

Universidade Federal de Juiz de Fora  
Faculdade de Engenharia

**Igor Santos Cruz Rodrigues**

**ESTUDO DE SENSORES BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO EM FIBRA  
ÓPTICA**

Juiz de Fora

2017

**Igor Santos Cruz Rodrigues**

**ESTUDO DE SENSORES BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO EM FIBRA  
ÓPTICA**

Monografia apresentada à Faculdade de engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista - Habilitação em Telecomunicações.

Orientador: Thiago Vieira Nogueira Coelho

Juiz de Fora

2017

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

Rodrigues, Igor Santos Cruz.

Estudo de Sensores Baseados em Grades de Difração em Fibra Óptica / Igor Santos Cruz Rodrigues. – 2017.  
57 f. : il.

Orientador: Thiago Vieira Nogueira Coelho

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Fibra óptica. 2. Grades de Difração 3. Sensores. 4. Técnicas de Interrogação. I. Coelho, Thiago Vieira Nogueira, orient. II. Título

**Igor Santos Cruz Rodrigues**

**ESTUDO DE SENSORES BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO EM FIBRA  
ÓPTICA**

Monografia apresentada à Faculdade de engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Eletricista - Habilitação em Telecomunicações.

Aprovada em: 22/11/2017

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Thiago Vieira Nogueira Coelho - Orientador  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Alexandre Bessa dos Santos  
Universidade Federal de Juiz de Fora

---

Professor Dr. Diogo Vieira Nogueira Coelho  
Universidade Federal de Juiz de Fora

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força, saúde e sabedoria para superar as dificuldades durante esta longa jornada.

Em segundo lugar, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora, pela oportunidade de fazer este curso, e ao seu corpo docente que desempenharam com dedicação as aulas ministradas, trabalhando incansavelmente para que nós, alunos, possamos contar com um ensino de extrema qualidade.

Agradeço ao meu orientador Thiago Coelho por toda sua disposição em me ajudar ao longo do curso de graduação, e principalmente ao longo desse trabalho. Sua paciência, dedicação e seus ensinamentos possibilitaram que eu realizasse este trabalho. Agradeço também ao professor Alexandre Bessa, pela paciência ao me orientar no início das minhas pesquisas na área de óptica, no meu primeiro ano de faculdade, abrindo espaço para novas oportunidades e possibilitando a execução deste trabalho.

Agradeço À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. O apoio deles durante todo o período de graduação foi de fundamental importância para que eu não me desviasse do meu objetivo.

Por fim, agradeço aos meus amigos, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhadas. O apoio e companhia de vocês é e sempre será fundamental na minha vida.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”

Leonardo da Vinci

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de grades de difração em fibra óptica aplicada ao sensoriamento de parâmetros como temperatura, deformação e índice de refração e a análise de diferentes métodos de interrogação de um sensor óptico baseado em grades de difração. Primeiramente é feita uma apresentação teórica de sensores ópticos, grades de difração e métodos de interrogação. Em seguida, utilizando o *software Optigrating*, são feitas diversas simulações a fim de analisar o comportamento de um sinal refletido por uma grade de Bragg quando se varia alguns dos parâmetros principais desta grade. Por último, utilizando o *software Optisystem* e o *software MATLAB*, são feitas simulações de quatro métodos de interrogação de um sensor óptico baseado em grades de difração. Os resultados foram considerados satisfatórios, ajudando a entender o impacto de alguns parâmetros da grade em seu sinal, podendo utilizar destes resultados a fim de otimizar uma grade para uma aplicação desejada, e ajudando também a entender em quais situações cada esquema de interrogação analisado prevalece sobre os outros.

Palavras-chave: Fibra óptica. Grades de difração. Sensores. Interrogação.

## **ABSTRACT**

The present work has as objective the study of diffraction gratings in optical fiber applied to the sensing of parameters such as temperature, deformation and refractive index and the analysis of different interrogation methods of an optical sensor based on diffraction gratings. First, a theoretical presentation of optical sensors, diffraction gratings and interrogation methods is made. Then, using the Optigrating software, several simulations are performed in order to analyze the behavior of a signal reflected by a Bragg grating when changing some of its main parameters. Finally, using Optisystem software and MATLAB software, simulations of four interrogation methods of an optical sensor based on diffraction gratings are done. The results were considered satisfactory, helping to understand the impact of some parameters of the grating in its signal, being able to use these results in order to optimize a grating for a desired application, and also helping to understand in which situations each interrogation scheme analyzed prevails over the others.

Key-words: Optical Fiber. diffraction Gratings. Sensors. Interrogation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Conceito básico de funcionamento de um sistema sensor em fibra óptica[13].	18
Figura 2 – Modulador de atenuação da fibra por micro curvaturas[11].	19
Figura 3 – Modelo de uma rede de Bragg[2].	21
Figura 4 – Esquema WDM[11].	22
Figura 5 - Curva de refletividade de uma grade de Bragg uniforme em função do comprimento de onda[8].	25
Figura 6 – Simulação da resposta de uma FBG de acordo com a temperatura[12].	27
Figura 7 – Linearização dos dados do ensaio da resposta de uma FBG de acordo com a temperatura[12].	27
Figura 8 - Diagrama de sintonização de modos na operação de grades de Bragg (a) e em grades de período longo (b) [6].	28
Figura 9 – Circuito óptico para leitura com um Analisador de Espectro Óptico (OSA) [10].	31
Figura 10 – Esquema de interrogação utilizando filtro sintonizável[15].	32
Figura 11 – Esquema de interrogação utilizando um interferômetro de Mach-Zehnder[11].	33
Figura 12 – Esquema de interrogação utilizando filtros fixos[15].	34
Figura 13 – Espectro óptico das FBGs e LPG, escritas em uma fibra Corning®SMF-28e®[4].	35
Figura 14 – Esquema de interrogação de uma LPG utilizando 2 FBGs como filtros fixos[4].	36
Figura 15 – Parâmetros da fibra usados como padrão para as simulações.	37
Figura 16 - Parâmetros da fibra usados como padrão para as simulações.	38
Figura 17 – Parâmetros da grade usados como padrão para as simulações.	38
Figura 18 – Parâmetros da grade usados como padrão para as simulações.	39
Figura 19 – Espectro de transmissão(vermelho) e reflexão(azul) do sinal simulado.	39
Figura 20 – Determinação do comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão.	40
Figura 21 – Primeiro passo da simulação da variação do comprimento de onda de Bragg com o período.	40
Figura 22 – espectro refletido para uma fibra de índices de refração de 1.46 e 1.4564.	41
Figura 23 – espectro refletido para uma fibra com intensidade de modulação de 0.0006.	42
Figura 24 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando uma LPG como filtro fixo.	45
Figura 25 – Variação da potência do sinal com a temperatura.	45
Figura 26 – Variação da potência elétrica do sinal com a temperatura em uma range otimizada.	46
Figura 27 – Fit linear da potência óptica do sinal com a temperatura em uma range otimizada.	46
Figura 28 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando outra FBG como filtro fixo.	47
Figura 29 – Variação da potência óptica do sinal com a temperatura.	48
Figura 30 – Variação da potência óptica do sinal com a temperatura em uma range otimizada.	48
Figura 31 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando duas FBGs como filtros fixos.	49
Figura 32 – Variação das potências ópticas das FBGs com a temperatura.	50
Figura 33 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura.	50
Figura 34 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura em um range otimizado.	51
Figura 35 – Esquema de interrogação de uma LPG utilizando duas FBGs como filtros fixos.	52
Figura 36 – Variação das potências ópticas das FBGs com a temperatura.	52
Figura 37 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura.	53
Figura 38 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura em um range otimizado.	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação do comprimento de onda de Bragg com o período da grade. ....	41
Tabela 2 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a variação do índice de Refração. ....	42
Tabela 3 – Variação da largura de banda de 3dB com a variação da intensidade da modulação. ....	43
Tabela 4 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura. ....	43

## LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

FBG	Fiber Bragg Grating
TDM	Time-division multiplexing
FDM	frequency-division multiplexing
WDM	wavelength-division multiplexing
OTDR	Optical time-domain reflectometry
LPG	Long Period Grating
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
SMF	Single mode fiber
SLSR	Side Lobe Suppression Rate
OSA	Optical Spectrum Analyze
LED	Light Emitting Diode
FFP	Filtros de Fabry-perot
SNR	Signal-to-Noise Ratio
ESA	Electrical Spectrum Analyzer
PZT	Titanato zirconato de chumbo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\omega_r$	Frequência angular da radiação refletida
$\omega_i$	Frequência angular da radiação incidente
$h$	Constante de Planck
$K_g$	Vetor de onda da grade
$K_r$	Vetor de onda refletido
$K_i$	Vetor de onda incidente
$\Lambda$	Período de marcação da grade
$\eta_{eff}$	índice de refração efetivo do núcleo
$\eta_{0eff}$	índice de refração efetivo médio do núcleo
$\Delta\eta_{eff}$	Intensidade de modulação do índice de refração efetivo do núcleo.
$L$	Comprimento da grade de Bragg,
$\beta$	Constante de propagação do modo fundamental do núcleo
$\Delta\beta$	Vetor de onda de sintonização entre os modos co-propagante e o contra-propagante do núcleo.
$k$	Coefficiente de acoplamento
$\varepsilon$	Deformação aplicada à fibra
$p_{ij}$	Coefficientes piezoelétricos de Pockel do tensor stress óptico
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica do material da fibra
$\Delta T$	Variação de temperatura.
$n_{01}$	Índice de refração efetivo do modo fundamental do núcleo
$n_c^m$	Índice de refração efetivo do m-ésimo modo evanescente
$\Delta\varphi$	Variação de fase

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	INTRODUÇÃO	15
1.2	OBJETIVOS	15
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	16
<b>2</b>	<b>SENSORES EM FIBRA ÓPTICA</b>	<b>16</b>
2.1	INTRODUÇÃO	17
2.2	FUNCIONAMENTO	18
2.3	CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES EM FIBRA ÓPTICA	19
<b>3</b>	<b>SENSORES EM FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO</b>	<b>21</b>
3.1	GRADES DE BRAGG DE PERÍODO UNIFORME	21
3.1.1	<i>Condição de casamento de fase de Bragg</i>	22
3.1.2	<i>Refletividade das FBG's</i>	24
3.1.3	<i>Sensibilidade à Temperatura</i>	25
3.2	GRADES DE PERÍODO LONGO	28
3.2.1	<i>Sensibilidade das LPG's</i>	29
<b>4</b>	<b>SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO PARA SENSORES BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO</b>	<b>30</b>
4.1	INTRODUÇÃO	30
4.2	SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO ATIVOS	31
4.2.1	<i>Interrogação utilizando filtros e fontes sintonizáveis</i>	31
4.2.2	<i>Interrogação utilizando métodos interferométricos</i>	32
4.3	SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO PASSIVOS	33
4.3.1	<i>Esquema de interrogação utilizando filtros fixos</i>	33
4.3.1.1	<i>Esquema de interrogação de uma LPG utilizando filtros fixos</i>	34
<b>5</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE UMA FBG SIMULADA</b>	<b>36</b>
5.1	INTRODUÇÃO	36
5.2	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM O PERÍODO DA GRADE	40
5.3	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DA FIBRA	41
5.4	VARIAÇÃO DA LARGURA DE BANDA COM A INTENSIDADE DE MODULAÇÃO	42

5.5	VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG COM A TEMPERATURA .....	43
<b>6</b>	<b>SIMULAÇÃO DE ESQUEMAS DE INTERROGAÇÃO DE GRADES DE DIFRAÇÃO .....</b>	<b>44</b>
6.1	INTRODUÇÃO .....	44
6.2	ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO UMA LPG . .....	44
6.3	ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO OUTRA FBG .....	47
6.4	ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO DUAS FBGs .....	49
6.5	ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA LPG UTILIZANDO DUAS FBGs .....	51
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>

# 1 INTRODUÇÃO E MOTIVAÇÃO

## 1.1 INTRODUÇÃO

O sensoriamento tem um papel essencial em diversas aplicações que utilizam equipamentos que se degradam com o tempo por forças externas os fatores ambientais. Além disso, o sensoriamento também é fundamental em outras áreas como na construção civil, na automação industrial e na medicina. É muito importante que se tenha sensores capazes de detectar com precisão e confiabilidade variações físicas e ambientais do meio em que se é utilizado

Com o avanço e consolidação da tecnologia à fibra óptica, a utilização de grades de difração em sistemas de sensoriamento se destacou, principalmente pela capacidade de operar com precisão em ambientes onde sensores elétricos falham ou apresentam baixa performance.

As grades de difração são, basicamente, marcações periódicas no índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. De acordo com a maneira em que se grava as grades, obtém-se diferentes propriedades ópticas da fibra. Ao variar certos parâmetros, conseguimos otimizar uma grade para seu uso em um sensor à fibra óptica em uma aplicação.

Sensores ópticos baseados em grades de difração apresentam ótima performance e alta confiabilidade, porém os sistemas de detecção e demodulação ainda apresentam algumas limitações, muitas vezes requerendo equipamentos caros e de grande porte, o que dificulta sua utilização na prática. Portanto, é muito importante o estudo de métodos alternativos de interrogação desses sensores.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de grades de difração em fibra óptica aplicada ao sensoriamento de parâmetros como temperatura, deformação e índice de refração e a análise de diferentes métodos de interrogação de um sensor óptico baseado em FBGs (*Fiber Bragg Gratings*) e LPGs (*Long period Gratings*).

Para isso, será feito um estudo teórico das características de uma grade de difração e sua utilização em sensores ópticos, bem como um estudo de métodos de interrogação de sensores ópticos. Em seguida, será utilizado os *softwares Optigrating e Optisystem* para simular as grades de difração e os esquemas de interrogação a serem comparados.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação foi estruturada em sete capítulos, onde serão apresentados diferentes aspectos e características das grades de difração, a utilização destas em sensores à fibra óptica e os diferentes métodos de interrogação destes sensores.

Nesse primeiro capítulo, é introduzido o contexto deste trabalho, descrevendo seus objetivos e motivações, bem como sua estrutura.

No segundo capítulo é apresentada a teoria dos sensores à fibra óptica, passando pelo seu funcionamento básico e por suas diversas maneiras de classificação.

No terceiro capítulo é apresentado o conceito de grades de difração, descrevendo suas características de sensoriamento, seu funcionamento, e sua utilidade em sensores à fibra óptica.

No quarto capítulo é apresentado o conceito de interrogação de sensores, bem como diversos métodos de interrogação e suas vantagens e desvantagens.

