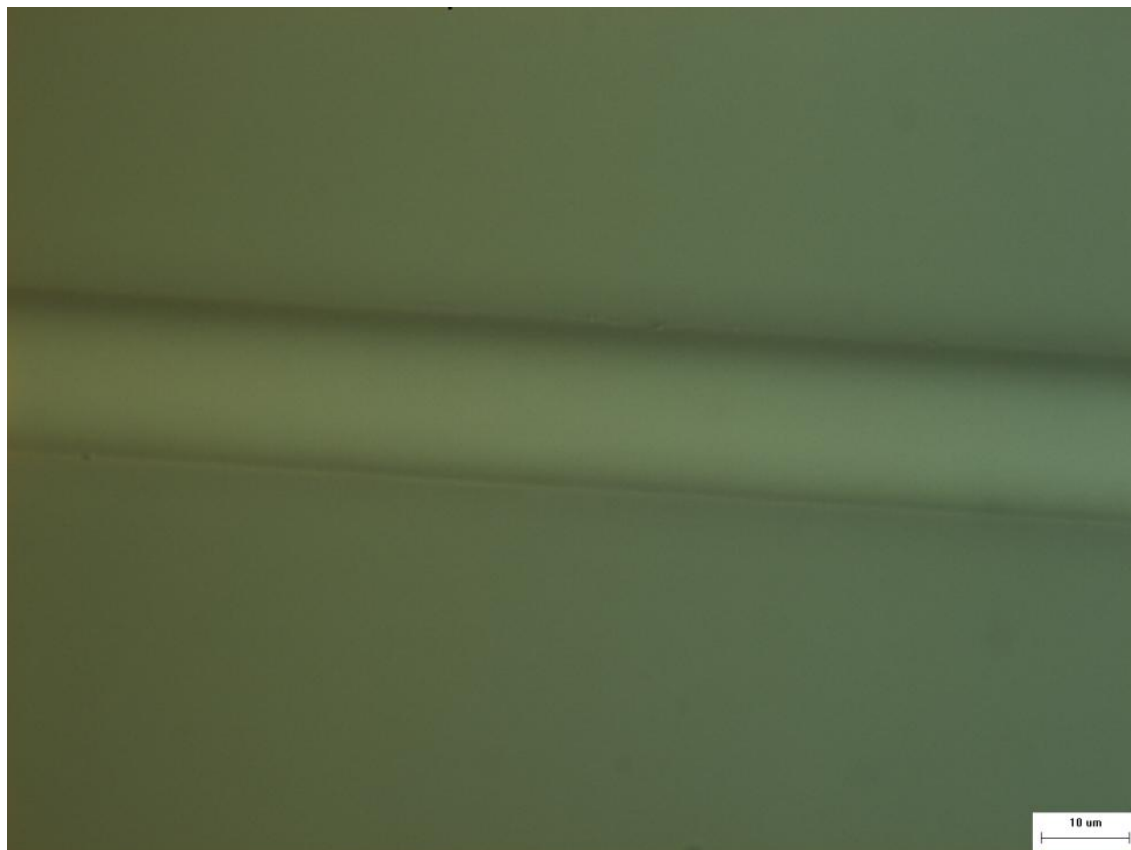


Figura 10 - Imagem da fibra corroída obtida em um microscópio. O seu diâmetro medido foi de 18,73 µm.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE BRAGG EM ÍNDICE DE REFRAÇÃO E TEMPERATURA

Para a caracterização da resposta da rede a variações do índice de refração e da temperatura foram utilizadas amostras de água e glicerina nas concentrações de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80% de glicerina (com uma incerteza de 0,1% v/v) e as temperaturas escolhidas foram de 15, 20, 25, 30, 35, 40 e 45 °C (com incerteza de 0,1 °C). As amostras foram inseridas em tubos de ensaios com dimensões de 1,1 cm de diâmetro e 14,2 cm de comprimento.

Como em cada temperatura as amostras apresentam um índice de refração diferente, esse parâmetro foi medido com um refratômetro de bancada *ABBE*[®] (Biobrix - 2WAJ, com resolução de $\pm 2 \times 10^{-4}$), acoplado a um banho térmico (Lauda[®] – EcolineStaredition E200, com resolução de 0,01 °C). As medidas de índice de refração foram realizadas nas mesmas temperaturas utilizadas na caracterização da rede.

Para a caracterização da rede, cada um dos tubos de ensaio contendo as amostras foi inserido no banho térmico e então a haste de PVC com a fibra foi

inserida no interior do tubo de ensaio. A Figura 11 mostra o sistema de caracterização. O isopor (poliestireno expandido) contribui para a estabilidade mecânica e térmica do sistema.



Figura 11 - Rede sensora em um tubo de ensaio mergulhado no banho térmico.

Entre as medidas como diferentes concentrações de glicerina a fibra foi submetida a um processo de limpeza utilizando água. Para avaliar se o sensor estava completamente limpo considerou-se como referência o espectro da rede na amostra de 0% de glicerina em água a 22 °C. Desse modo, a limpeza (feita com água) foi considerada completa no instante em que as características espectrais da rede voltaram à condição inicial de 0% de glicerina em água a uma temperatura de 22 °C. Posteriormente eliminava-se o excesso de água da limpeza na haste de PVC com um pequeno ventilador.

Os comprimentos de onda foram mensurados com o auxílio de um interrogador *Micron Optics*[®] *SM130*, simultaneamente conectado a um computador, e ao banho térmico. Através do aplicativo “Sistema de calibração e medição de temperatura”, desenvolvido pelo colega de mestrado André Biffe de Renzo, foram configuradas rampas de aquecimento e resfriamento, de 15 a 45 °C, com passo de 5 °C, em cinco repetições, na condição de reprodutibilidade. Em cada temperatura foi estabelecido o tempo de parada em 10 minutos, de forma a garantir a estabilidade térmica do sistema.

Todas as medidas geraram uma curva espectral de refletividade (unidades arbitrárias) em função de comprimento de onda (nm), cujos valores foram gravados em um documento de texto, que puderam ser analisados com o auxílio de um *software*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados encontrados em laboratório para todos os procedimentos anteriormente descritos. A Figura 12 mostra os índices de refração das amostras de água e glicerina em função da concentração de glicerina e da temperatura, ajustados em uma função polinomial de segunda ordem.

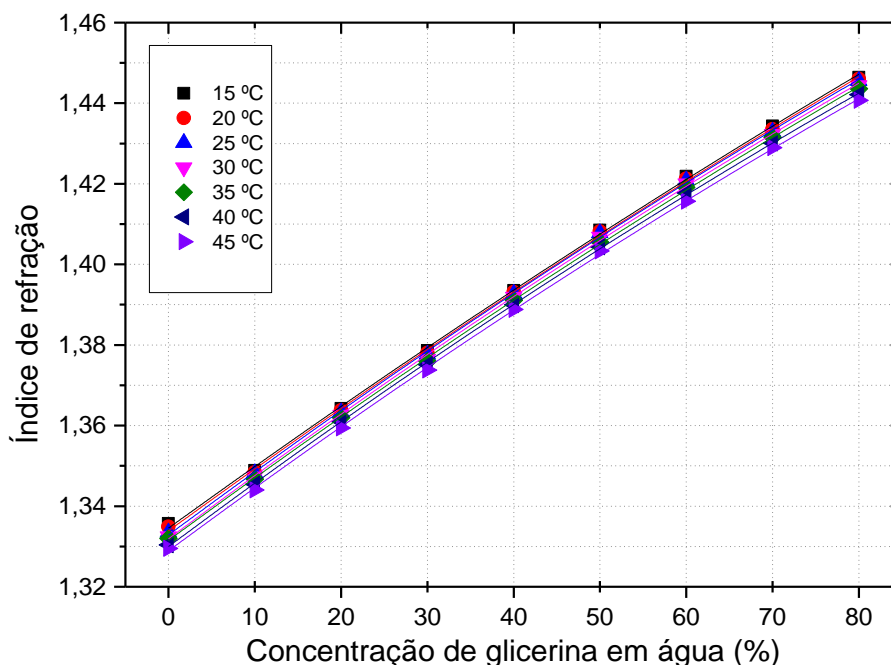


Figura 12 - Índice de refração em função da concentração de glicerina em água em cada uma das temperaturas adotadas, já com a aproximação a um polinômio do segundo grau.

Do mesmo conjunto de dados é possível encontrar as curvas dos índices de refração em função da temperatura, para cada uma das concentrações. O comportamento de cada uma das amostras foi uma diminuição do índice de refração em função do aumento de temperatura. Observou-se uma maior variação de índice para as curvas com menor concentração de glicerina. A Figura 13 mostra o índice de refração de cada uma das amostras em função da temperatura, com sua respectiva regressão linear. A Tabela 1 - Regressão linear do índice de refração em função da temperatura apresenta os coeficientes angulares das retas ajustadas.