No quinto capítulo é apresentada a caracterização de uma FBG simulada, passando por várias simulações que demonstram os efeitos causados por variações em certos parâmetros das grades de Bragg

No sexto capítulo são apresentadas simulações de quatro esquemas de interrogação de sensores em fibra óptica baseados em grades de difração, e é feita uma comparação entre esses métodos, ressaltando suas vantagens e desvantagens.

No sétimo capítulo é feita a conclusão do trabalho, reunindo os resultados encontrados e propondo futuros trabalhos.

## 2 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

Com o avanço e a consolidação das comunicações ópticas no mercado, a utilização de grades de difração em sistemas sensores ganhou destaque, principalmente pela sua capacidade de aproveitamento da infraestrutura dos sistemas de comunicações ópticas [6]. Sua vantagem de prover sensoriamento remoto em lugares de difícil acesso, principalmente com a possibilidade de usar esquemas de amplificação óptica, e com precisão em situações onde os sensores comuns têm dificuldade de operar, devido à imunidade à interferência eletromagnética, além da crescente acessibilidade dos dispositivos usados fizeram com que esses sensores ganhassem força em um nicho de mercado. Neste Capítulo será apresentado o sensor em fibra óptica, definindo-o e apresentando seu funcionamento e características.



## 2.1 INTRODUÇÃO

Um sistema sensor é usualmente constituído de um dispositivo de transdução, responsável por traduzir em variação das características do sinal de propagação os parâmetros a serem medidos, um canal de comunicação e um subsistema de geração e/ou detecção, tratamento, processamento e condicionamento de sinal, podendo ser estes integrados ou não. Se a radiação luminosa é utilizada em qualquer destes subsistemas, o sistema é chamado de Sensor óptico no qual o transdutor é o subsistema que normalmente determina as características do sensor. Um sistema sensor óptico é um sistema fotônico onde o objeto a ser medido introduz modificações em uma ou mais características de propagação da luz[6]. Essas características são geralmente a intensidade, a fase, a polarização e/ou o comprimento de onda do sinal propagado.

Os sensores a fibra óptica são dispositivos usados para medir uma série de parâmetros, dentre eles, parâmetros físicos, químicos e biológicos. Alguns exemplos podem ser citados, tais como, tensão, temperatura, pressão, vibração, umidade, viscosidade, curvatura, índice de refração, rotação, deslocamento, aceleração, potência elétrica, corrente elétrica, indicador de pH, incidência de gases no sangue, entre outros[10].

Sensores em fibra óptica são leves e pequenos com facilidade de serem embutidos sem ou com pouca degradação em estruturas, como por exemplo, armações de concreto sendo bastante útil no desenvolvimento de estruturas inteligentes na engenharia civil. Além disso, são dispositivos que apresentam portabilidade podendo ser realocados e instalados em locais remotos e de difícil acesso[6].

Esses sensores são feitos com materiais dielétricos, sendo imunes à interferência eletromagnética, facilitando sua instalação em ambientes onde a poluição do espectro eletromagnético é intensa, e são biologicamente e quimicamente inertes permitindo a instalação em aplicações com materiais corrosivos e ambientes quimicamente hostis[6].

Sensores a fibra óptica possuem alta largura de banda utilizando-se da infraestrutura fornecida pelos sistemas de comunicação óptica e apresentam a possibilidade de multiplexação de sensores devido ao legado existente, principalmente de sistemas de telecomunicações, através de tecnologias como o TDM (*Time-division multiplexing*), FDM(*frequency-division multiplexing*) e WDM(*wavelength-division multiplexing*) permitindo o sensoriamento multiponto e multi-parâmetro melhorando o custo benefício do sistema, ao possibilitar que a unidade optoeletrônica de recepção, uma das partes mais custosas do sistema, seja dividida entre vários sensores[6]. Outra vantagem de sensores em fibra óptica é alta sensibilidade aos parâmetros medidos e elevada performance mesmo em ambientes de alta temperatura como reatores nucleares e caldeiras industriais[6].

Apesar das vantagens apresentadas, devido a questões de custo benefício, os sensores ópticos são mais utilizados em nichos de mercados onde os sensores

convencionais apresentam performance deteriorada devido a algumas condições específicas.

As maiores desvantagens são a sensibilidade do transdutor a mensurados indesejáveis, pois em alguns casos fatores ambientais não pertinentes à medida podem afetar as características de propagação na fibra e por consequência a medida desejada; Falta de padrões específicos para os equipamentos o que leva a problemas em análises sistêmicas e possíveis dificuldades na interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fornecedores; Custo mais elevado em algumas aplicações do que a tecnologia sensores elétricos principalmente devido ao maior amadurecimento de mercado e custo de componentes ópticos feitos especialmente para a aplicação sensora; Quantidade limitada de fornecedores o que dificulta a concorrência e dificulta a assistência a esses tipos de soluções[6]. Portanto, a escolha da tecnologia a ser utilizada deve ser feita cuidadosamente, levando em consideração todos os fatores mencionados.

## 2.2 FUNCIONAMENTO

Um sistema sensor óptico é constituído basicamente de uma fonte de óptica, uma cabeça sensora e um sistema de detecção, como ilustrado na figura 1. A fonte óptica pode ser de banda larga ou um pulso, dependendo do tipo de sinal que a cabeça sensora está programada para processar. A cabeça sensora responde a variações nas condições ambientais através da modulação das características do sinal, como potência do sinal, fase, polarização ou comprimento de onda refletido. O sistema de detecção processa o sinal de acordo com esta característica para conseguir uma medida precisa do parâmetro a ser inferido através da informação codificada na energia luminosa.

A performance de um sensor é determinada de acordo com a precisão das medidas, de sua sensibilidade ao mensurando e do alcance das medidas, este último sendo definido como até onde o sensor é capaz de medir com precisão. Se o sensor for usado em tempo real, o tempo de resposta será também um importante parâmetro para definir a performance de um sistema sensor[7].

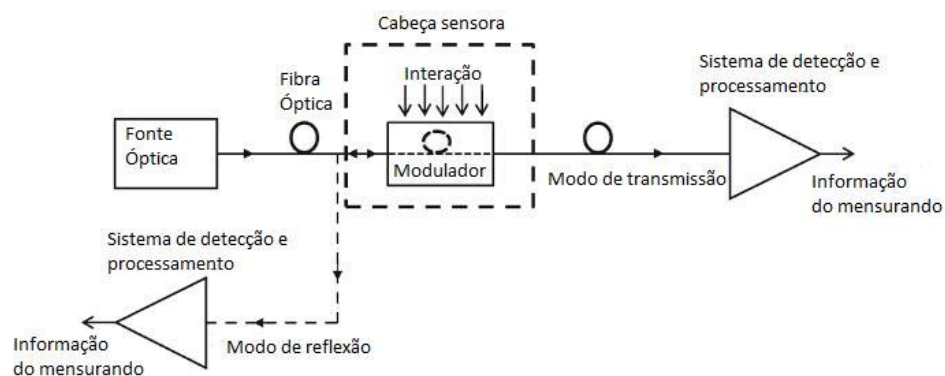


Figura 1 - Conceito básico de funcionamento de um sistema sensor em fibra óptica[13].

## 2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SENSORES EM FIBRA ÓPTICA

Há diversos tipos e configurações de sensores à fibra óptica. Basicamente, esses sensores podem ser classificados quanto à localização da transdução como sensores intrínsecos e sensores extrínsecos. Os sensores ópticos também podem ser classificados quanto ao escopo da distribuição espacial da medida em sensores discretos, integrados ou distribuídos. Finalmente, os sensores em fibra óptica podem ser classificados quanto ao tipo de efeito óptico a ser medido, podendo ser interrogados através de alteração na intensidade, na fase, na polarização ou no espectro da onda luminosa.

Todo sensor óptico pode ser classificado com um sensor intrínseco ou extrínseco. Um sensor é classificado intrínseco quando a luz é modulada em resposta a atuação do conteúdo a ser medido sem contudo deixar o guia de onda[3]. É o caso dos sensores baseados em grades de difração. Outro exemplo de um sensor intrínseco é um sensor de pressão baseado nas perdas por micro curvaturas que ocorrem em fibras ópticas. Essas micro curvaturas alteram o acoplamento entre os modos guiados e os modos de casca, influenciando a potência óptica na saída da fibra[11]. A figura 2 nos mostra o funcionamento básico deste sensor.

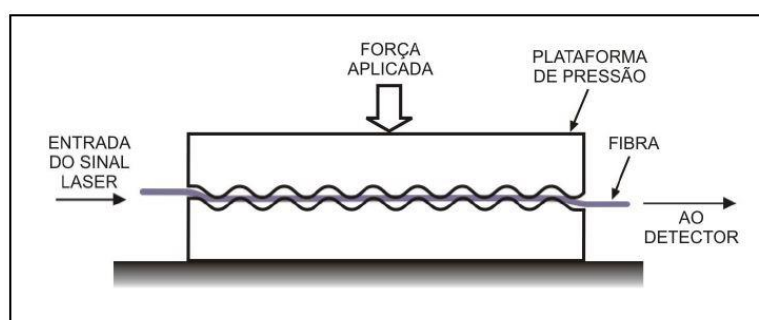


Figura 2 – Modulador de atenuação da fibra por micro curvaturas[11].

Um sensor é classificado como extrínseco quando a luz deixa o guia de onda para então ser modulada pelo conteúdo a ser medido. Uma vez sofrida a influência da amostra (mensurando), ela é então acoplada novamente na seção seguinte da guia de onda[3]. Esses sensores possuem uma desvantagem devido à possibilidade de perda parcial ou total da radiação luminosa devido ao desacoplamento da luz na transdução da medida devido ao alto grau de precisão no alinhamento entre as fibras para o reacoplamento da luz[6].

Um exemplo de sensor extrínseco pode ser citado como um sensor de vibração formado por duas fibras ópticas com extremidades alinhadas e muito próximas uma à outra. A luz é injetada na extremidade em uma das fibras, e quando sai se expande em um cone de luz cujo ângulo depende da diferença entre o índice de refração do núcleo e da casca da fibra óptica. A quantidade de luz capturada pela segunda fibra óptica depende do seu ângulo de aceitação e da distância entre as fibras. A modulação dessa distância devido à vibração resulta na modulação da intensidade da luz capturada[10].

Podemos classificar os sensores ópticos também em relação a quais pontos da fibra nos retornam uma medida. Nos sensores discretos tem-se um ou mais pontos fixos na fibra realizando a medida, podendo cada ponto ter seu canal óptico próprio ou compartilhar o mesmo canal. Sensores baseados em grades de difração são um exemplo de sensores discretos.

Já nos sensores com medida integrada as variações ocorridas se somam para gerar um valor resultante de medida. Um exemplo de um sensor com medida integrada são os sensores de corrente utilizando efeito Faraday onde a corrente passa por um condutor elétrico enrolado por uma bobina de fibra atuando sobre as condições de polarização da mesma[6].

Uma fibra pode atuar também como um sensor distribuído, utilizando de todo seu comprimento para realizar medidas. O princípio físico para a monitoração distribuída em sensores intrínsecos baseia-se nos mecanismos de espalhamento Rayleigh, Brillouin ou Raman que podem ocorrer ao longo da fibra óptica. Podemos citar com um exemplo um sistema sensor que usa OTDR (*Optical time-domain reflectometry*) para interrogar um sensor distribuído.

A técnica OTDR aplicada a sensores consiste em lançar numa extremidade da fibra um pulso luminoso de curta duração e analisar a fração de luz que é refletida pelo espalhamento Rayleigh, Brillouin ou Raman. Nestas técnicas a radiação retroespalhada depende do efeito físico escolhido como transdutor e depende do parâmetro a ser medido podendo ser monitorada ao longo do tempo.

As FBGs e LPGs requerem o uso de fontes incoerentes de alta largura espectral para serem interrogadas. A utilização de tais fontes limita o alcance do sistema para distâncias no entorno de 20 km devido principalmente as perdas na fibra associado ao retroespalhamento Rayleigh, que induz ruído óptico e degrada a qualidade da transmissão do sinal na fibra óptica [14].

A utilização da tecnologia de amplificação de sinais ópticos já amplamente utilizada em sistemas de telecomunicações é uma alternativa utilizada em sistemas sensores para aumentar o alcance, possibilitar a detecção remota e a formação de uma rede distribuída de sensores. Duas tecnologias de amplificação óptica se destacam: amplificação por fibras dopada de Érbio (EDFA – *Erbium Doped Fiber Amplifier*) e a amplificação Raman baseado no espalhamento estimulado Raman[6].

Sensores ópticos remotos baseados em amplificação Raman possuem a vantagem de não precisarem de fibras ópticas especiais ou dopadas e a amplificação pode ocorrer nas fibras ópticas monomodo padrão (SMF – *Single mode fiber*). A amplificação Raman pode ser utilizada como um amplificador distribuído, isto é, a amplificação ocorre em uma grande extensão da fibra óptica padrão SMF, o que melhora a reposta em relação à figura de ruído e aos efeitos não lineares na fibra óptica. Além disso, um aspecto primordial é que a banda de

amplificação Raman pode ser alterada pelo número, comprimento de onda e potência de cada bombeamento. Este último fator faz com que a amplificação Raman possua um grande potencial em aplicações de sistemas sensores remotos multiplexados por comprimento de onda[6].

### 3 SENSORES EM FIBRA ÓPTICA BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO

Um sensor a fibra óptica baseado em grade de difração é uma estrutura de fibra óptica com índice de refração do núcleo modulado. As grades em fibra podem ser classificadas como grades periódicas e grades aperiódicas. As grades periódicas incluem as grades de Bragg em fibra (FBGs - *Fiber Bragg Gratings*), as grades de período longo (LPGs - *Long Period Fiber Gratings*), e outros tipos de grade, como as grades inscritas de forma inclinada com relação ao eixo da fibra. Grades aperiódicas incluem as grades em fibra chirpada e outras. As grades em fibra são usadas em cabeças sensoras ou sistemas de extração de dados (interrogadores). Muitas das cabeças sensoras que adotam grades em fibra usam FBGs[10]. Neste capítulo irão ser apresentadas as grades de difração, suas propriedades e características, com foco nas grades de Bragg de período uniforme e nas grades de período longo, e suas sensibilidades à variação de temperatura.

#### 3.1 GRADES DE BRAGG DE PERÍODO UNIFORME

As grades de Bragg de período uniforme são formadas por variações periódicas no índice de refração do núcleo de uma fibra óptica [2]. Ao transmitir um sinal por uma fibra óptica com uma grade de Bragg, cada uma das marcações da grade reflete uma parcela desse feixe de luz, conforme a teoria de reflexão de fresnel. As múltiplas reflexões geram interferências construtivas que resultam em um único sinal estreito refletido centrado em um comprimento de onda de ressonância denominado comprimento de onda de Bragg. O restante do feixe é transmitido, passando pela grade. Basicamente, uma grade de Bragg é um filtro óptico de alta seletividade. O funcionamento dessa grade é ilustrado na figura 3.

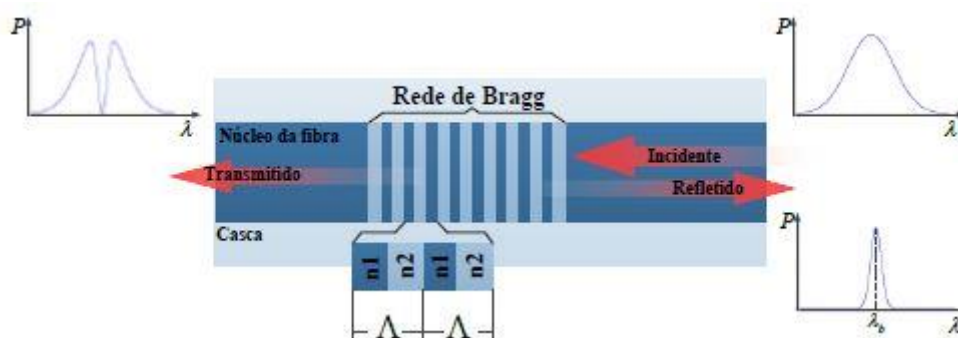


Figura 3 – Modelo de uma rede de Bragg[2].

Neste tipo de grade ocorre o acoplamento entre os modos fundamentais co-propagante e contra-propagante do núcleo, sendo caracterizadas pela reflexão de um comprimento de onda com banda estreita em torno do comprimento de ressonância de Bragg[6].

As FBGs constituem-se um elemento relevante para telecomunicações e sensoriamento a fibra óptica, com centenas de publicações anuais envolvendo chaves ópticas, *add/drop*, compensação de dispersão cromática e sensores de diversas grandezas físicas[1].

Os principais parâmetros que caracterizam a FBG são a refletividade da rede, o comprimento de onda de pico e a largura de banda do sinal refletido. Esses parâmetros dependem da amplitude de modulação do índice de refração do núcleo, do comprimento total da rede e do seu período ao longo da fibra[11].

As FBGs podem ser utilizadas para medir grandezas ao longo da extensão da fibra, utilizando-se de várias grades espalhadas ao longo da região de medição, e um sistema de multiplexação no tempo e/ou no comprimento de onda para simplificar o esquema. Um exemplo de um esquema WDM é mostrado na figura 4. Cada grade possui um comprimento de onda de Bragg distinto e separado o suficiente das outras grades para que não haja interferência. Uma fonte óptica de banda larga alimenta a fibra de modo a cobrir todo o espectro das grades. O sinal refletido é encaminhado para um sistema de detecção e interrogação do sinal e processado para que se consiga extrair as informações precisas de cada uma das cabeças sensoras.

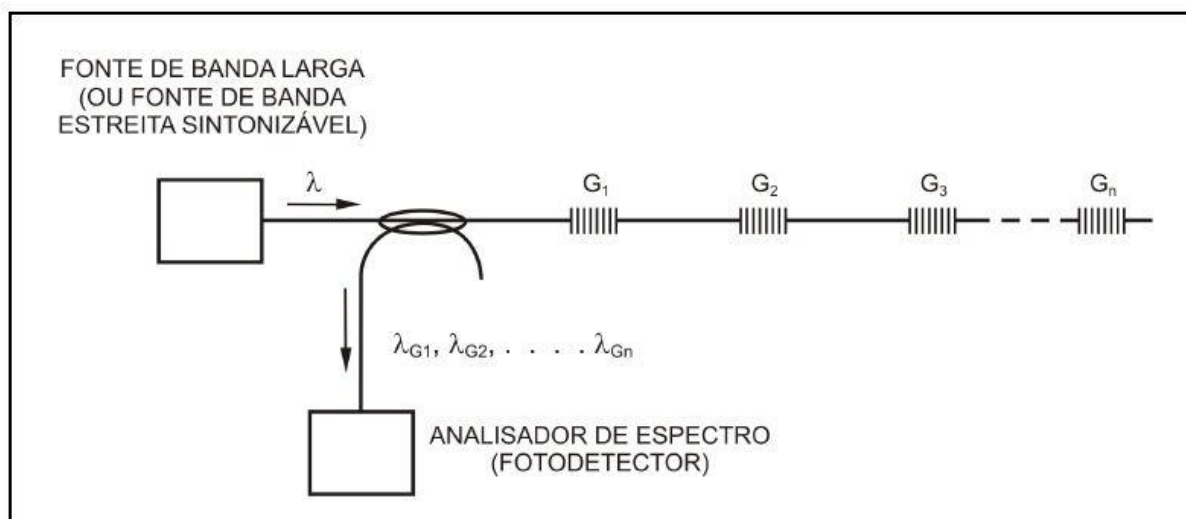


Figura 4 – Esquema WDM[11].

### 3.1.1 Condição de casamento de fase de Bragg

A condição de casamento de fase de Bragg é consequência das condições de conservação de energia e de momento observadas nas grades de difração na fibra óptica[6].

Temos a seguinte equação para a conservação de energia:

$$h * \omega_i = h * \omega_r \quad (3.1)$$

Onde  $\omega_r$  é a frequência angular da radiação refletida e  $\omega_i$  é a frequência angular da radiação incidente, e  $h$  é a constante de Planck. A equação nos mostra que como há a conservação de energia, a frequência da radiação refletida deve ser a mesma que a frequência da radiação incidente. Já pela condição de conservação de momento, temos que o vetor de onda da grade  $K_g$  somado ao vetor de onda refletido  $K_r$  deve ser igual ao vetor de onda incidente  $K_i$  conforme nos mostra a equação(3.2).

$$K_i = K_r + K_g \quad (3.2)$$

Onde

$$K_g = \frac{2 * \pi}{\Lambda} \quad (3.3)$$

Sendo  $\Lambda$  o período de marcação da grade. Onde vetor de onda da grade tem direção normal aos planos formados pela grade de difração. Portanto, tem-se que a variação dos vetores de onda incidente e espalhado é dada por[6]:

$$\Delta K = K_g = \frac{2 * \pi}{\Lambda} \quad (3.4)$$

Pela equação de conservação de energia e considerando o acoplamento entre os modos fundamentais co-propagante e contra-propagante, temos que a energia do vetor incidente e espalhado tem o mesmo valor, Logo:

$$2 * K_i = \frac{2 * \pi}{\Lambda} \quad (3.5)$$

Temos que,

$$K_i = \frac{2 * \pi * \eta_{eff}}{\lambda} \quad (3.6)$$

Onde  $\eta_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo. Portanto,

$$\frac{4 * \pi * \eta_{eff}}{\lambda} = \frac{2 * \pi}{\Lambda} \quad (3.7)$$

Logo, encontra-se a condição de casamento de fase de Bragg, que nos resulta no comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ):

$$\lambda_B = 2 * \eta_{eff} * \Lambda \quad (3.8)$$

### 3.1.2 Refletividade das FBG's

Para se obter o espectro total refletido em uma FBG, é necessário resolver equações de modos acoplados[16]. Em uma modulação de índice senoidal uniforme, as equações de modos acoplados possuem solução analítica[6]. Temos que o índice de refração em uma FBG é:

$$\eta_{eff}(z) = \eta_{0eff} + \Delta\eta_{eff} * \cos\left(\frac{2*\pi*z}{\Lambda}\right) \quad (3.9)$$

Onde  $\eta_{0eff}$  é o índice de refração efetivo médio do núcleo e  $\Delta\eta_{eff}$  é a intensidade de modulação do índice de refração efetivo do núcleo. Assim, temos que a refletividade, para uma fibra monomodo com período de modulação muito menor que o comprimento da grade, é dada por[6]:

$$R(\lambda) = \frac{k^2 * \sinh^2(sL)}{\Delta\beta * \sinh^2(sL) + s^2 * \cosh^2(sL)} \quad (3.10)$$

L sendo o comprimento da grade de Bragg,  $\beta$  é a constante de propagação do modo fundamental do núcleo,

$$\beta = \frac{2*\pi*\eta_{eff}}{\lambda} \quad (3.11)$$

E  $\Delta\beta$  é o vetor de onda de sintonização entre os modos co-propagante e o contra-propagante do núcleo.

$$\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} \quad (3.12)$$

O parâmetro s, usado para definir as extremidades da banda do sinal, é calculado por:

$$s^2 = k^2 - \Delta\beta^2 \quad (3.13)$$

Com k sendo o coeficiente de acoplamento. Para variações senoidais do índice de refração do núcleo da fibra:



$$k = \frac{\pi * \Delta\eta_{eff}}{\lambda} \quad (3.14)$$

A máxima refletividade ocorre no comprimento de onda que satisfaz  $\Delta\beta = 0$ . Logo, o pico de refletividade é:

$$R_{pico} = \tanh^2(kL) \quad (3.15)$$

Para um valor real de  $s$ , a potência do modo incidente decai exponencialmente na direção  $z$ ; ou seja, a potência do modo refletido cresce exponencialmente na direção oposta. Por outro lado, nenhum outro decaimento ou crescimento ocorre, e então os modos evoluem senoidalmente. Portanto, os pontos em que  $s^2 = 0$  podem ser definidos como as extremidades da banda[10]. A curva de refletividade em função do comprimento de onda para uma grade uniforme de índice de refração efetivo  $\eta_{0eff} = 1.467$ , amplitude de modulação  $\Delta\eta_{eff} = 6 \times 10^{-5}$ , período  $\Lambda = 0.531 \mu\text{m}$  e comprimento  $L = 1 \text{ cm}$  é mostrada na figura 5[8].

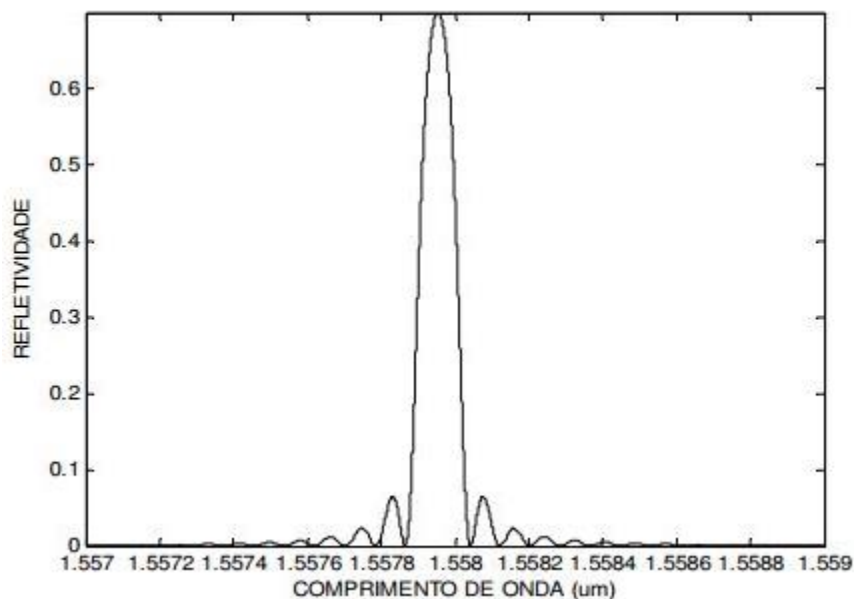


Figura 5 - Curva de refletividade de uma grade de Bragg uniforme em função do comprimento de onda[8].

### 3.1.3 Sensibilidade à Temperatura

Em sensores de temperatura a sensibilidade é dominada pelo efeito termo-óptico, ou seja, pela variação do índice de refração com a temperatura. Ocorrem também variações na periodicidade das grades de difração devido à dilatação térmica. Porém, esse efeito é muito menor que o efeito termo-óptico [6].

A variação do comprimento de onda de Bragg com temperatura e deformação mecânica é definida por[6].

$$\Delta\lambda_B = 2n\Lambda \left( \left\{ 1 - \left( \frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon + \left[ \alpha + \frac{\left( \frac{dn}{dT} \right)}{n} \right] \Delta T \right) \quad (3.16)$$

Onde  $\varepsilon$  é uma deformação aplicada à fibra,  $p_{ij}$  são os coeficientes piezoelétricos de Pockel do tensor stress óptico,  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $\alpha$  é o coeficiente de expansão térmica do material da fibra e  $\Delta T$  é a variação de temperatura. O termo sendo multiplicado por  $\varepsilon$  corresponde à variação do comprimento de onda a partir de uma deformação mecânica da fibra, que para achar a responsividade térmica normalizada considera-se constante. Assim, a responsividade é dada por:

$$\frac{1}{\lambda_B} * \frac{\delta\lambda_B}{\delta T} = 6,67 * 10^{-6} C^{-1} \quad (3.17)$$

Os valores de sensibilidade à temperatura de um sensor FBG dependem do tipo de fibra e do tipo de FBG gravada, sendo valores comuns desde 6,8pm/°C[10]. até 14,18pm/°C[2], este último sendo encontrado em uma fibra de sílica com núcleo dopado com germânio com uma grade de Bragg de comprimento de onda de ressonância de 1550nm.

Um estudo feito por [12] a fim de determinar a sensibilidade de uma FBG à temperatura utilizou um sensor FBG comercial de período uniforme, com as seguintes características[12]:

- Comprimento de onda de operação: 1550,12 nm;
- Largura de banda: 0,194 nm;
- SLSR (*Side Lobe Suppression Rate*): 19,5dB;
- Refletividade 92,5 %;
- Período das marcações no núcleo da fibra: 0,5 $\mu$ m.

Com esses dados, foi feita uma simulação no *software Matlab*, chegando ao resultado demonstrado na figura 6. A variação média obtida foi de 8,6032 pm/°C[12].