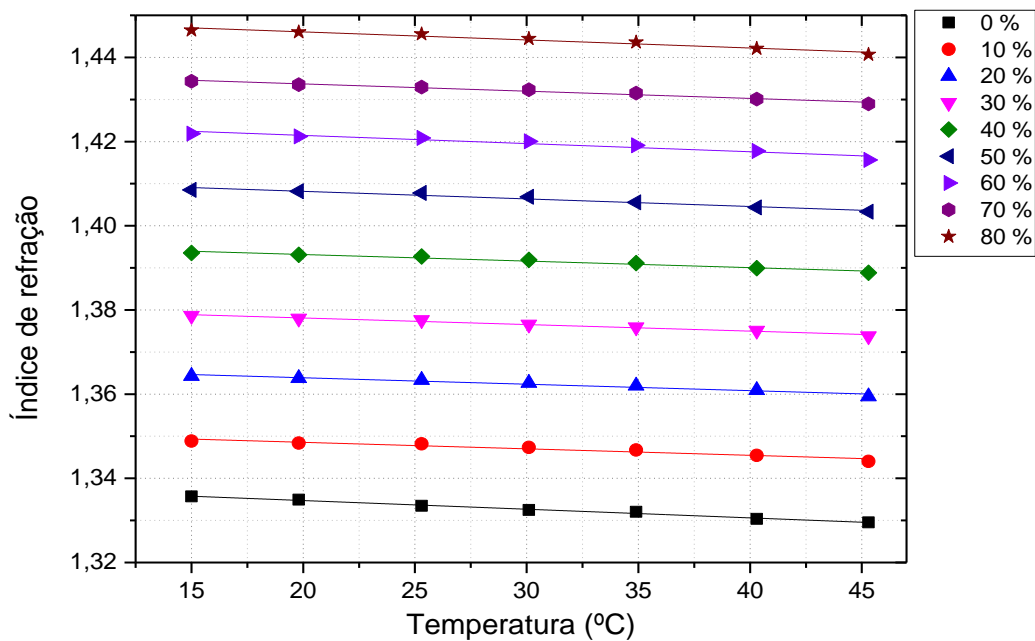


Figura 13 - Índice de refração de cada uma das amostras em função da temperatura.

Tabela 1 - Regressão linear do índice de refração em função da temperatura

Concentração %	$n = pT + q$	
	p (UIR / °C)	q
0	$-2,06 \cdot 10^{-4} \pm 8,50 \cdot 10^{-6}$	$1,3388 \pm 2,6996 \cdot 10^{-4}$
10	$-1,54 \cdot 10^{-4} \pm 1,82 \cdot 10^{-5}$	$1,3516 \pm 5,7709 \cdot 10^{-4}$
20	$-1,53 \cdot 10^{-4} \pm 1,53 \cdot 10^{-5}$	$1,3669 \pm 4,8736 \cdot 10^{-4}$
30	$-1,56 \cdot 10^{-4} \pm 1,03 \cdot 10^{-5}$	$1,3812 \pm 3,2584 \cdot 10^{-4}$
40	$-1,56 \cdot 10^{-4} \pm 1,33 \cdot 10^{-5}$	$1,3963 \pm 4,2348 \cdot 10^{-4}$
50	$-1,80 \cdot 10^{-4} \pm 1,71 \cdot 10^{-5}$	$1,4118 \pm 5,4332 \cdot 10^{-4}$
60	$-1,94 \cdot 10^{-4} \pm 2,39 \cdot 10^{-5}$	$1,4254 \pm 7,5734 \cdot 10^{-4}$
70	$-1,72 \cdot 10^{-4} \pm 1,22 \cdot 10^{-5}$	$1,4371 \pm 3,8678 \cdot 10^{-4}$
80	$-1,91 \cdot 10^{-4} \pm 1,79 \cdot 10^{-5}$	$1,4499 \pm 5,6706 \cdot 10^{-4}$

A Figura 14 mostra o espectro de reflexão da rede de Bragg gravada em uma fibra multimodo após a corrosão, imersa em água a 22 °C. É possível observar três modos com maior refletividade, os quais foram chamados 1, 2 e 3. Este foi o espectro utilizado como referência no processo de limpeza da fibra.

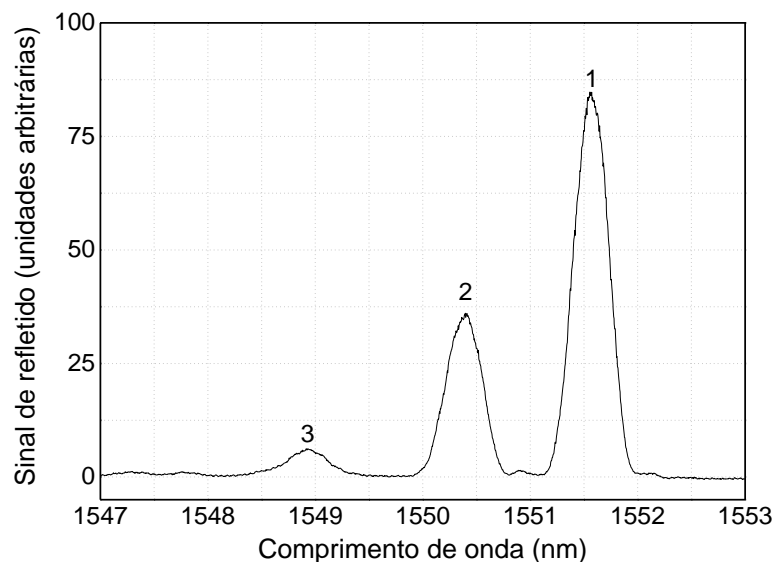


Figura 14 - Espectro de reflexão adquirido a partir de uma rede de Bragg gravada em uma fibra multimodo após o processo de corrosão, em água a uma temperatura de 22 °C.

É importante ressaltar que durante o processo de calibração do dispositivo, uma importante questão foi o cuidado com a temperatura inicial e também com a deformação mecânica. Pequenas alterações nesses parâmetros resultam em uma mudança na posição inicial do comprimento de onda Bragg, resultando em erros na resposta do dispositivo. A temperatura inicial foi bem controlada pela boa precisão do banho térmico. Já a deformação mecânica foi controlada através de encaixes entre tubos e hastes isolados por materiais com bom amortecimento de vibração, como a cola quente e borrachas. Além disso, o uso do isopor como sustentação do tubo de ensaio no banho térmico retirou o seu contato direto com a vibração do motor do equipamento e sua bomba d'água.

De acordo com as observações feitas nos resultados das medições, foi necessário dividir a atividade de calibração em algumas etapas. Em um primeiro momento foram feitos estudos da rede sensora utilizando as variações apenas em índice de refração. Para tanto, foram utilizadas as medições em um ambiente de temperatura constante de $22 \pm 0,5$ °C. A Figura 15 mostra o comprimento de onda

da rede de Bragg dos modos 1, 2 e 3 em função do aumento do índice de refração das amostras.

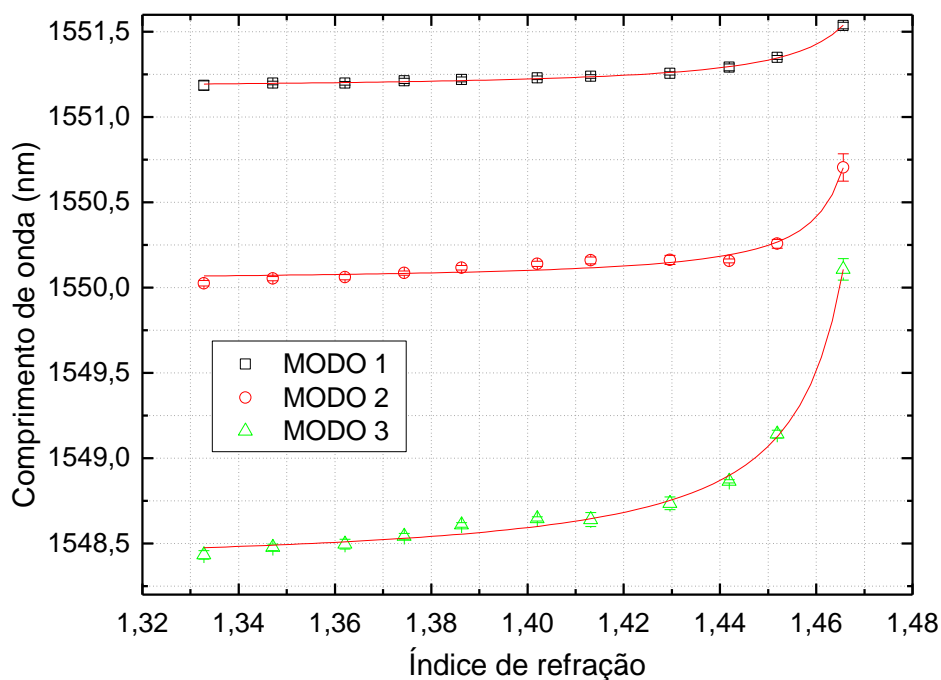


Figura 15 - Comprimento de onda de cada um dos modos encontrados em função do índice de refração, com temperatura de $22 \pm 0,5$ °C.

A curva de calibração foi obtida a partir de um ajuste empírico utilizando a hipérbole, representada pela equação (13):

$$\lambda_B = a + \frac{b}{n + c} \quad (13)$$

em que λ é o comprimento de onda (nm), n é o índice de refração e a , b e c são os parâmetros de ajuste. A Tabela 2 apresenta os parâmetros encontrados para cada um dos três modos.

Tabela 2 - Parâmetros encontrados na aproximação para uma hipérbole, utilizando os dados da Figura 15

	a (nm)	b (nm)	c
Modo 1	1548.34 ± 0.03	0.019 ± 0.002	-1.476 ± 0.003
Modo 2	1550.03 ± 0.02	0.005 ± 0.002	-1.473 ± 0.005
Modo 3	1551.16 ± 0.01	0.005 ± 0.001	-1.479 ± 0.002

É apresentada na Figura 16 a sensibilidade de cada modo, que representa a taxa de variação do comprimento de onda em função do índice de refração do meio em que a FBG é imersa e é obtida a partir da derivada da equação (13), resultando em $d\lambda_B / dn = -b \cdot n / (n + c)^2$. Os resultados mostram que a sensibilidade do modo 3 foi a maior encontrada, 134 nm/UIR, enquanto as sensibilidades dos modos 2 e 1 foram, respectivamente, 69 nm/UIR e 24 nm/UIR para um índice de refração igual a 1,4656.