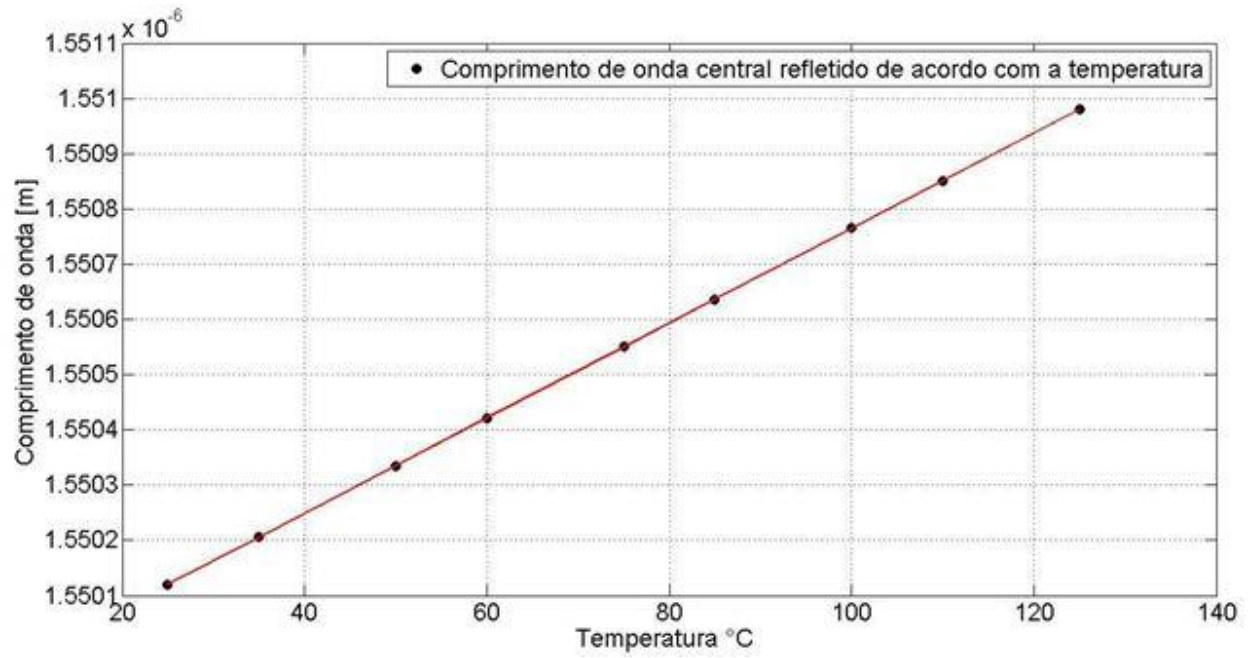


Figura 6 – Simulação da resposta de uma FBG de acordo com a temperatura[12].

Um ensaio prático também foi realizado, utilizando do mesmo sensor FBG descrito anteriormente, obtendo-se o resultado mostrado na figura 7. A variação média obtida foi de 8,469pm/°C [12].

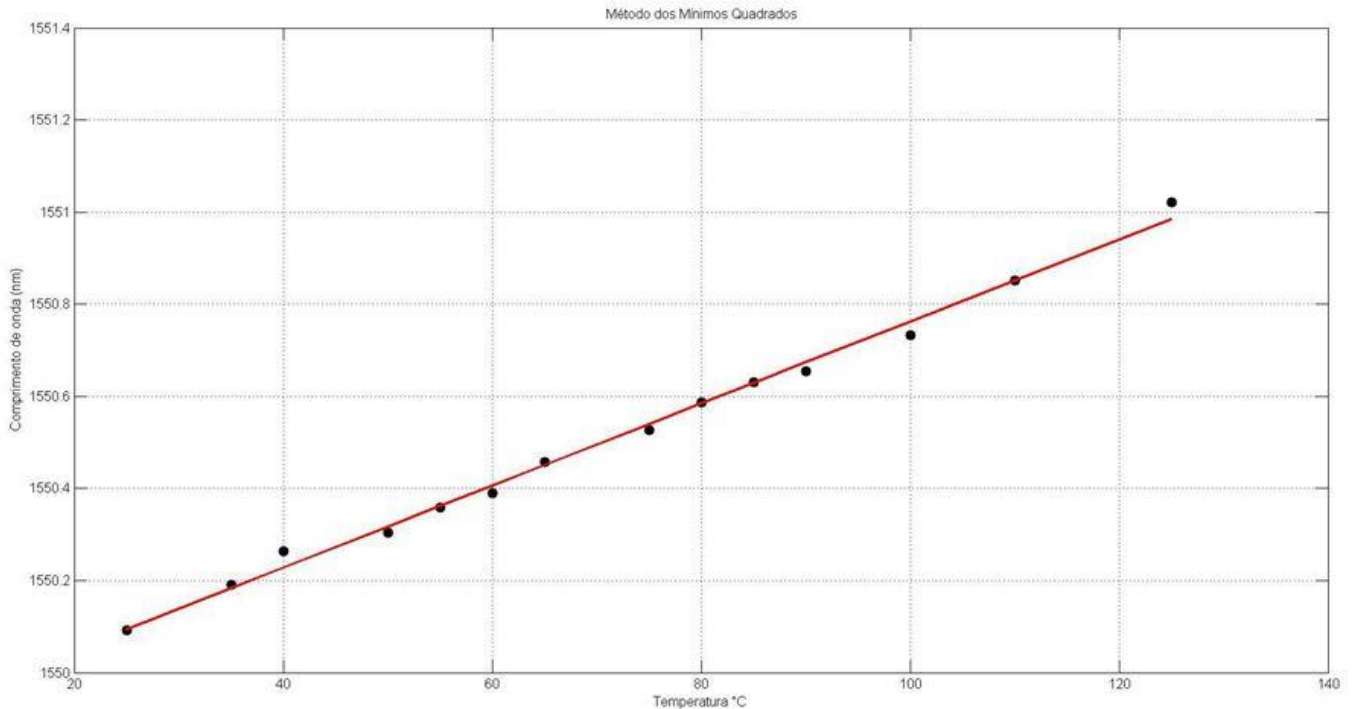


Figura 7 – Linearização dos dados do ensaio da resposta de uma FBG de acordo com a temperatura[12].

### 3.2 GRADES DE PERÍODO LONGO

Grades de difração consistem em marcações, geralmente periódicas, que modulam o índice de refração do núcleo. Quando o período dessas marcações é curto, em torno de  $0.5\mu\text{m}$ , temos uma grade de Bragg. Já as redes de período longo (LPG) apresentam períodos muito maiores, entre  $100\mu\text{m}$  e  $1\text{mm}$ . Em uma grade de Bragg ocorre o acoplamento entre os modos fundamentais co-propagante e contra-propagante do núcleo em um comprimento de onda de ressonância específico. Já em uma LPG, o acoplamento acontece entre o modo fundamental do núcleo e os diferentes modos evanescentes da casca na fibra óptica. Como não há condição de guiamento para os modos de casca, devido às condições de fronteira entre a casca da fibra e o meio externo, uma alta atenuação ocorre nesses modos, o que causa um espectro de transmissão do sinal com múltiplos picos de rejeição nos comprimentos de onda ressonantes. Como em uma LPG não há uma reflexão em parte do espectro como há na FBG, trabalha-se com o sinal de transmissão para detecção e interrogação.

Como visto na seção 3.1.1, a condição de fase nas grades de difração se baseia nos princípios da conservação de energia e momento. Na FBG, essa conservação se dava pela diferença entre os modos acoplados co-propagante e contra-propagante. Analogamente, na LPG, a conservação de momento se dá pela diferença entre o modo fundamental propagante do núcleo e os modos evanescentes propagantes da casca, o que explica o maior período da lpg, como pode ser visto pela figura 8.

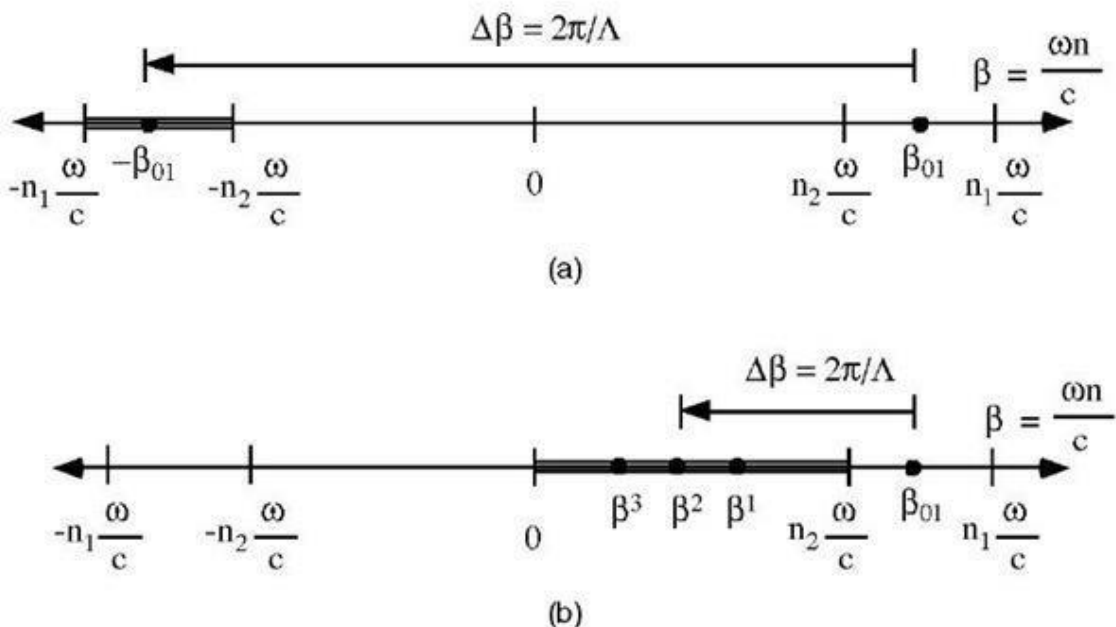


Figura 8 - Diagrama de sintonização de modos na operação de grades de Bragg (a) e em grades de período longo (b) [6].

Seguindo o raciocínio utilizado para uma FBG, chegamos condição de ressonância de ordem  $m$   $\lambda_m$  para LPG[6]:

$$\lambda_m = (n_{01} - n_c^m) * \Lambda \quad (3.18)$$

Onde  $n_{01}$  representa o índice de refração efetivo do modo fundamental do núcleo e  $n_c^m$  representa o índice de refração efetivo do m-ésimo modo evanescente, que por sua vez é função dos índices de refração do núcleo, da casca e do meio. Como podemos notar da equação (3.18), como temos uma diferença de índices, este valor será menor que o valor para uma FBG. Portanto, para um mesmo comprimento de onda de ressonância, tem-se um período maior de modulação do índice de refração do núcleo. Este período nos permite uma maior flexibilidade ao fabricar as grades, o que nos permite utilizar equipamentos menos precisos e mais baratos, que por sua vez barateia todo o processo de fabricação de um sensor LPG, como por exemplo o uso de esquemas de fabricação utilizando arco elétrico em máquinas de fusão de fibras.

### 3.2.1 Sensibilidade das LPG's

Como visto na equação (3.18), o comprimento de onda de ressonância de uma LPG não só depende do período de marcação da grade e do índice de refração do núcleo, como em uma FBG, mas também dos índices de refração dos modos de casca. Esses índices, por sua vez, dependem do meio ao redor da fibra. Essa diferença entre uma LPG e FBG explica a superioridade de uma LPG em funcionar como sensor refractométrico.

Para analisar a sensibilidade de uma LPG, é necessário diferenciar a equação (3.18) em relação à temperatura:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \Lambda * \left( \frac{d(n_{01} - n_c^m)}{dT} \right) + (n_{01} - n_c^m) * \frac{d\Lambda}{dT} \quad (3.19)$$

Vemos que a diferenciação nos dá duas parcelas. A primeira parcela corresponde à variação do índice de refração efetivo em relação à temperatura, denominado efeito termo-óptico. A segunda parcela corresponde à variação do período de modulação da grade conhecido como expansão térmica. A influência do coeficiente de expansão térmica é, em regime de operação normal ( $\Lambda > 100\mu\text{m}$ ), em torno de cem vezes menos influente que o termo-óptico, podendo ser considerado em aplicações práticas como desprezível. Porém em acoplamentos de mais alta ordem este fator não pode ser mais desprezado podendo no caso alcançar valores de sensibilidade negativa[6].

## 4 SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO PARA SENSORES BASEADOS EM GRADES DE DIFRAÇÃO

Interrogar uma FBG significa determinar as suas características: refletividade, largura de banda e principalmente o comprimento de onda de Bragg. O comprimento de onda do pico de reflexão é o principal parâmetro de interesse em sistemas sensores, pois conhecendo a sensibilidade da FBG à temperatura e/ou deformação e dispondo de um sistema capaz de detectar pequenas variações em  $\lambda_m$  é possível associar estas variações à medida de algum agente externo à fibra[11]. Os métodos de interrogação ópticos utilizados em laboratórios são precisos e fáceis de serem utilizados, porém não são ideais para a utilização comercial, pois são caros, ocupam muito espaço e são ineficazes para medidas em tempo real. Por isso, métodos de interrogação alternativos são estudados para aumentar a eficiência e praticidade de um sensor óptico comercial. Neste capítulo será apresentada algumas dessas técnicas alternativas que podem ser utilizadas para substituir os métodos convencionais de interrogação.

### 4.1 INTRODUÇÃO

Ao contrário dos sistemas baseados em sensores de intensidade, detectar sinais codificados em comprimento de onda não é um processo simples. A menor variação detectável no comprimento de onda da FBG é o principal fator que determina a resolução nas medidas de temperatura, deformação ou outro parâmetro qualquer. Por outro lado, o sistema codificado em comprimento de onda possui a vantagem de ser praticamente imune a variações de amplitude causadas por flutuações na fonte óptica ou perdas por conexões, embora uma baixa relação sinal-ruído seja indesejável, pois prejudica o processo de identificação do comprimento de onda dos sensores pelo sistema[11].

O método mais simples de interrogar um sensor é utilizando um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*), como mostra a figura 9. O LED (*Light Emitting Diode*) ilumina a fibra, passando pelo acoplador e chegando até os sensores. Neles, ocorre a modulação do sinal luminoso. Feito isso, o sinal retorna pelo acoplador e chega ao OSA. Com o analisador de espectro tem-se diretamente a informação do comprimento de onda de Bragg do sinal modulado. Porém, o OSA é um equipamento caro, e nos dá mais informação do que o necessário. Como toda a informação de interesse de modulação do sinal está presente no comprimento de onda de ressonância, não é necessário a visualização de todo o espectro óptico do sinal.

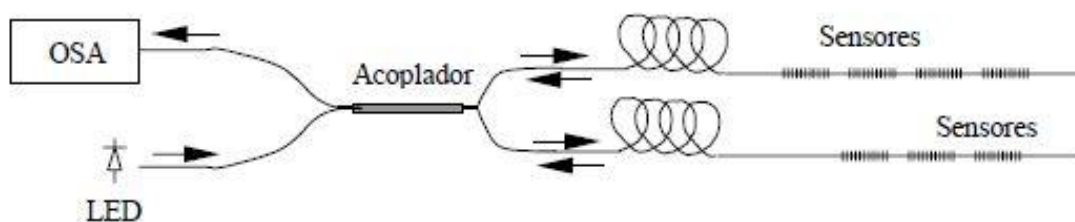


Figura 9 – Circuito óptico para leitura com um Analisador de Espectro Óptico (OSA) [10].

Pode-se substituir o analisador de espectro e interrogar um sensor de diversos modos. Estes modos de demodulação possuem diferentes níveis de custo e complexidade. Existem diversas formas de classificar um esquema de interrogação de um sensor baseado em grade de Bragg. Pode-se classificá-lo pelo tipo de multiplexação utilizada; ou pela característica do elemento que executa demodulação ser passivo ou ativo; ou pelo seu método de funcionamento[2].

Nos esquemas de interrogações passivos, os elementos envolvidos na demodulação não são energizados. É o caso de esquemas que utilizam filtros dependentes do comprimento de onda, técnicas baseadas no monitoramento da potência óptica ou utilizam redes de difração[2].

Já nos esquemas de interrogações ativos, empregam-se elementos que precisam de energia para realizar a demodulação. Entre esses esquemas, estão os que utilizam filtros sintonizáveis ou que aplicam técnicas de interferometria[2].

## 4.2 SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO ATIVOS

### 4.2.1 *Interrogação utilizando filtros e fontes sintonizáveis*

A ideia central do método baseado em filtro sintonizável consiste em rastrear o sinal refletido pela FBG sensora através da varredura do espectro do filtro dentro da faixa de operação do sensor. O número máximo de sensores que o sistema pode interrogar depende da largura espectral da fonte, da faixa de sintonia do filtro, da separação espectral entre os sensores e da forma como as redes são multiplexadas[11].

Filtros de Fabry-perot (FFP) são comumente utilizados como filtros sintonizáveis em esquemas de interrogação. O filtro de Fabry-Perot possui a característica de variar sua banda óptica de passagem conforme a largura de sua cavidade de ressonância. A largura de sua cavidade pode ser modificada mecanicamente ou por um de sinal elétrico aplicado a um material piezoelétrico[2]. Um esquema de interrogação para FBGs utilizando um filtro sintonizável é ilustrado na figura 10. Faz-se variar a banda passante do filtro de forma alternada através de rampas lineares, de tal maneira que cada um dos sensores interrogados é sequencialmente iluminado[15].

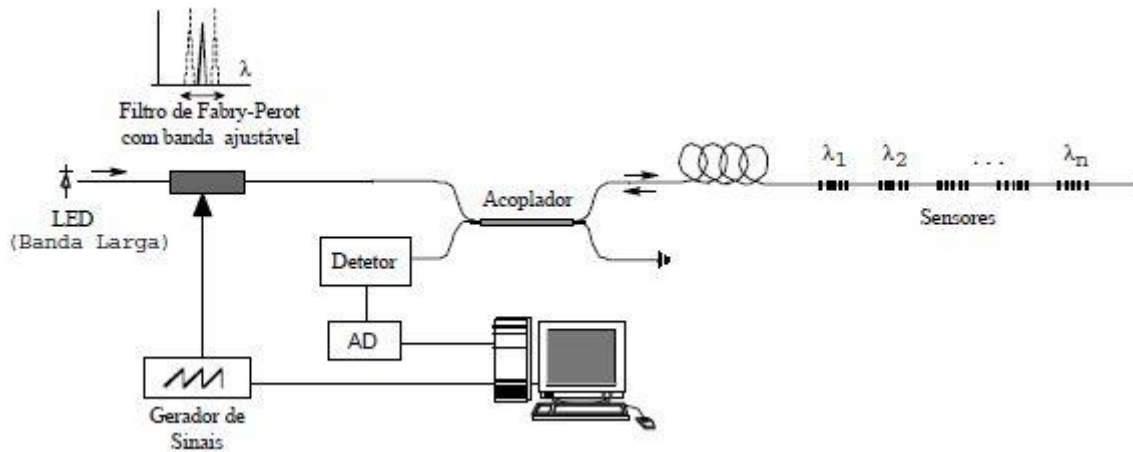


Figura 10 – Esquema de interrogação utilizando filtro sintonizável[15].

Neste esquema, um LED gera um sinal de banda larga, que é filtrado pelo filtro de Fabry-Perot de acordo com o sinal gerado pelo computador. Ao passar pelo filtro, o sinal mantém apenas uma parte de seu espectro, relacionado a um dos sensores a serem interrogados. Com isso, apenas uma das FBGs produz um sinal de reflexão forte, que vai passar pelo detetor e retirar a informação de comprimento de onda de Bragg. Vale notar que o filtro pode ser também posicionado logo antes do detetor, trabalhando com a seleção dos espectros refletidos, um de cada vez.

Em vez de utilizar uma fonte de banda larga e uma fonte sintonizável, é possível também utilizar fontes sintonizáveis. A utilização de um laser sintonizável na interrogação de sensores FBG melhora consideravelmente a SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), uma vez que a densidade espectral de potência óptica do sinal laser é muito maior do que a do sinal gerado por uma fonte de banda larga[11].

A utilização de um laser a fibra no sistema possui diversas vantagens sobre os outros tipos de fontes sintonizáveis, particularmente na facilidade de se lançar o sinal laser gerado pela cavidade no circuito óptico[11]. Porém, apresenta um custo relativamente maior.

#### 4.2.2 Interrogação utilizando métodos interferométricos.

Neste esquema de demodulação a variação do comprimento de onda de Bragg causado por um parâmetro externo é convertido em variação de fase. O método mais comum de interrogação por interferometria é o método de interrogação por interferômetro de Mach-Zehnder. Um exemplo de um esquema deste tipo pode ser visto na figura 11. Nele, o sinal refletido pela FBG se divide e percorre os dois caminhos presentes no interferômetro de Mach-Zehnder. Pela diferença do caminho óptico entre os dois braços do interferômetro, cada uma das partes do sinal sai do interferômetro com uma fase diferente. Essa diferença de fase é dependente, dentre outras coisas, do comprimento de onda de ressonância do sinal refletido, que carrega a informação de variação do parâmetro externo de interesse.



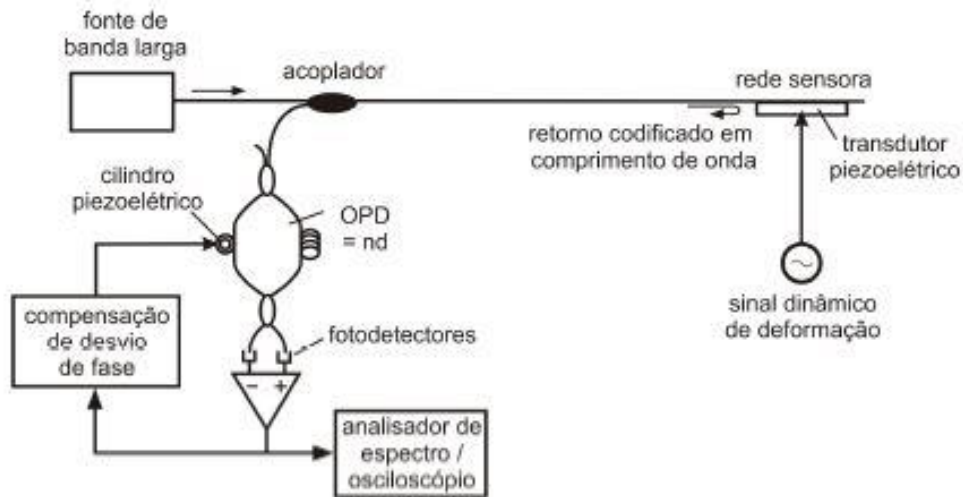


Figura 11 – Esquema de interrogação utilizando um interferômetro de Mach-Zehnder[11].

A variação de fase em relação à variação do comprimento de onda de Bragg é dada pela equação[2].

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\eta_{eff}d}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad (4.1)$$

Aonde  $\Delta\varphi$  representa a variação de fase,  $\eta_{eff}$  é o índice de refração efetivo,  $d$  é a diferença entre os caminhos ópticos e  $\lambda$  e  $\Delta\lambda$  são o comprimento de onda da fonte de luz e a variação do comprimento de onda respectivamente.

Os esquemas utilizando interferômetros apresentam respostas rápidas e de alta precisão, tornando esses esquemas ideais para aplicações dinâmicas. Entretanto, eles também apresentam desvantagens, tais como a vulnerabilidade às variações de temperatura e de vibrações, além de um alto custo, o que inviabiliza em determinadas aplicações o seu uso comercial[5].

### 4.3 SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO PASSIVOS

#### 4.3.1 Esquema de interrogação utilizando filtros fixos

A utilização de filtros fixos a fim de interrogar FBGs e LPGs é bastante comum. É possível utilizar filtros de Fabry-Perot, FBGs e até LPGs como filtros fixos. A Figura 12 apresenta um exemplo de esquema de demodulação utilizando filtro fixo.

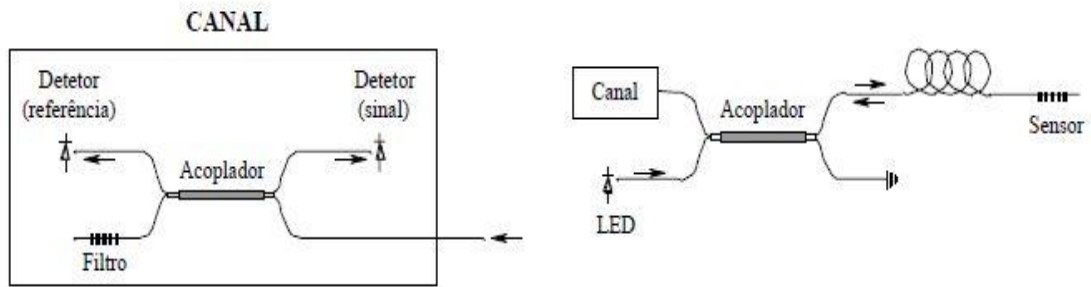


Figura 12 – Esquema de interrogação utilizando filtros fixos[15].

O sistema emprega fontes de banda larga e o sinal refletido pela rede utilizada como sensor é dirigido, através de um acoplador de 3 dB, para o filtro e para um detector de referência. O sinal óptico resultante da interação com o filtro é então guiado para o outro detector, e sua saída elétrica é dividida pela obtida a partir do detector de referência. A utilização de um sinal de referência tem por objetivo compensar flutuações na fonte óptica[15].

A principal vantagem na utilização de filtros espectrais fixos é a possibilidade de aplicação em medidas dinâmicas de poucos sensores. A faixa de frequência é limitada pela resposta dos fotodetectores e dos circuitos eletrônicos de amplificação utilizados[15].

#### 4.3.1.1 Esquema de interrogação de uma LPG utilizando filtros fixos

Esquemas de Interrogação de LPGs são geralmente realizados com analisadores de espectro ópticos ou por detecção de variação de potência óptica em um ou mais comprimentos de onda localizados nas bordas do espectro de transmissão de uma LPG[9].

Utilizando filtros fixos, tais como FBGs, podemos selecionar dois comprimentos de onda, um em cada borda de um espectro de transmissão de uma LPG, e utilizar detectores para medir a potência óptica desses comprimentos de onda, como visto na figura 13.

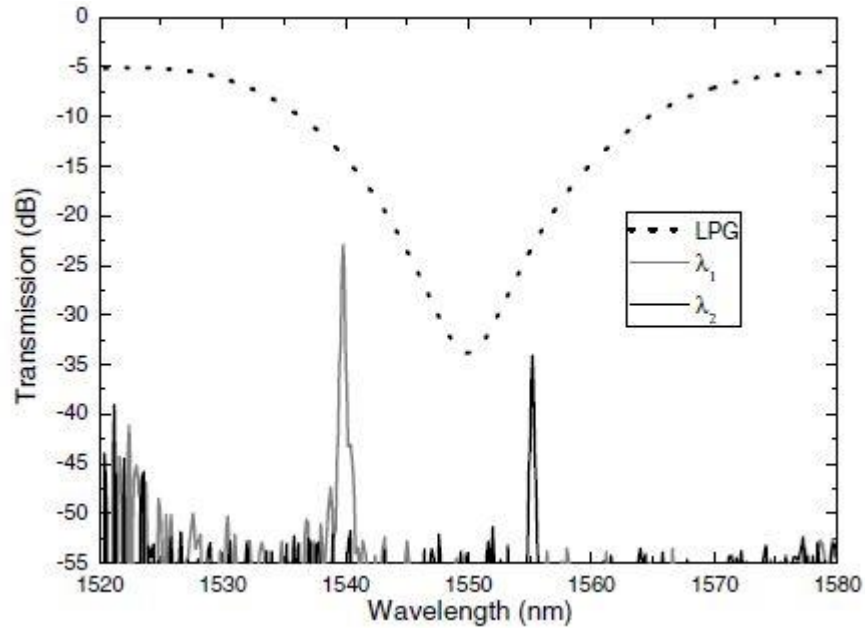


Figura 13 – Espectro óptico das FBGs e LPG, escritas em uma fibra Corning®SMF-28e®[4].

Com essas potências, e utilizando de uma relação entre as duas, podemos retirar a informação de variação do parâmetro externo de interesse, independente das flutuações de amplitude que possam ocorrer no sistema, apresentando imunidade ao ruído de intensidade da fonte. A relação entre as duas potências é dada por[4]:

$$R = \frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 + P_2)} \quad (4.2)$$

Onde  $P_1$  e  $P_2$  são as duas potências dos comprimentos de onda de borda e  $R$  é o parâmetro que se relaciona diretamente a variação do parâmetro externo de interesse. Um exemplo de esquema de interrogação de LPG utilizando 2 FBGs pode ser visto na figura 14. Este esquema apresenta um custo menor devido à utilização do ESA (*Electrical Spectrum Analyzer*), além de apresentar uma melhor resposta temporal da solução utilizando o PZT (titanato zirconato de chumbo), porém o *range* de medida é limitado a excursão da região linear aproximada da LPG.