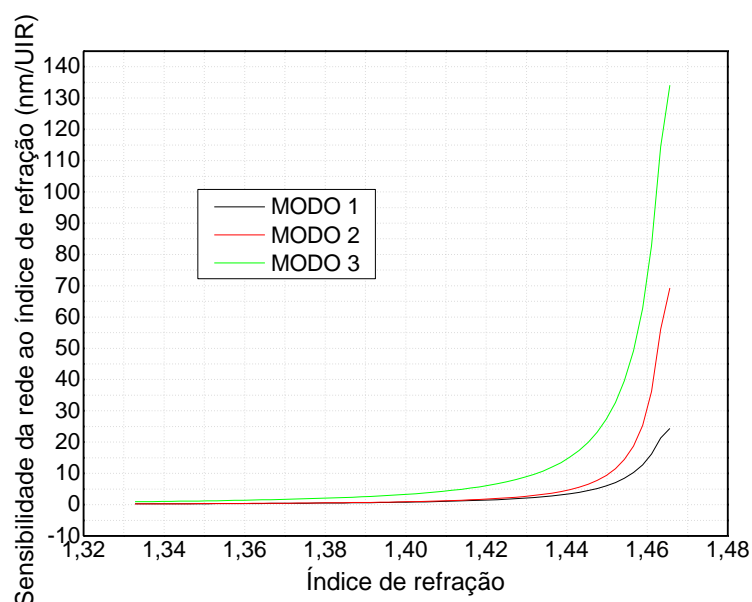


Figura 16 - Sensibilidade da rede ao índice de refração quando a temperatura é de $22 \pm 0,5$ °C.

O comprimento de onda também pode variar devido a uma deformação mecânica. Uma forma de determinar o índice de refração de forma independente da deformação mecânica inicial é através da separação entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3, que apresenta uma maior variação, bem como uma maior sensibilidade quando comparada as demais. A Figura 17 apresenta os resultados encontrados para essa diferença de comprimento de onda, onde a curva é o ajuste empírico utilizando a equação (13), e os parâmetros de ajuste são $a = 2,819 \pm 0,024$ nm, $b = -0,014 \pm 0,002$ nm e $c = -1,476 \pm 0,002$.

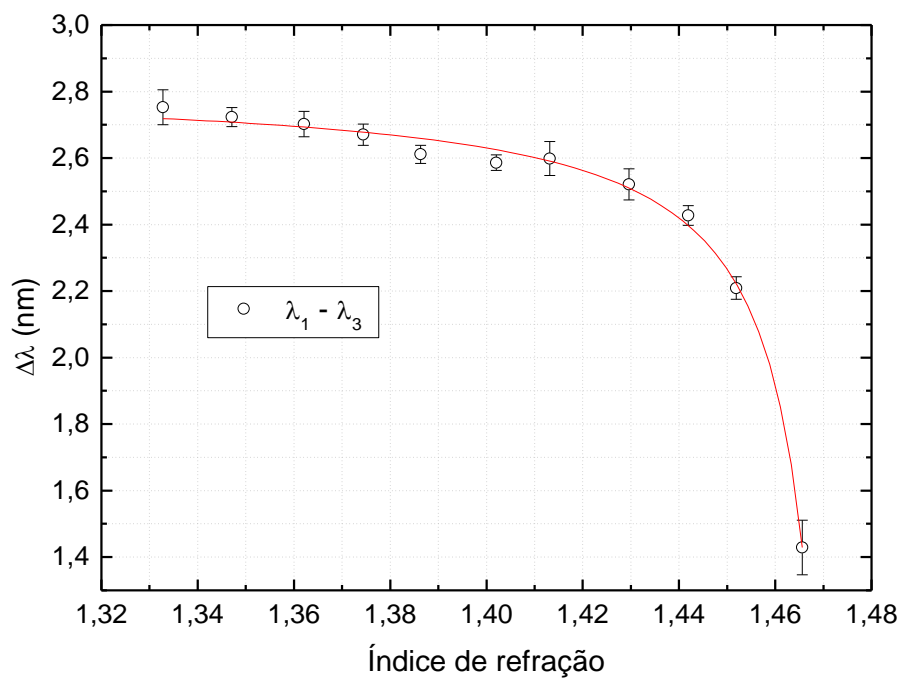


Figura 17 - Separação entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3 e a aproximação para uma hipérbole.

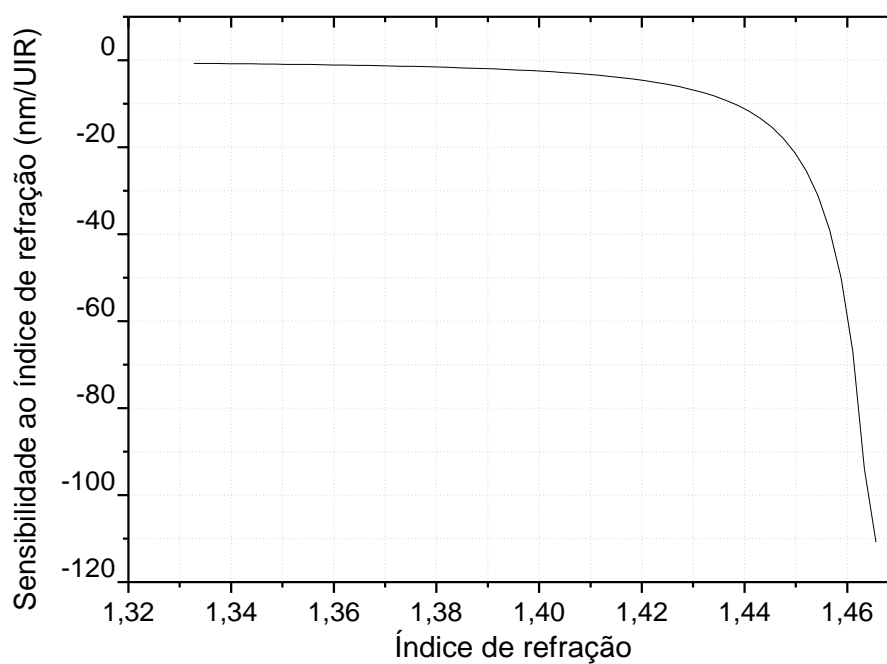


Figura 18 - Sensibilidade ao índice de refração da diferença entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3, quando a temperatura é constante em $22 \pm 0,5$ °C.

Com essa nova curva de calibração que apresenta a diferença entre os comprimentos de onda 1 e 3, em relação à posição inicial do primeiro modo, é encontrada a sensibilidade ao índice de refração, que é dada pela Figura 18.

A sensibilidade ao índice obtida utilizando esse método foi de 110 nm / UIR (para IR = 1,4656). Este resultado está na mesma ordem de grandeza da sensibilidade obtida considerando apenas o modo 3 (134 nm / UIR).

A resolução do sensor, nesta situação, é obtida através da divisão do comprimento de onda de estabilidade do OSA pela curva de sensibilidade encontrada. A Figura 19 mostra a resolução como uma função do índice de refração externo. A melhor resolução obtida foi de $4,5 \times 10^{-5}$ UIR para um índice de refração externo de 1,4656.

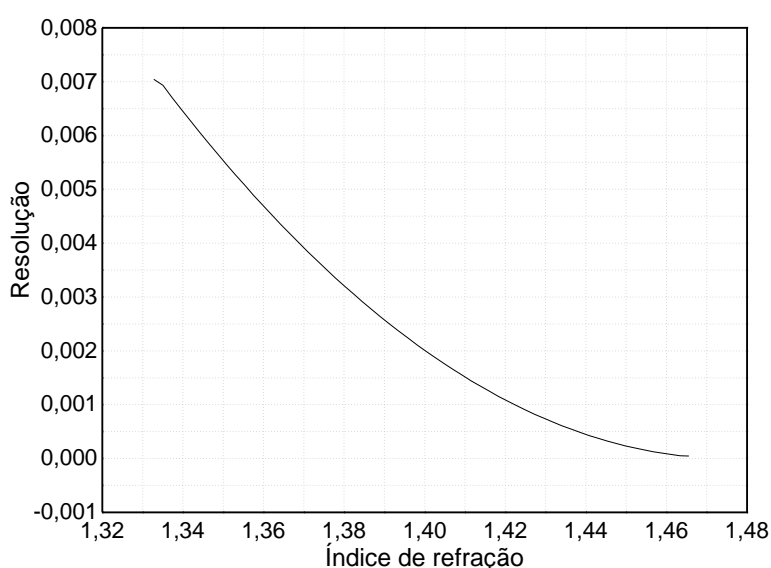


Figura 19 - Resolução do sensor utilizando a variação entre os modos 1 e 3.

Assim, o primeiro resultado encontrado mostra que a separação entre o comprimento de onda de modos diferentes faz com que a sensibilidade alcançada seja de 110 nm / UIR, com índice de refração externo igual a 1,4656, e a resolução do sensor foi de $4,5 \times 10^{-5}$.

Entretanto, apesar desses interessantes resultados, percebeu-se uma grande dificuldade nas medições dos comprimentos de onda do terceiro modo, devido ao fato de ter intensidade de refletividade menor que os dois primeiros modos. Este aspecto é intensificado em medidas de índice de refração mais altas,

pois o aumento do índice de refração diminui a refletividade, aumentando a incerteza na determinação do comprimento de onda.