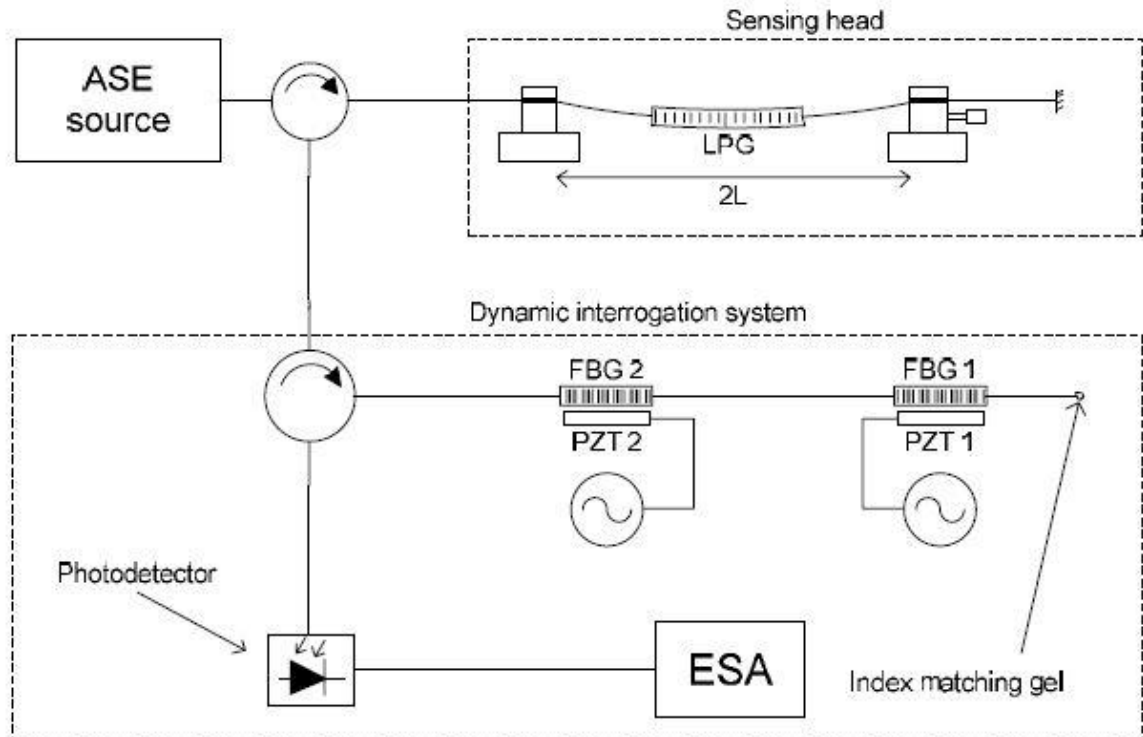


Figura 14 – Esquema de interrogação de uma LPG utilizando 2 FBGs como filtros fixos[4].

## 5 CARACTERIZAÇÃO DE UMA FBG SIMULADA

O *optigrating* é um *software* de simulação de funcionamento de fibras ópticas contendo grades de difração. O *software* usa a teoria dos modos acoplados para modelar a luz e permitir a síntese de grades. Uma grade é aproximada por uma sequência de segmentos uniformes, e analisados conectando os segmentos com o método das matrizes de transferência. Com esse *software* temos as informações necessárias para testar e otimizar o *design* de grades. Neste capítulo serão apresentadas várias simulações feitas utilizando o *software optigrating* para determinar as características de uma grade de Bragg e como elas se alteram quando alguns dos parâmetros da grade variam.

### 5.1 INTRODUÇÃO

Utilizando o *optigrating*, foram feitas várias simulações com o intuito de estudar o comportamento de uma fibra óptica marcadas com grades de Bragg. Foram simulados variação nos parâmetros da fibra, variação nos parâmetros da grade e variação na temperatura ambiente.

Inicialmente, foram ajustados os parâmetros da fibra, utilizando os valores padrões de uma fibra óptica de sílica, como mostrado nas figuras 15 e 16. Depois, foram ajustados os

parâmetros da grade de Bragg, novamente de acordo com valores padrões, como visto nas figuras 17 e 18.

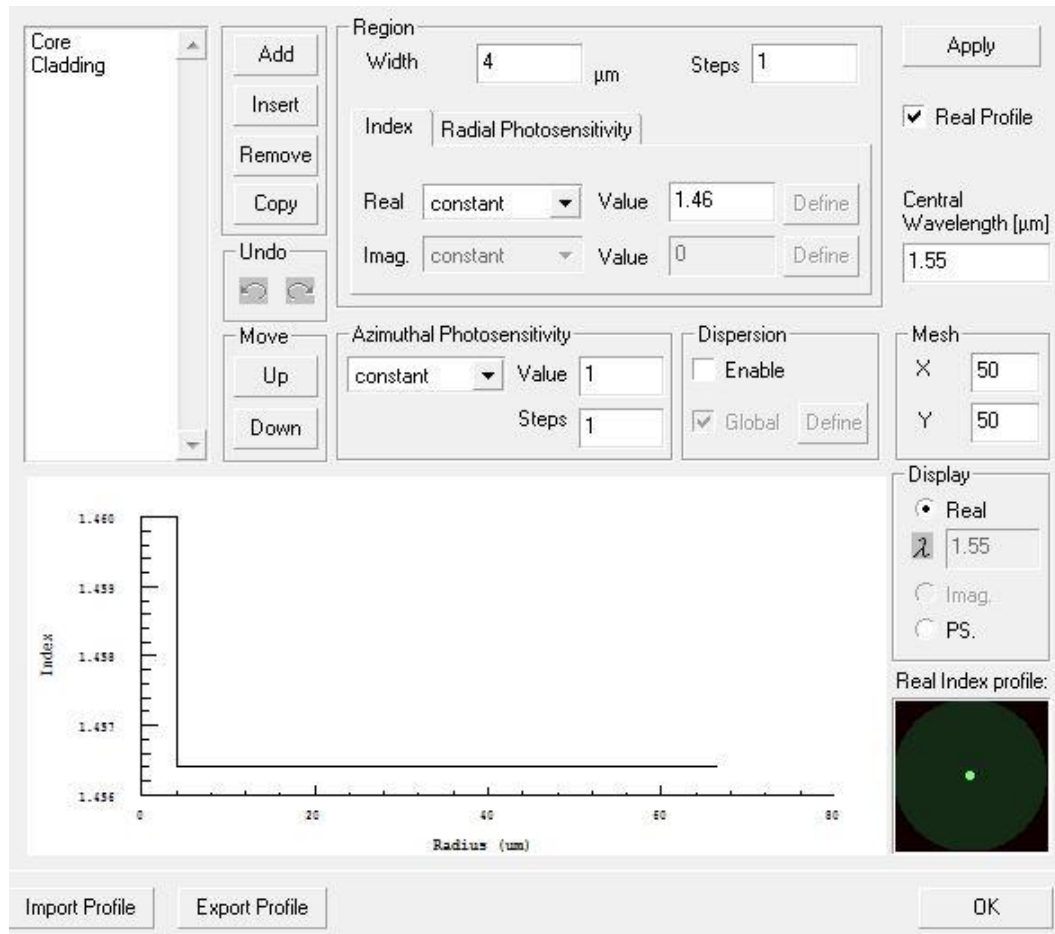


Figura 15 – Parâmetros da fibra usados como padrão para as simulações.

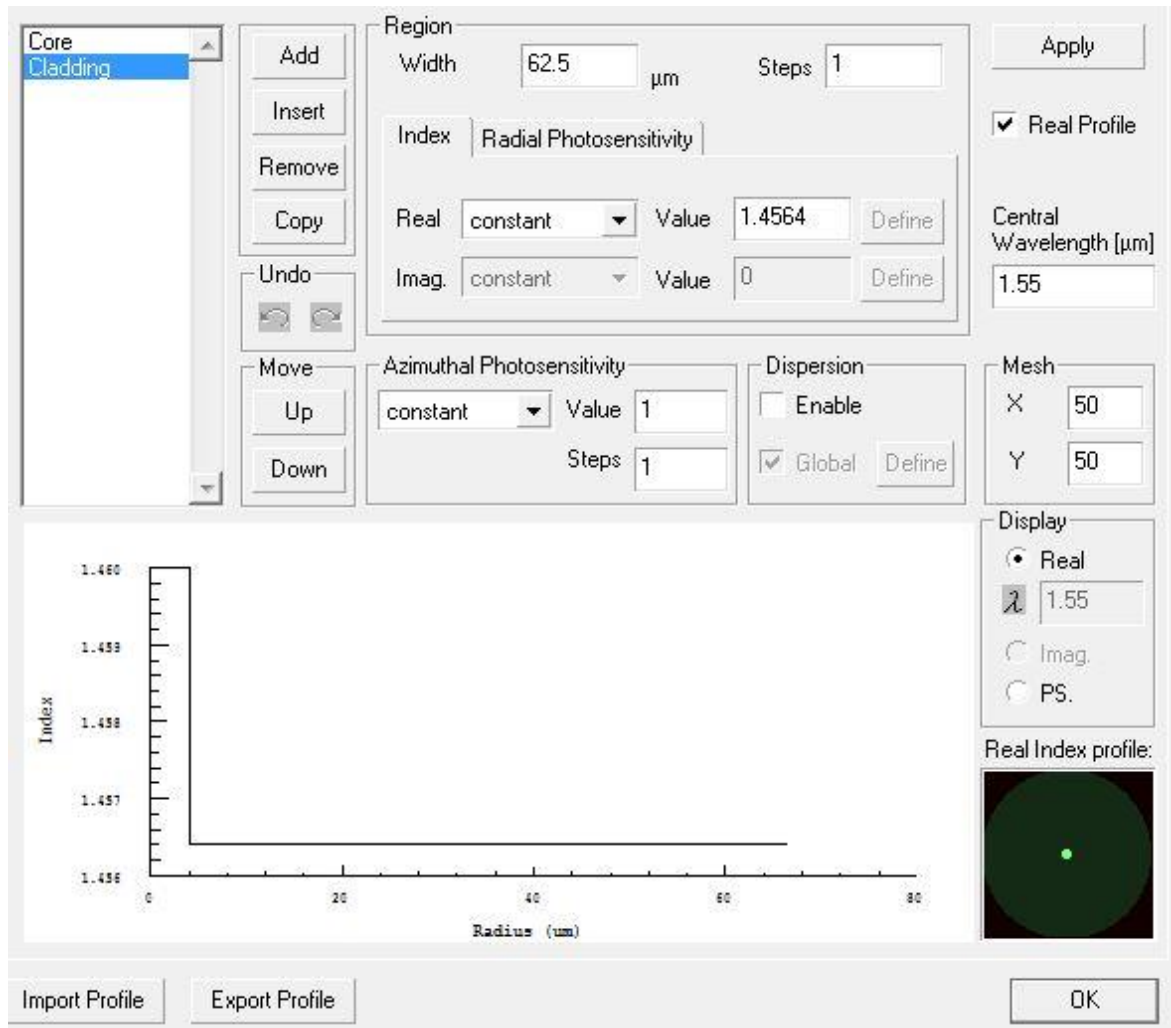


Figura 16 - Parâmetros da fibra usados como padrão para as simulações.

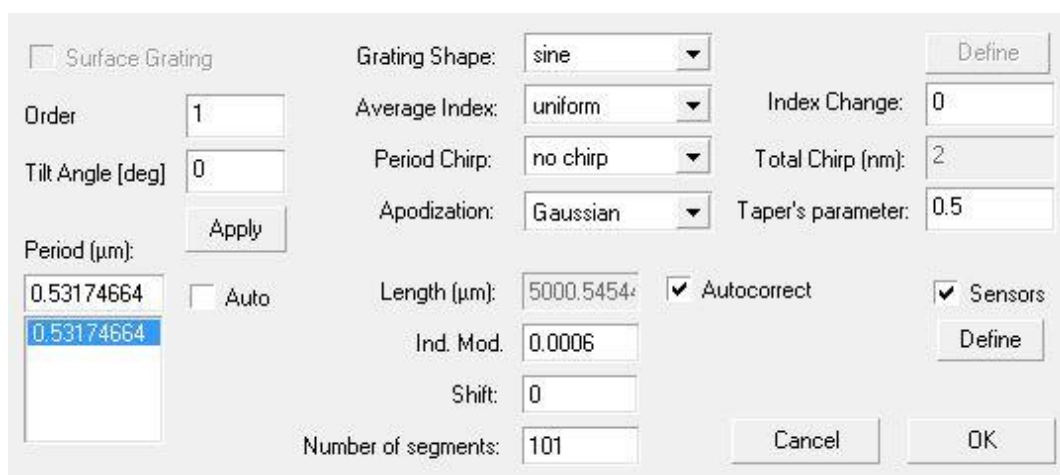


Figura 17 – Parâmetros da grade usados como padrão para as simulações.

<input checked="" type="checkbox"/> Strain - optic parameters <input type="checkbox"/> Strain - optic coefficient [1/ $\mu\epsilon$ ] -0.2145 <input checked="" type="radio"/> Photoelastic coefficients P11 0.121      P12 0.27 Poisson ratio 0.17		Micro-strain uniform Constant 0 0 User function	
<input checked="" type="checkbox"/> Thermo - optic parameters Thermal Expansion Coefficient [1/C] 5.5e-007 Thermo - optic coefficient [1/C] 6.61e-006 Reference Temperature [C] 25		Temperature uniform Constant [C] 25 [C] 0 User function	

Figura 18 – Parâmetros da grade usados como padrão para as simulações.

Utilizando os valores da seção anterior como padrão, foi feita uma simulação e se alcançou o espectro mostrado na figura 19. A figura 20 nos mostra que o comprimento de onda de Bragg dessa FBG está em 1550nm. A largura de banda de 3dB deste sinal é de 0.6nm.

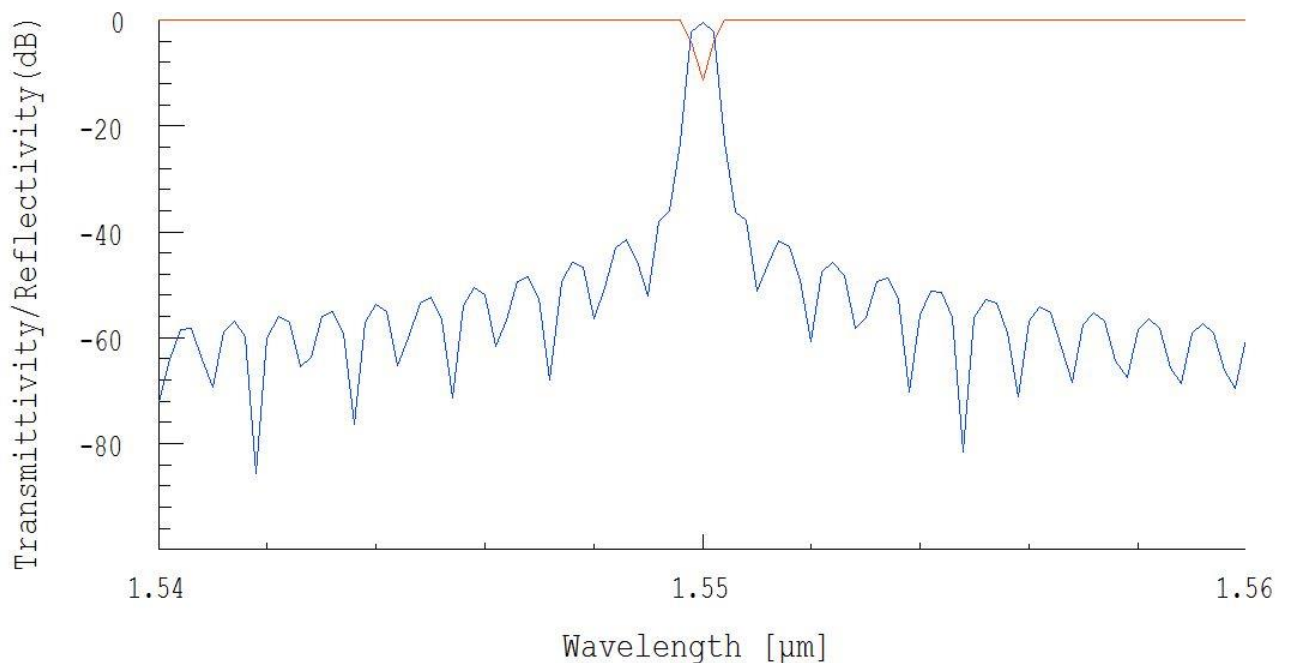


Figura 19 – Espectro de transmissão(vermelho) e reflexão(azul) do sinal simulado.

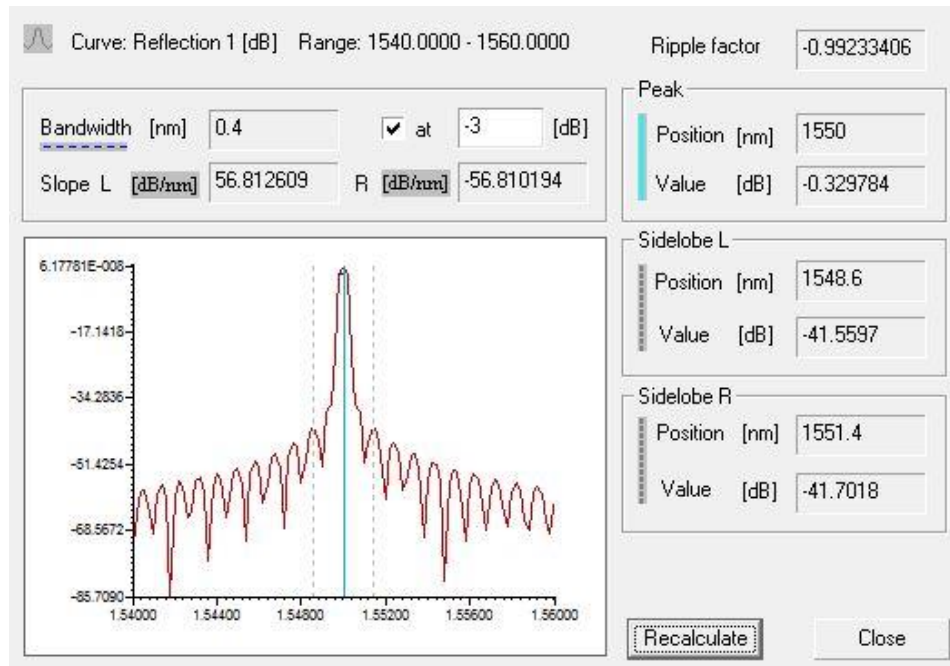


Figura 20 – Determinação do comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão.

## 5.2 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM O PERÍODO DA GRADE

Em seguida, variou-se o período da grade, a fim de analisar o impacto da imprecisão do processo de marcação de uma grade de Bragg, e com cada variação foi analisada posição do comprimento de onda de Bragg. A figura 21 mostra como foi feita a primeira simulação.

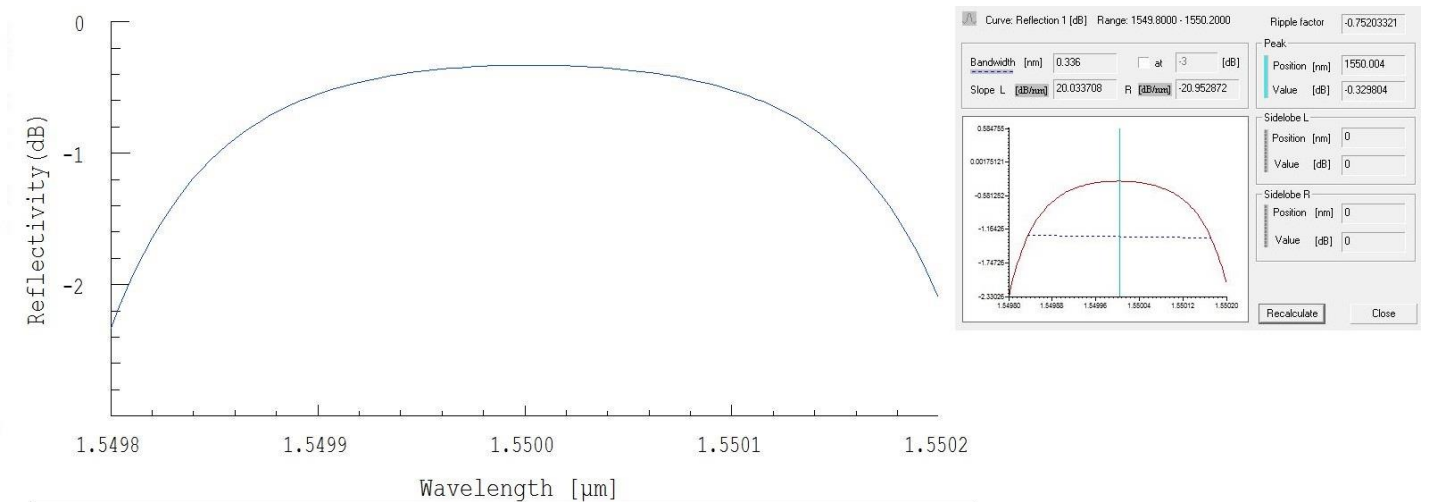


Figura 21 – Primeiro passo da simulação da variação do comprimento de onda de Bragg com o período.

Seguindo este modo de simulação, foram feitas várias variações no período e o resultado pode ser visto na tabela 1.



Tabela 1 – Variação do comprimento de onda de Bragg com o período da grade.

Varição do período da grade	Varição do comprimento de onda de Bragg
1 pm	4 pm
5 pm	16 pm
10 pm	30.5 pm
20 pm	58 pm
1 nm	2.905nm

Temos então que, de acordo com as simulações, para essa grade a variação do comprimento de onda de Bragg com o período da grade gira em torno de um valor médio de 3,3 pm de variação do comprimento de onda de Bragg para cada picômetro variado no período da grade, o que demonstra a necessidade de precisão na escrita da FBG, pois a variação de 1nm no período da grade leva ao desvio de aproximadamente 3nm.

### 5.3 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA COM O ÍNDICE DE REFRAÇÃO DA FIBRA

Continuando com as simulações, variou-se a diferença entre o índice de refração do núcleo e o índice de refração da casca. Essas variações são comuns devido a diferenças de índice de núcleo e casca em diferentes processos de dopagem durante a fabricação das fibras ópticas ou por imperfeições no processo de fabricação. A figura 22 mostra o espectro refletido encontrado utilizando os valores dos índices de refração de 1.46 para o núcleo e 1.4564 para a casca.

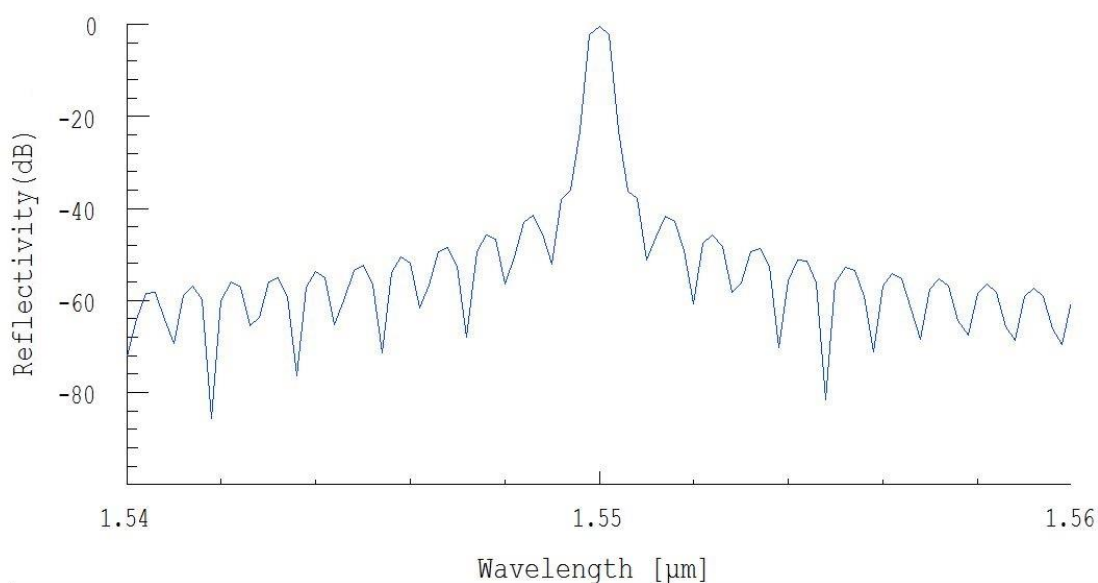


Figura 22 – espectro refletido para uma fibra de índices de refração de 1.46 e 1.4564.

Mantendo o índice de refração da casca fixo e variando o índice de refração do núcleo, obtivemos os resultados apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a variação do índice de Refração.

Varição do índice de Refração	Varição do comprimento de onda de Bragg
-0.001	-0.600nm
0.001	0.710nm
0.002	1.500nm
0.005	4.090nm

Pode-se notar, pelos resultados da tabela, que ocorre uma variação de aproximadamente 0.720nm para cada variação de 0.001 no índice de refração do núcleo da fibra.

#### 5.4 VARIAÇÃO DA LARGURA DE BANDA COM A INTENSIDADE DA MODULAÇÃO

Em seguida, variou-se a intensidade da modulação do índice de refração do perfil da grade. A figura 23 nos mostra o espectro encontrado utilizando o valor padrão da intensidade da modulação de 0.0006. A tabela 3 nos mostra os resultados da simulação.

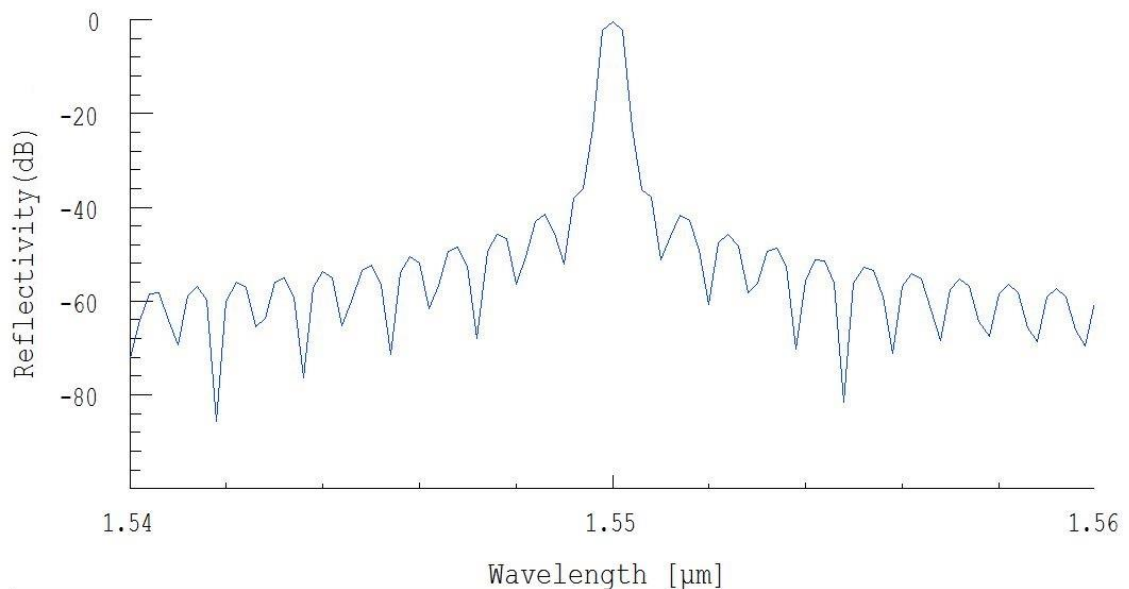


Figura 23 – espectro refletido para uma fibra com intensidade de modulação de 0.0006.

Tabela 3 – Variação da largura de banda de 3dB com a variação da intensidade da modulação.

Varição da intensidade da modulação	Varição da largura de banda de 3dB
0.0001	0.08nm
0.0002	0.16nm
0.0003	0.28nm
0.0005	0.48nm
0.001	0.96nm

De acordo com as simulações, vemos que a variação na intensidade de modulação do perfil da grade não afeta o comprimento de onda de Bragg, mas sim a largura de banda, aproximadamente 0,09nm para cada 0.0001 variado na intensidade de modulação, o que condiz com a teoria vista na seção 3.1.2.

## 5.5 VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA DE BRAGG COM A TEMPERATURA

Variando a temperatura ambiente, foi registrado os valores de variação de comprimento de onda de Bragg em uma simulação com uma única grade. A tabela 4 nos mostra os resultados da simulação. O valor de variação de temperatura simulado é um desvio da temperatura padrão de 25°C. Por exemplo, para a primeira variação de temperatura de 1°C a temperatura do ambiente será 26°C. Esta lógica será aplicada também à todas as outras simulações deste trabalho.

Tabela 4 – Variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura.

Varição da temperatura	Varição do comprimento de onda de Bragg
1°C	12 pm
5°C	57 pm
10°C	112 pm
20°C	220 pm
30°C	332 pm

De acordo com as simulações, vemos que o comprimento de onda de Bragg varia de modo quase constante com a temperatura, por um fator médio 11,3pm/°C para essa grade.