Para a determinação da influência da temperatura na sensibilidade ao índice de refração, foi analisada a resposta da rede a este parâmetro quando a temperatura da amostra varia entre 15 e 35 °C. A Figura 20 mostra o comprimento de onda dos dois primeiros modos em função do índice de refração aplicado a cada uma das temperaturas adotadas.

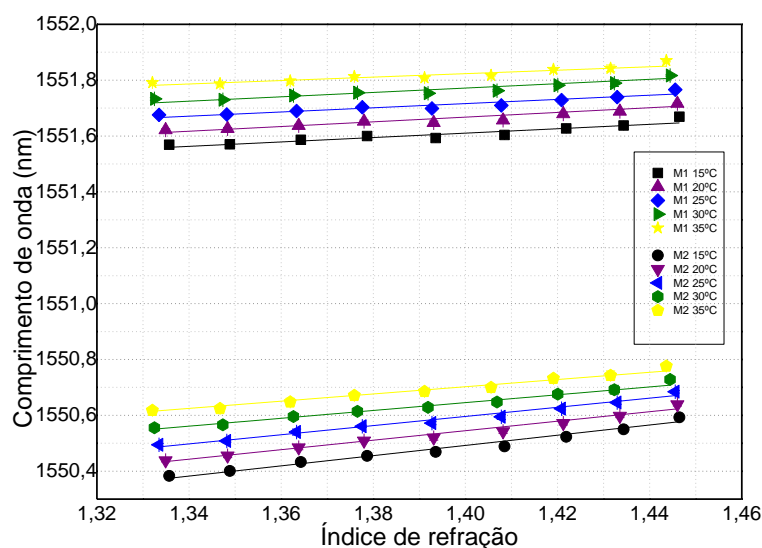


Figura 20 - Comprimento de onda dos dois primeiros modos do sensor, em diferentes temperaturas.

Observou-se que a inclinação de cada uma das retas linearizadas não permaneceu a mesma para cada uma das situações. Para analisar melhor esse efeito, foi feita a diferença entre os comprimentos de onda do primeiro e segundo modos. Esse fato é explicado pelo índice de refração medido estar diretamente relacionado com o índice de refração efetivo da fibra. Como a sílica tem coeficiente termo-ótico positivo, um aumento da temperatura provoca uma diminuição do campo evanescente, que pode reduzir a sensibilidade rede de Bragg para as alterações de índices de refração das amostras.

As diferenças de comprimento de onda observados no modo 2, devido ao aumento de índice de refração para as diferentes temperaturas estão apresentadas na Figura 21. Nesta figura, as linhas sólidas são as funções empíricas utilizadas para obter as curvas de sensibilidade. Estas curvas mostram que as diferenças de comprimento de onda diminuem com o aumento da temperatura. As barras de erro

são as incertezas padrão combinadas e foram calculados de acordo com as incertezas padrão inerentes, tanto aos desvios padrão experimentais da média de comprimento de onda da FBG, medido cinco vezes na condição de repetibilidade, bem como a incerteza de resolução do OSA, a incerteza encaixe Gaussiana utilizada para determinar o comprimento de onda da FBG e o erro de limite inerente às medições de índice de refração.

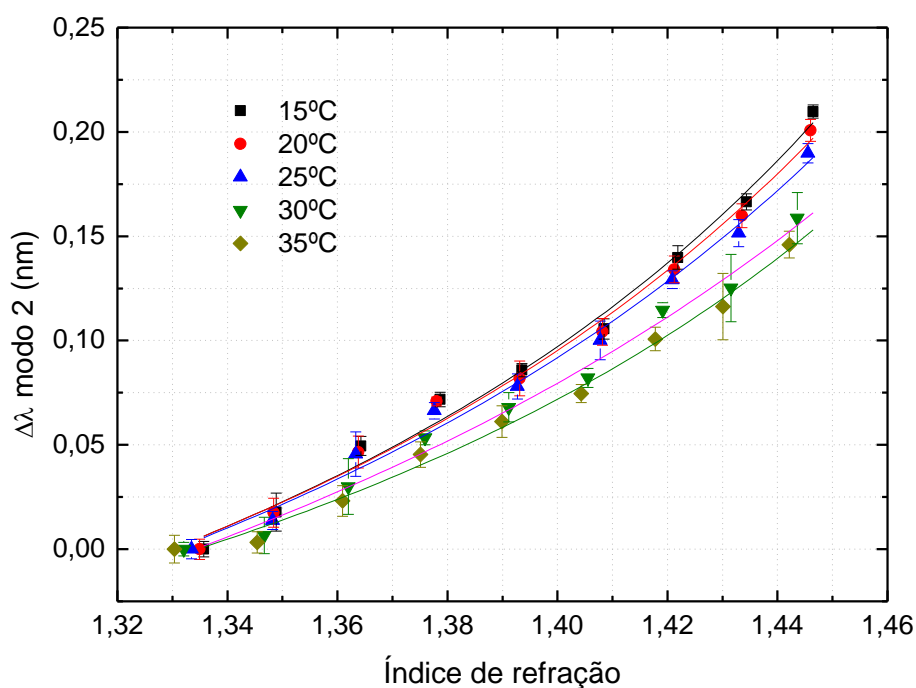


Figura 21 - Diferença entre os comprimentos de onda para o modo 2 em função de índice de refração e temperatura.

A Figura 22 mostra a sensibilidade do modo 2 como uma função do índice de refração e temperatura. Estas curvas de sensibilidade foram obtidas a partir da diferenciação das funções empíricas observadas na Figura 21. Ao comparar estas cinco curvas de sensibilidade, adquiridas nas temperaturas entre 15 ° C e 35 ° C, é observado que a sensibilidade do modo 2 diminui, principalmente para temperaturas mais elevadas.

A resposta do sensor às alterações do índice de refração pode também ser obtida a partir da diferença entre as posições dos picos de modo 2 e modo de 1 ($\lambda_2 - \lambda_1$). O aumento dessa diferença, em função do índice de refração e temperatura, é apresentado na Figura 23. A regressão linear foi aplicada e resultou em coeficientes de correlação entre -0,99713 e -0,99895.

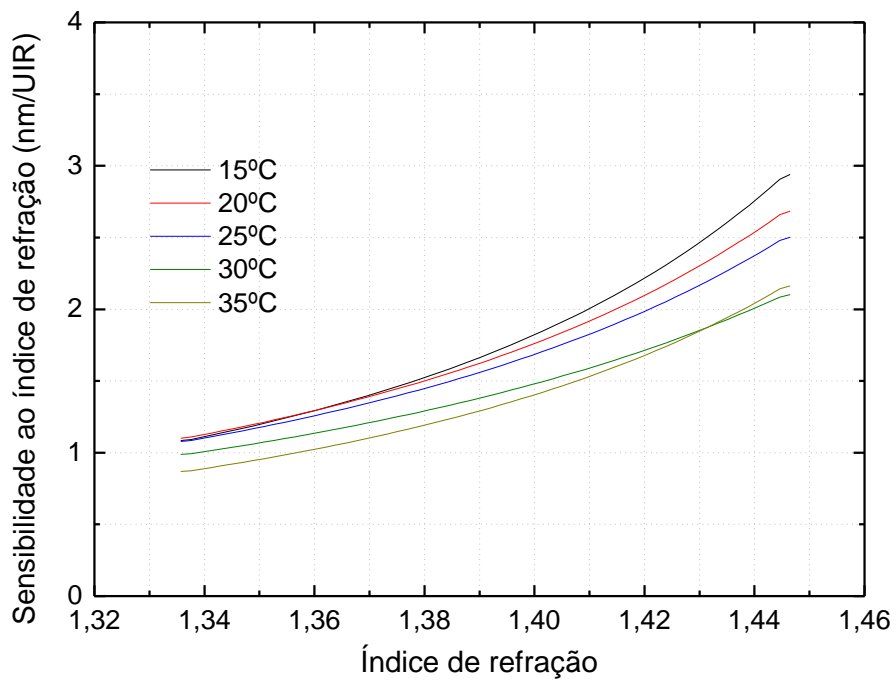


Figura 22 - Sensibilidade do modo 2 em relação com o índice de refração e temperatura.

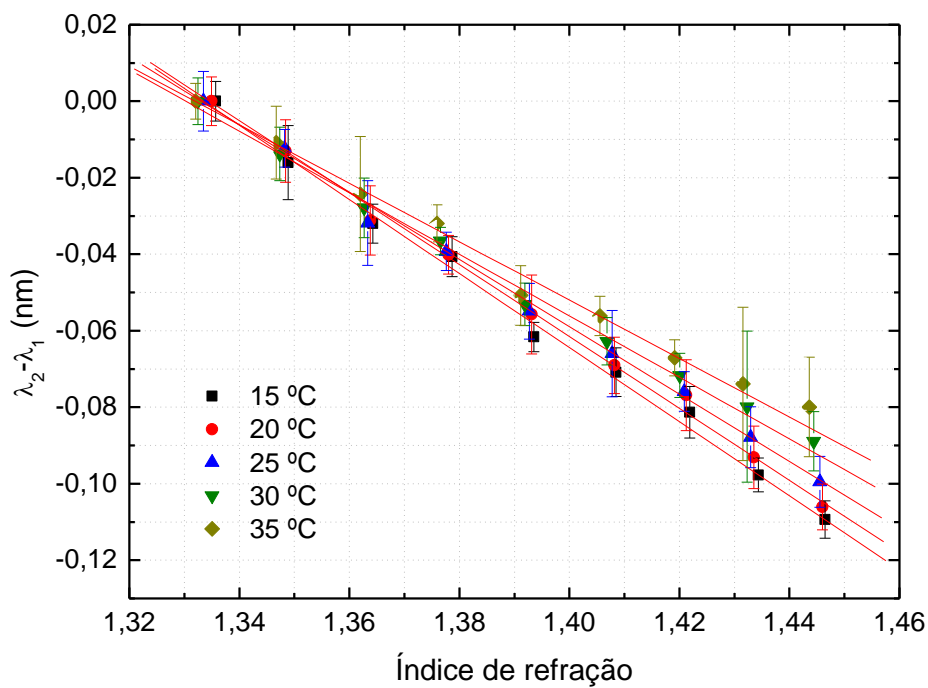


Figura 23 - A diferença entre as posições dos picos de modo 2 e modo 1 em relação à índice de refração e temperatura.

A Figura 24 apresenta as alterações de sensibilidade de índice de refração médias como uma função da temperatura. A sensibilidade média absoluta ao índice de refração reduz de $0,97 \pm 0,05$ nm / UIR para $0,76 \pm 0,07$ nm / UIR quando a temperatura aumenta de 15°C até 35°C , com uma redução de $0,2$ nm / UIR e uma taxa de $0,010 \pm 0,004$ nm / (UIR $^\circ\text{C}$). Os coeficientes da regressão linear da sensibilidade cruzada de índice de refração com temperatura encontram-se na Tabela 3. A diminuição da sensibilidade do índice de refração com o aumento de temperatura pode ser explicada pela diminuição do campo evanescente. O aumento na temperatura provoca um aumento no índice de refração da fibra e, por outro lado, um decréscimo no índice de refração circundante a ela, resultando numa diferença numérica de sensibilidade térmica. Como resultado, o campo evanescente se torna mais confinado e há diminuição da sensibilidade ao índice de refração.

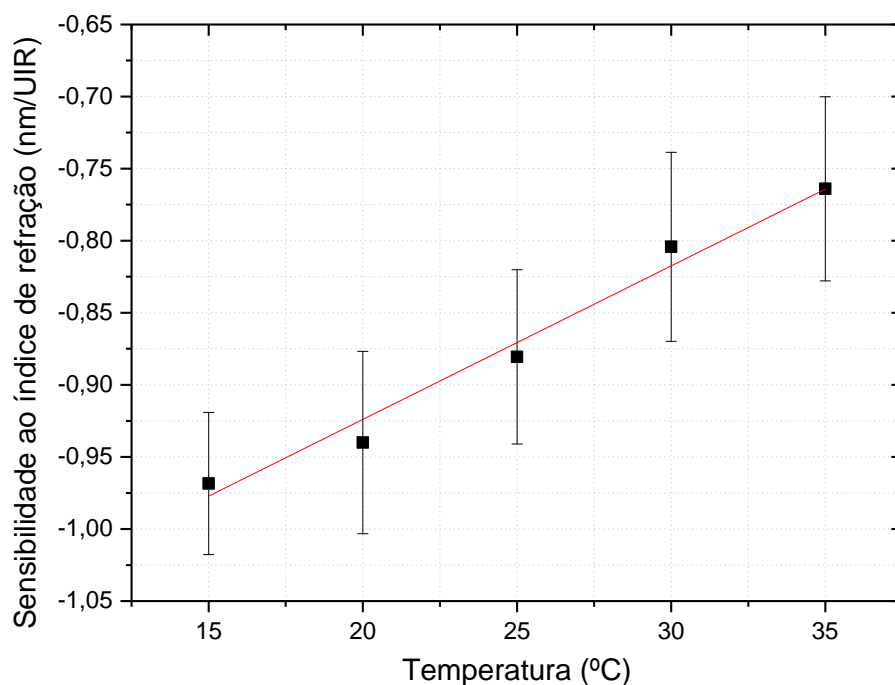


Figura 24 - Sensibilidade da FBG ao índice de refração em função da temperatura.

Tabela 3 - Regressão linear da sensibilidade cruzada do índice de refração com temperatura.

Modo	$k_{nT} = aT + b$	
	a (nm/UIR $^\circ\text{C}$)	b (nm/UIR)
2-1	$0,01065 \pm 0,00085$	$-1,13695 \pm 0,02111$

Devido ao fato desta fibra ter baixa sensibilidade ao índice de refração, o efeito do aumento da temperatura sobre a sensibilidade do índice de refração não pode ser desprezado, portanto, deve ser considerado nas curvas de calibração, a fim de melhorar a precisão durante as medidas de índice de refração.

Com base nesse estudo sobre sensibilidade cruzada, que mostrou que a variação de temperatura interfere na sensibilidade da fibra ao índice de refração, investigou-se a possibilidade da variação de índice de refração interferir na sensibilidade térmica do sensor.

Com a Figura 20 como referência, porém invertendo o eixo das abscissas de índice de refração para temperatura, a Figura 25 apresenta a diferença entre o comprimento de onda do primeiro e segundo modos em função da temperatura, para valores constantes das concentrações de glicerina em água.

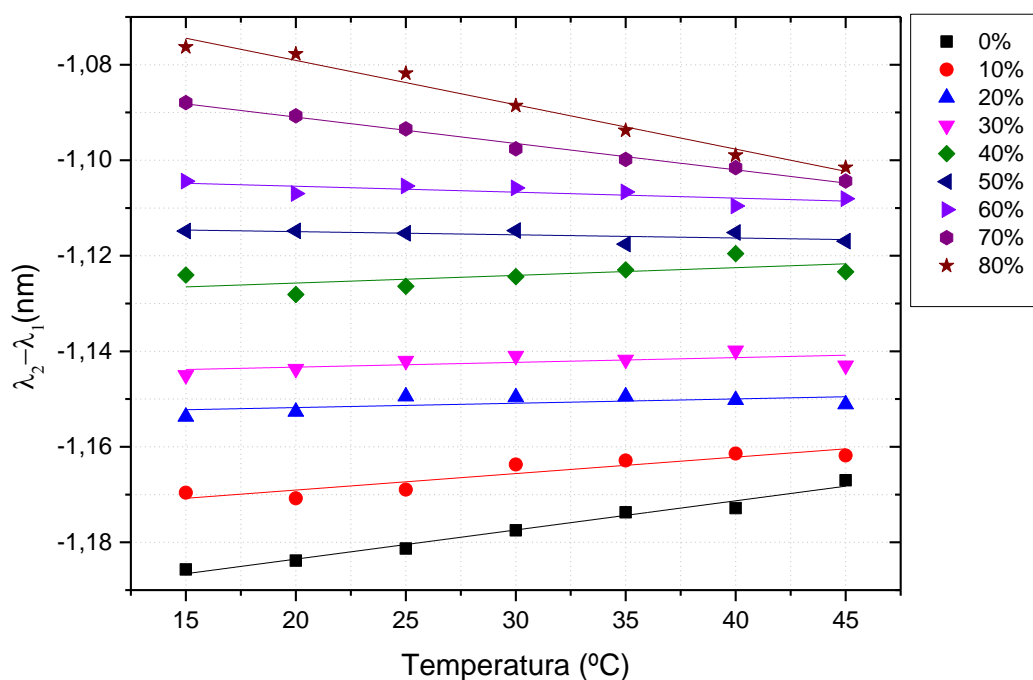


Figura 25 - Diferença entre o comprimento de onda do primeiro e segundo modos em função da temperatura, para as diferentes amostras de água e glicerina.

É possível observar uma variação na inclinação de cada uma das retas encontradas na regressão linear. O coeficiente angular de cada uma dessas retas é a sensibilidade térmica da rede quando o meio externo varia nas diferentes amostras.

Para quantificar a interferência de sensibilidade cruzada que o índice de refração causa na sensibilidade térmica, colocou-se cada uma das inclinações das retas encontradas na Figura 25 em um gráfico. Assim, a Figura 26 apresenta a sensibilidade térmica da diferença dos modos 1 e 2 em função do índice de refração, sendo cada um de seus valores aproximado por uma reta encontrada através da regressão linear.

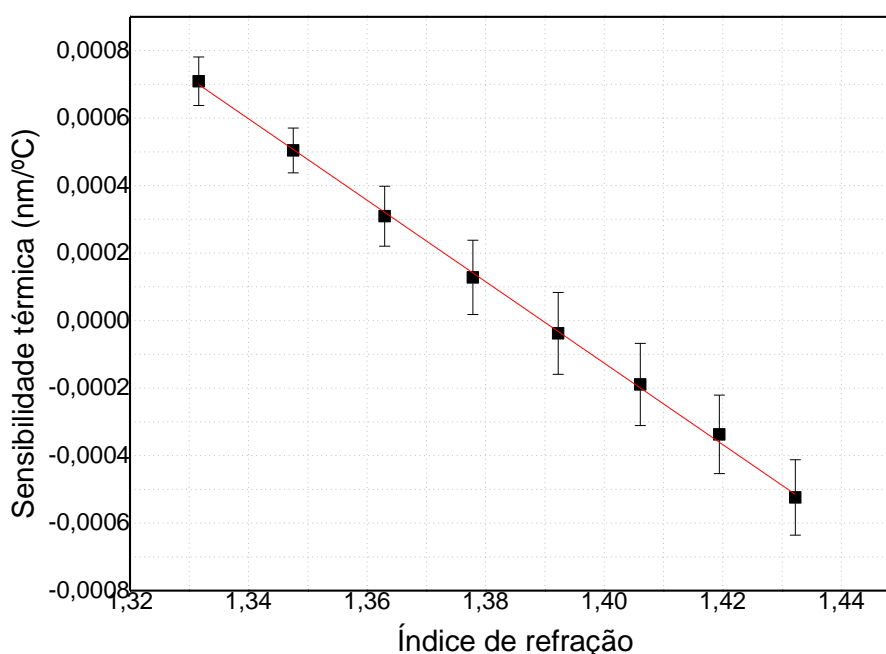


Figura 26 - Sensibilidade térmica da FBG em função do índice de refração.

Após esse levantamento, é possível compreender que há efeito de sensibilidade cruzada ao analisar simultaneamente temperatura e índice de refração. A Tabela 4 mostra os valores dos coeficientes encontrados para a regressão linear da sensibilidade térmica em função da variação do índice de refração do meio (k_{tn}).

Tabela 4 - Regressão linear da sensibilidade cruzada da temperatura com o índice de refração.

Modo	$k_m = an + b$	
	a (nm/UIR°C)	b (nm/°C)
1-2	$-0,01206 \pm 1,31878 \cdot 10^{-4}$	$0,01676 \pm 1,80694 \cdot 10^{-4}$

Segundo Cao em um modelo similar de análise, com observações de dois comprimentos de onda distintos, é possível escrever uma equação matricial que entregue o valor do comprimento de onda de cada modo em função do índice de refração e da temperatura, mostrada na equação (16) (CAO *et al.*, 2015).

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{T1} & K_{n1} \\ K_{T2} & K_{n2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix}, \quad (16)$$

onde K_T e K_n são as sensibilidades à temperatura e ao índice de refração, respectivamente. É possível, então, escrever n e T em função dos demais parâmetros:

$$\begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta n \end{bmatrix} = \frac{1}{K_{T1} \cdot K_{n2} - K_{T2} \cdot K_{n1}} \cdot \begin{bmatrix} K_{n2} & -K_{n1} \\ -K_{T2} & K_{T1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta\lambda_1 \\ \Delta\lambda_2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Desse modo, vem que:

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T1} \cdot K_{n2} - K_{T2} \cdot K_{n1}} \cdot (K_{n2} \cdot \Delta\lambda_1 - K_{n1} \cdot \Delta\lambda_2) \quad (18)$$

e

$$\Delta n = \frac{1}{K_{T1} \cdot K_{n2} - K_{T2} \cdot K_{n1}} \cdot (-K_{T2} \cdot \Delta\lambda_1 + K_{T1} \cdot \Delta\lambda_2). \quad (19)$$

Assim, tem-se uma expressão que aponta os valores de n e T . Analogamente, neste trabalho utilizou o mesmo conceito para encontrar n e T , porém, não tratando as sensibilidades como constantes e sim como funções. Além disso, foi reescrita a função de modo similar a uma equação de planos, descrita pela equação (20):

$$n = z_o + a\lambda + bT \quad (20)$$

em que as constantes estão diretamente relacionadas com as sensibilidades térmica e ao índice de refração. Substituindo pelos termos adequados encontra-se:

$$n = n_o - \frac{\lambda_o}{K_n} + \frac{1}{K_n} \lambda + \frac{K_T}{Kn} T \quad (21)$$

Como as sensibilidades foram escritas como funções lineares, a equação fica:

$$n = n_o - \frac{\lambda_o}{a_n T + b_n} + \frac{1}{a_n T + b_n} \lambda + \frac{a_T n + b_T}{a_n T + b_n} T \quad (22)$$

Deste ponto em diante, pôde-se interpretar que para os modos 1 e 2 é conveniente utilizar uma aproximação plana para $n(\lambda, T)$. É preciso destacar que devido ao fato das sensibilidades variarem muito facilmente, a aproximação encontrará valores médios das mais variadas amostras computadas.

A Figura 27 e a Figura 28 mostram o a planificação gerada computacionalmente para o primeiro e o segundo modos, respectivamente, deixando n em função dos parâmetros λ (nm) e T (°C).

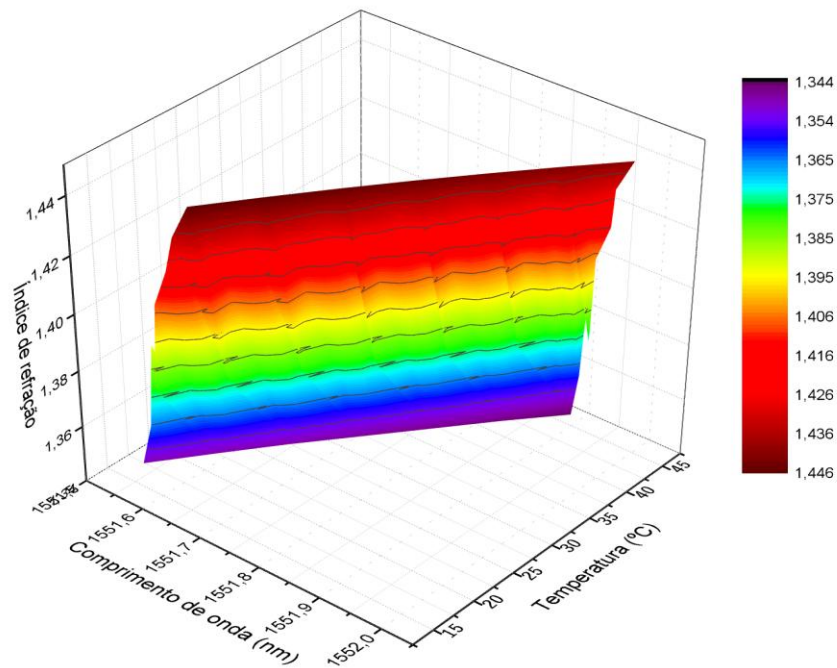


Figura 27 - Planificação do primeiro modo da fibra, sendo o índice de refração uma função do comprimento de onda λ_1 e da temperatura.

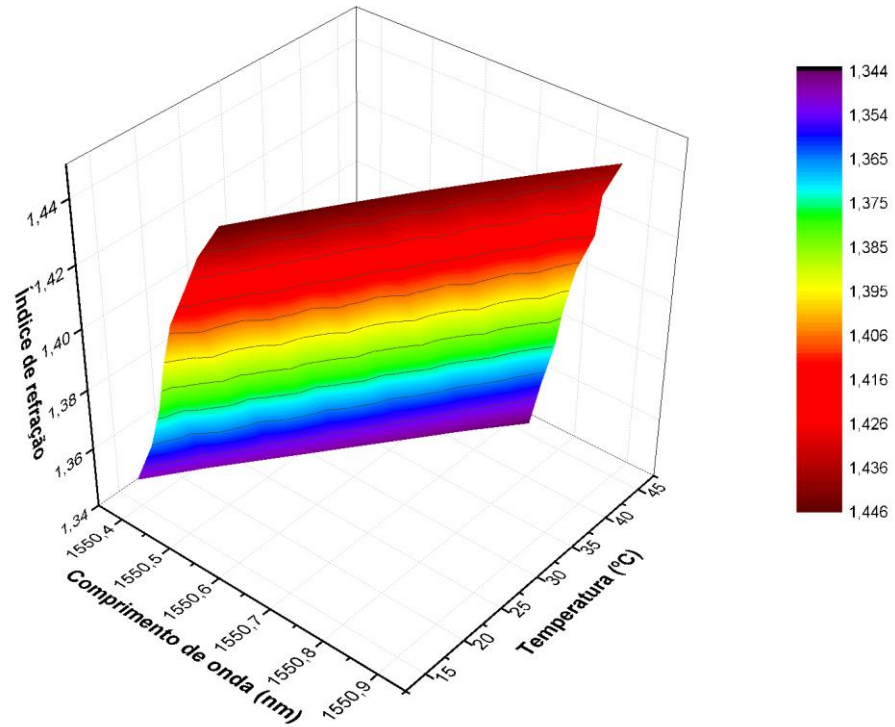


Figura 28 - Planificação do segundo modo da fibra, sendo o índice de refração uma função do comprimento de onda λ_2 e da temperatura.

Com base nestes dois planos, torna-se nítido que é possível encontrar tanto n quanto T utilizando um sistema de equações, pois tanto n quanto T são iguais para os comprimentos de onda dos modos 1 e 2.

Ao igualar as equações de cada um dos modos de propagação, com sensibilidades sendo constantes, é possível encontrar a temperatura de acordo com a expressão:

$$T = \frac{z_{02} - z_{01} + a_2 \lambda_2 - a_1 \lambda_1}{b_1 - b_2} \quad (23)$$

em que os coeficientes vem da equação (20).

Com base nessas informações, os valores encontrados serão apresentados de maneira sobreposta com os valores medidos, na Figura 29.

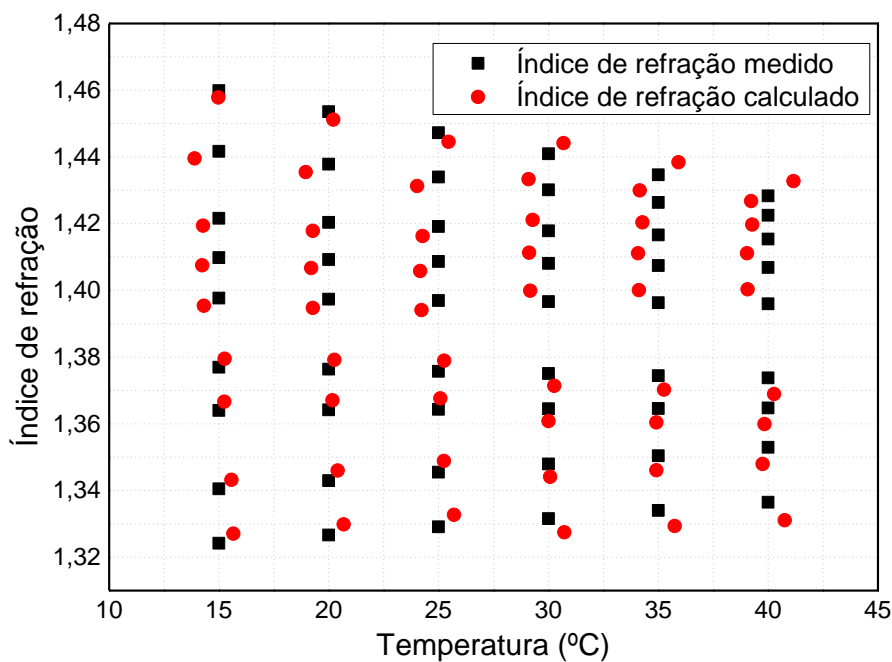


Figura 29 - Valores medidos (em preto) e calculados (em vermelho) para índice de refração e temperatura.

Observa-se que o conjunto de valores calculados está bem próximo ao conjunto dos valores medidos. Cabe agora analisar melhor a equação a fim de encontrar os valores dos erros.

A sensibilidade térmica, de um modo geral, acabou sendo bem menor do que a sensibilidade ao índice de refração. Então, para pequenas variações de temperatura (em até 2°C) o impacto no índice de refração é baixo. Esse fato poderá ser mais bem estudado construindo um plano que envolva índice de refração, temperatura e a diferença entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 2. A Figura 30 mostra essa planificação.

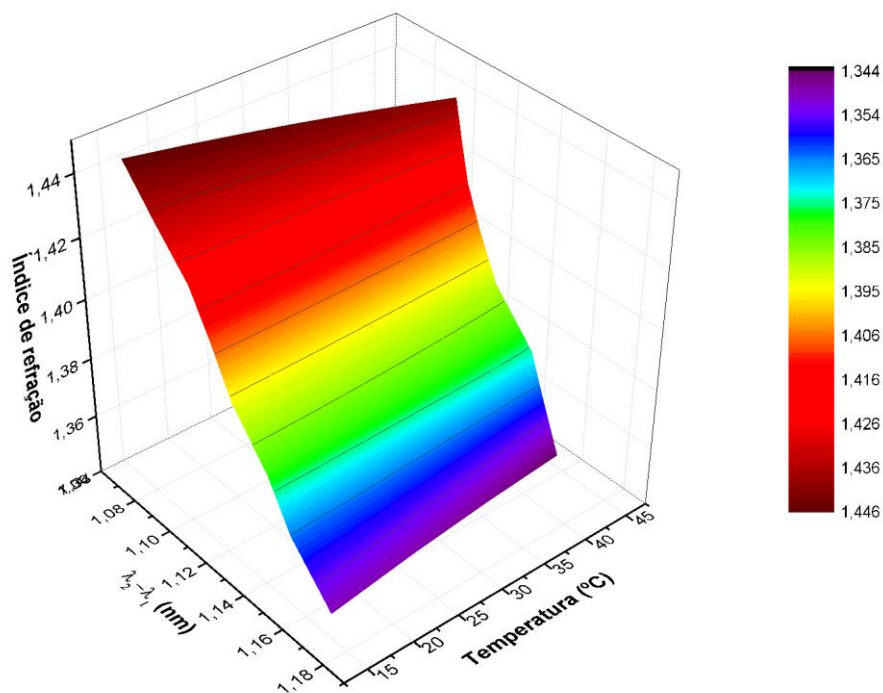


Figura 30 - Planificação da diferença entre os comprimentos de onda dos dois primeiros modos da fibra, sendo o índice de refração uma função da diferença comprimento de onda $\lambda_1 - \lambda_2$ e da temperatura.

Com este plano é possível analisar com uma riqueza de detalhes as questões das sensibilidades cruzadas. Antes, a Tabela 5 apresenta os valores dos coeficientes encontrados nas equações dos três planos.

Tabela 5 - Aproximação plana do índice de refração em função do comprimento de onda e temperatura.

Modo	$n = z_0 + a\lambda + bT$		
	z_0	a (UIR/nm)	b (UIR/°C)
M ₁	$-1941,7885 \pm 95,0871$	$1,2525 \pm 0,0613$	$-0,0137 \pm 6,8153 \cdot 10^{-4}$
M ₂	$-986,9197 \pm 24,5223$	$0,6375 \pm 0,0158$	$-0,0070 \pm 1,9182 \cdot 10^{-4}$
M ₁ -M ₂	$2,7467 \pm 0,0278$	$-1,1972 \pm 0,0246$	$-1,4146E-4 \pm 7,3765 \cdot 10^{-5}$

Primeiramente, pela equação do terceiro plano é possível observar que a temperatura tem um baixo coeficiente quando comparado com o coeficiente da variação do comprimento de onda. Isso reforça o fato de que é possível encontrar

um índice de refração sem ter que preocupar-se com uma pequena variação de temperatura.

Um segundo aspecto bem importante é uma possível comparação entre os valores encontrados para os coeficientes do plano com as sensibilidades cruzadas, já mencionadas. A Tabela 6 apresenta alguns dos valores aleatórios calculados para os coeficientes, para algumas das amostras. A última linha da tabela apresenta os valores médios de todas as amostras utilizadas no estudo.

Tabela 6 - Valores encontrados para os coeficientes do plano usando os valores das sensibilidades cruzadas.

Temperatura	IR	$n = z_o + a\lambda + bT$		
		z_o	a (UIR/nm)	b (UIR/°C)
15	1,3488	2,2076	-1,0297	$-6,08 \cdot 10^{-4}$
20	1,3639	2,2496	-1,0844	$-3,30 \cdot 10^{-4}$
25	1,3775	2,3160	-1,1522	$-1,91 \cdot 10^{-4}$
30	1,3919	2,3435	-1,1949	$1,04 \cdot 10^{-4}$
35	1,4058	2,4207	-1,2744	$2,78 \cdot 10^{-4}$
40	1,4176	2,5410	-1,3916	$4,36 \cdot 10^{-4}$
27,5*	1,3907*	2,3495*	-1,1946*	$1,29 \cdot 10^{-4}$ *

*Valores Médios.

Agora, é possível encontrar um conjunto completo de erros propagados, tanto em índice de refração, quanto em temperatura. Ao utilizar a equação com a diferença dos modos M1 e M2, pode-se encontrar a derivada de n em relação à T . Considerou-se a sensibilidade térmica como constante na resolução da derivada da equação, pois sua variação pouco influência no cálculo do erro do índice de refração, além de facilitar consideravelmente o cálculo.

$$\Delta n = \frac{a_n \lambda_o}{K_n^2} - \frac{a_n}{K_n^2} \lambda - \frac{a_n K_T}{K_n^2} T + \frac{K_n K_T}{K_n^2} \quad (24)$$

Analogamente, é possível encontrar a variação de temperatura em relação ao índice. Entretanto, optou-se em fazer o erro na medição de temperatura usando uma função de transferência de erro em y para erro em x , presente no software

Origin®. A Figura 31 apresenta os valores dos índices de refração e temperatura, com seus respectivos erros propagados.

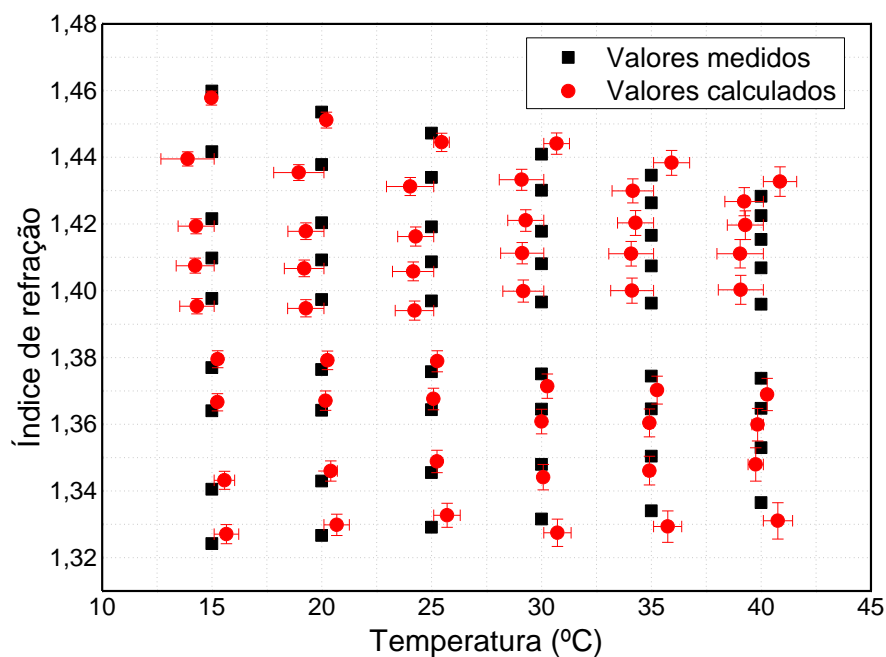


Figura 31 - Valores medidos (em preto) e valores calculados (em vermelho) para os índices de refração e temperatura, com seus respectivos erros calculados.

Os valores dos erros máximos encontrados para o índice de refração foram de 0,079, enquanto para temperatura foram de 1,1 °C.

5 CONCLUSÕES

5.1 CONCLUSÕES GERAIS

Para monitorar o índice de refração de certo meio mantendo inicialmente a temperatura constante, foi utilizada a separação entre os comprimentos de onda de dos modos 1 e 3. Com as devidas análises, a sensibilidade alcançada foi de 110 nm / UIR, quando o índice de refração é 1,4656, com uma resolução de $4,5 \times 10^{-5}$ UIR. Com esses resultados, é possível obter as sensibilidades ao índice de refração na mesma ordem que as observadas nas medições considerando o apenas modo mais sensível da fibra. Além disso, não foi preciso preocupar-se com o valor inicial do comprimento de onda de cada um dos modos, uma vez que foram analisadas as diferenças entre comprimentos de onda.

Buscou-se analisar a influência que a variação de temperatura tinha na sensibilidade ao índice de refração, bem como a variação do índice de refração tem na sensibilidade térmica. Verificou-se que um aumento de temperatura gera uma redução de sensibilidade ao índice de refração em uma EMFBG. Essa redução pode ser atribuída principalmente ao decaimento do campo evanescente, que resulta no aumento entre a diferença do índice de refração do meio em relação ao núcleo. Considerando o coeficiente termo-ótico da sílica $8,6 \times 10^{-6}$ nm / °C, espera-se uma baixa redução de sensibilidade ao índice de refração com o aumento da temperatura. Devido a esse efeito, em aplicações típicas, que são da ordem 10^{-2} , a sensibilidade pode ser negligenciada.

Analogamente, observou-se que com um aumento no índice de refração do meio externo há uma redução da sensibilidade térmica da EFBG de fibra multimodo. Assim, quando há a necessidade de utilizar uma fibra corroída como sensor de temperatura, devem-se observar cautelosamente as variações no índice de refração do meio externo à fibra, para evitar divergências na medição da temperatura.

Com o objetivo de encontrar simultaneamente o índice de refração e a temperatura, utilizou-se a resolução de um sistema de equações que envolvem índice de refração e temperatura, equacionando índice de refração, temperatura e comprimento de onda de Bragg como um plano. Devido a isso, duas equações foram suficientes para encontrar valores aproximados para índice de refração e

temperatura. Essas equações foram geradas para o primeiro e segundo modos encontrados na fibra multimodo.

Para uma análise da propagação de erros foi utilizada a equação do plano que envolve a diferença de comprimento de onda do primeiro e segundo modos. Há, assim, a possibilidade de utilizar as sensibilidades cruzadas para uma correção dos valores encontrados na aproximação para um plano.

Assim, constatou-se que tanto que a sensibilidade térmica da fibra depende das variações do índice de refração, quanto a sensibilidade ao índice de refração depende da temperatura na qual a amostra se encontra. Os erros encontrados para as medições de índice de refração são da ordem de 10^{-3} , enquanto os erros encontrados para temperatura são da ordem 10^{-1} .

Pôde ser constatado, também, que pequenas variações da temperatura não interferem drasticamente na sensibilidade ao índice de refração, como ocorre em diversos trabalhos em laboratórios com menor controle térmico.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Mesmo com os bons resultados encontrados, é possível aprimorar os trabalhos futuros. Os métodos de limpeza da ponta do sensor, quando trocadas de uma para outra amostra, bem como uma forma a garantir uma melhor estabilidade física no contato entre tubo de ensaio e o equipamento de banho térmico garantiriam uma melhor qualidade da resposta.

É possível aumentar a faixa de medição de índice de refração e temperatura, verificando se a aproximação do plano ainda é razoavelmente confiável. As sensibilidades cruzadas só foram encontradas através das equações com as diferenças dos modos 2 e 1. Seria interessante descobri-las para cada um dos modos em separado, para comparar com os coeficientes encontrados no plano do modo 1 e no plano do modo 2.

A aproximação do conjunto de pontos a um plano pareceu bastante satisfatória. Entretanto, imagina-se que uma aproximação para uma superfície hiperbólica possa ser ainda mais interessante, uma vez que em uma temperatura constante a variação do comprimento de onda de Bragg da fibra em função do índice de refração, seja uma hipérbole.

É possível que sejam feitas correções nos valores de temperatura e índice de refração calculados (com a utilização dos planos), utilizando as sensibilidades

cruzadas. Esse estudo aprofundaria consideravelmente a utilização do método dos planos, bem como melhoraria os resultados encontrados.

Além disso, observou-se que a sensibilidade térmica e a sensibilidade ao índice no terceiro modo são maiores. Portanto, este trabalho poderia ser repetido com uma gravação de uma rede de Bragg mais forte na fibra multimodo com perfil gradual, o que poderia ser satisfatório para analisar esse estudo utilizando as diferenças entre os comprimentos de onda dos modos 1 e 3.

5.3 PUBLICAÇÕES

FERNANDES, D.; WINTER, R. ; KUHNE, J. F. ; MACEDO, A. G. ; SILVA, J. C. C. ; KAMIKAWACHI, R. C. . Multimode Fiber Refractive Index Sensor Based On Wavelength Modes Separation. LAWOFES. Porto Alegre, 2016.

FERNANDES, D.; WINTER, R. ; SILVA, J. C. C. ; KAMIKAWACHI, R. C. Influence of temperature on the refractive index sensitivities of fiber Bragg gratings refractometers. J. Microw. Optoelectron. Electromagn. 2017.

REFERÊNCIAS

- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 2ª Edição John Wiley & Sons, 1997.
- ASTM. **Standard Practice for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin**. Disponível em: <<https://www.astm.org/Standards/D2140.htm>>. Acesso em: 7 jan. 2016.
- BAI, Y. *et al.* Simultaneous measurement of refractive index and temperature based on a partial cone-shaped FBG. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 26, n. 21, p. 2193–2196, 2014.
- CAO, Y. *et al.* Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on a Mach-Zehnder interferometer cascaded with a fiber Bragg grating. **Optics Communications**, v. 342, p. 180–183, 2015.
- CAUCHETEUR, C.; MÉGRET, P. Demodulation technique for weakly tilted fiber Bragg grating refractometer. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, n. 12, p. 2703–2705, 2005.
- CHERIN, A. H. **An introduction to optical fibers**. McGraw-Hill, 1983.
- COROTTI, R. DE P. **Produção e caracterização de redes de bragg gravadas em fibra multimodo e aplicadas ao setor de biocombustíveis**. Curitiba, PR. Disponível em: <http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/cpgei/Ano_2015/dissertacoes/CPGEI_Dissertacao_681_2015.pdf>.
- CUSANO, A. *et al.* Thinned and micro-structured fibre Bragg gratings: towards new all-fibre high- sensitivity chemical sensors. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, p. 734–741, 2005.
- FROST & SULLIVAN. **World Sensores de fibra ótica Markets**. Disponível em: <<http://www.frost.com/>>. Acesso em: 7 jan. 2016.
- GIOZZA, W. F.; CONFORTI, E.; WALDMAN, H. **Fibras ópticas: tecnologia e projeto de sistemas**. [s.l.] Makron Books, 1991.
- HECHT, E. **Optics**. Addison-Wesley, 2002.
- HILL, K. O. *et al.* Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v. 32, n. 10, p. 647–649, 1978.
- HILL, K. O.; MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263–1276, 1997.
- KAMIKAWACHI, R. C. Dispositivos sensores em fibra para uso em refratometria. p. 121, 2007.

KASAP, S. O. **Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices**. 2nd. ed. Pearson, 2013.

KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. San Diego.

KUHNE, J. F. *et al.* **Refractive index sensitivity of fiber Bragg grating inscribed in a multimode fiber** **Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2015 SBMO/IEEE MTT-S International**. Curitiba, PR, BRASIL: [s.n.]. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7369180/>>.

KUHNE, J. F. **REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS MULTIMODO: análise numérica e experimental da sensibilidade ao índice de refração**.

MELTZ, G.; MOREY, W. W.; GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, n. 15, p. 823, 1 ago. 1989.

MIZUNAMI, T. *et al.* Bragg gratings in multimode and few-mode optical fibers. **Journal of Lightwave Technology**, v. 18, n. 2, p. 230–235, 2000.

OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg gratings: fundamentals and applications in telecommunications and sensing**. [s.l.] Artech House, 1999.

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, n. 9, p. 1606–1612, 1998.

PEREIRA, D. A.; FRAZÃO, O.; SANTOS, J. L. Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature. **Optical Engineering**, v. 43, n. 2, p. 299, 1 fev. 2004.

SANG, X. *et al.* Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, v. 120, n. 2, p. 754–757, 2007.

SCHROEDER, K. *et al.* A fibre Bragg grating refractometer. **Measurement Science and Technology**, v. 12, n. 7, p. 757–764, 1 jul. 2001.

TSIGARIDAS, G. *et al.* Theoretical and experimental study of refractive index sensors based on etched fiber Bragg gratings. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 209, p. 9–15, 2014.

XIONG, R. *et al.* Simultaneous Measurement of Refractive Index and Temperature Based on Modal Interference. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 8, p. 2524–2528, 2014.

YANG, H. Z. *et al.* Cladless few mode fiber grating sensor for simultaneous refractive index and temperature measurement. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 228, p. 62–68, 2015.

ZHANG, W. *et al.* Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on

combinatorial torsion beam. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14, n. 8, p. 1154–1156, 2002.

ZHAO, C.-L. *et al.* Simultaneous Temperature and Refractive Index Measurements Using a 3° Slanted Multimode Fiber Bragg Grating. **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 2, p. 879–883, 2006.