## 6 SIMULAÇÃO DE ESQUEMAS DE INTERROGAÇÃO DE GRADES DE DIFRAÇÃO

O programa *OptiSystem* é um *software* para sistemas de comunicação óptica utilizados nas simulações dos sistemas. Este *software* pode ser usado em qualquer tipo de *link* óptico na camada física de um amplo espectro de redes ópticas. Além disso, permite que sejam realizadas simulações de outras aplicações, como esquemas de sensoriamento. Para isto, dispõe de várias bibliotecas com diversos componentes utilizados nos sistemas reais, permitindo aos usuários planejar, testar e simular enlaces ópticos. O *software* nos permite também a integração com o *optigrating*, facilitando a utilização de grades de Bragg e de período longo nas simulações. Com isso, podemos montar esquemas de interrogação de sensores e testar sua efetividade. Neste capítulo irão ser apresentadas as simulações feitas usando os *softwares* *Optigrating*, *Optisystem* e *Matlab* sobre esquemas de interrogação de Grades de Bragg utilizando filtros fixos.

### 6.1 INTRODUÇÃO

Foram testados quatro esquemas de interrogação de sensores e suas efetividades. Em cada um dos esquemas, montados no programa *Optisystem*, foi utilizado um dispositivo transmissor simples, uma cabeça sensora, LPGs e FBGs como filtros fixos e diferentes tipos de receptores. O programa *Optigrating* foi utilizado para simular todas as grades de Bragg presentes nos esquemas e o programa *Matlab* foi utilizado para criar os gráficos vistos neste capítulo. As LPGs usadas têm como características principais período da grade  $\Lambda = 236.10367 \mu m$ , comprimento  $L = 50000 \mu m$ , e as FBG tem como suas características  $\Lambda = 0.53072 \mu m$ ,  $L = 5000 \mu m$ .

### 6.2 ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO UMA LPG

No primeiro esquema de interrogação, mostrado na figura 24, uma FBG é interrogada por uma LPG, e o sinal resultante detectado por um *Power Meter* óptico.

A LPG tem seu comprimento de onda de ressonância fixado em 1550nm e a FBG com comprimento de onda de Bragg de 1548nm sofre interferência de uma variação de temperatura. O comprimento de onda de 1548nm foi escolhido por se situar no centro da região de linearidade do espectro do sensor LPG de 1550nm.

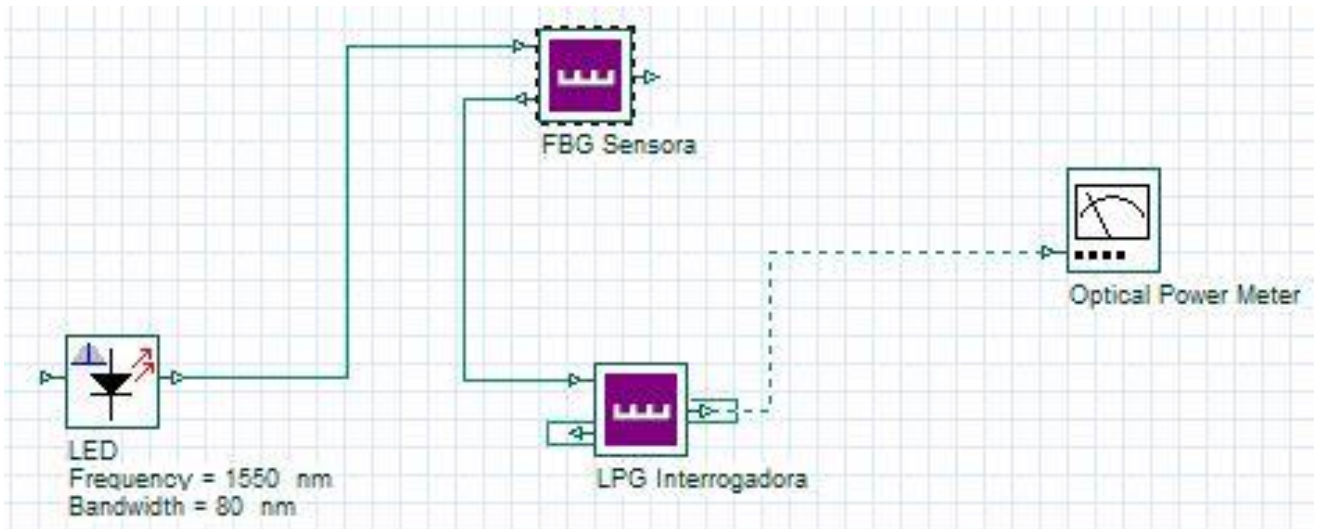


Figura 24 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando uma LPG como filtro fixo.

Variando a temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ , o esquema foi simulado e os dados do *Power meter* adquiridos. A figura 25 nos mostra a relação entre a variação da temperatura e a potência detectada para esta faixa de temperatura.

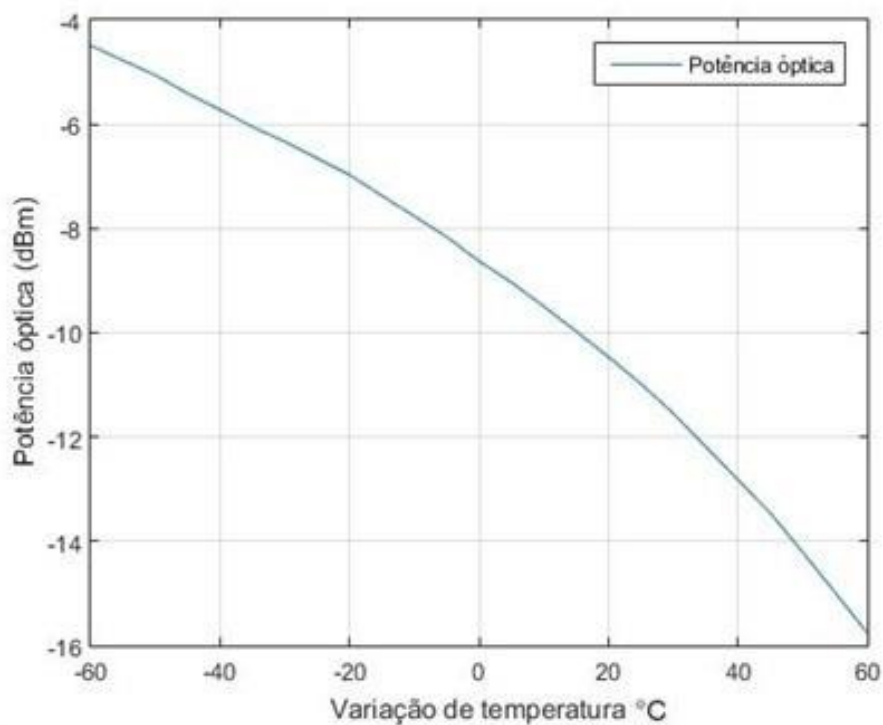


Figura 25 – Variação da potência do sinal com a temperatura.

Por ser desejável uma relação linear entre os dois parâmetros, visto que uma relação linear é mais fácil e menos custosa de se trabalhar em questão de carga de processamento, foi selecionada a faixa de variação de temperatura de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  para que uma relação linear seja aplicada, como visto nas figuras 26 e 27.

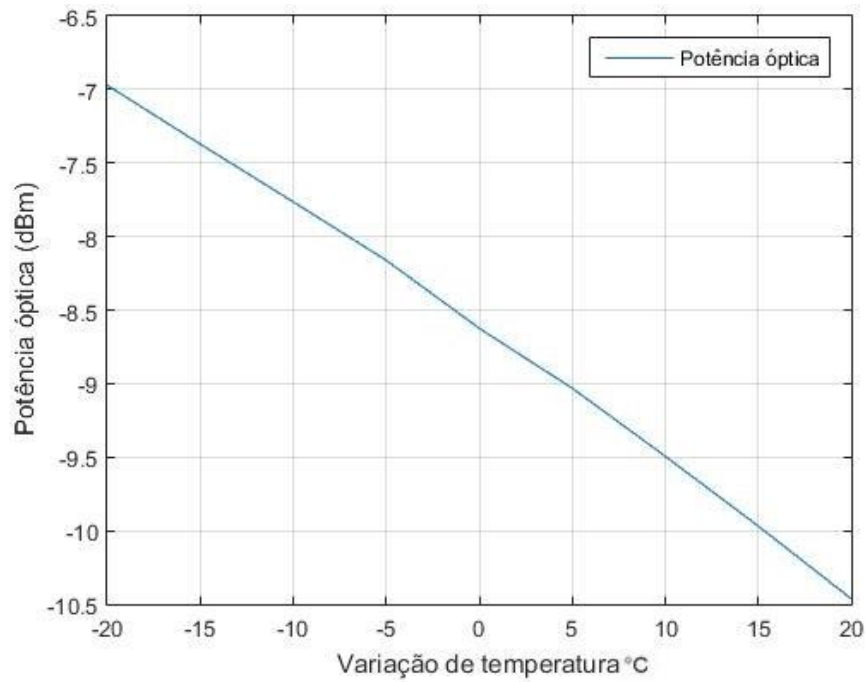


Figura 26 – Variação da potência elétrica do sinal com a temperatura em uma *range* otimizada.

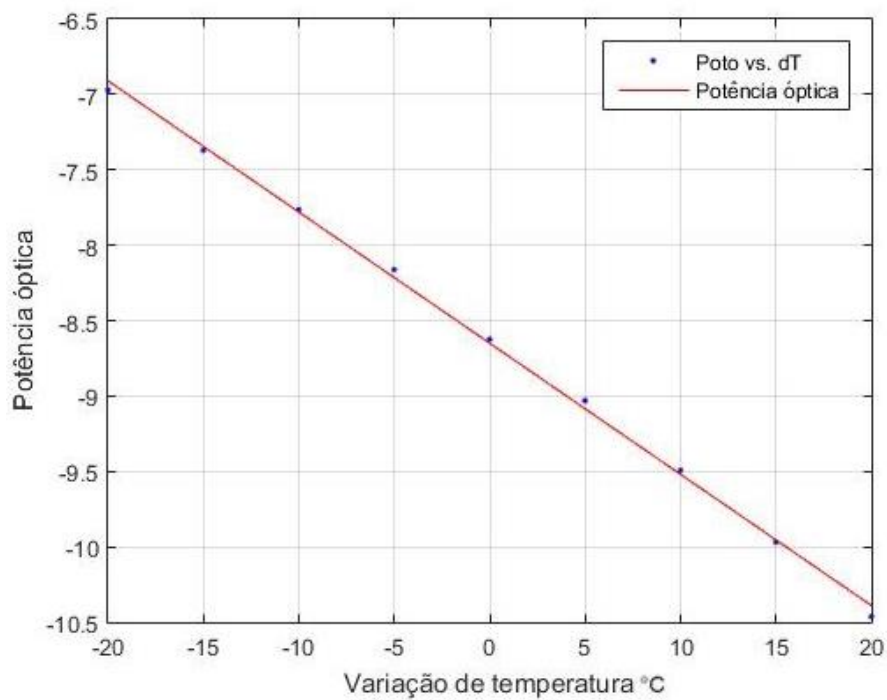


Figura 27 – *Fit* linear da potência óptica do sinal com a temperatura em uma *range* otimizada.

Podemos notar que para uma *range* de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  podemos fazer uma aproximação linear bem precisa, que nos dá uma queda de potência por variação de temperatura de aproximadamente  $0.0875\text{dBm}/^{\circ}\text{C}$  para um detector óptico. O problema de utilizar uma LPG como grade interrogadora é a sensibilidade alta ao ambiente externo, podendo fazer com que

o comprimento de onda central varie e interfira na estabilidade do processo de interrogação do sinal.

### 6.3 ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO OUTRA FBG

No segundo esquema de interrogação, mostrado na figura 28, uma FBG é interrogada por uma FBG, e o sinal resultante detectado por um *Power meter* óptico.

Uma das FBGs tem seu comprimento de onda de Bragg fixado em 1550nm e a outra FBG também com comprimento de onda de Bragg de 1550nm sofre interferência de uma variação de temperatura.

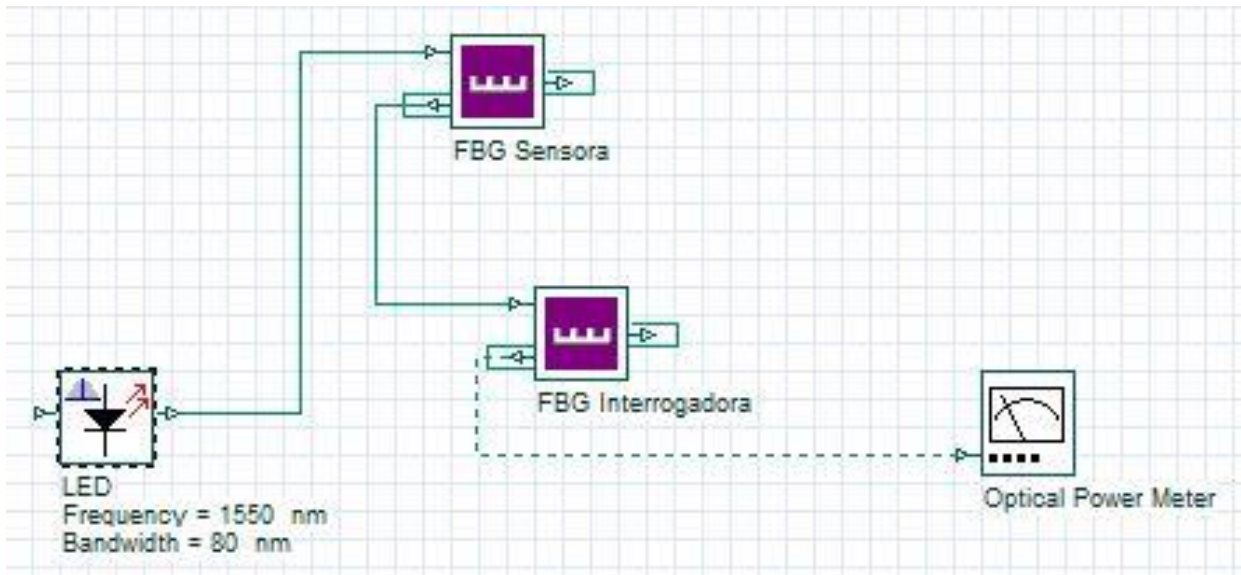


Figura 28 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando outra FBG como filtro fixo.

Variando a temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ , o esquema foi simulado e os dados do *Power meter* adquiridos. A figura 29 nos mostra a relação entre a variação da temperatura e a potência detectada para esta faixa de temperatura.

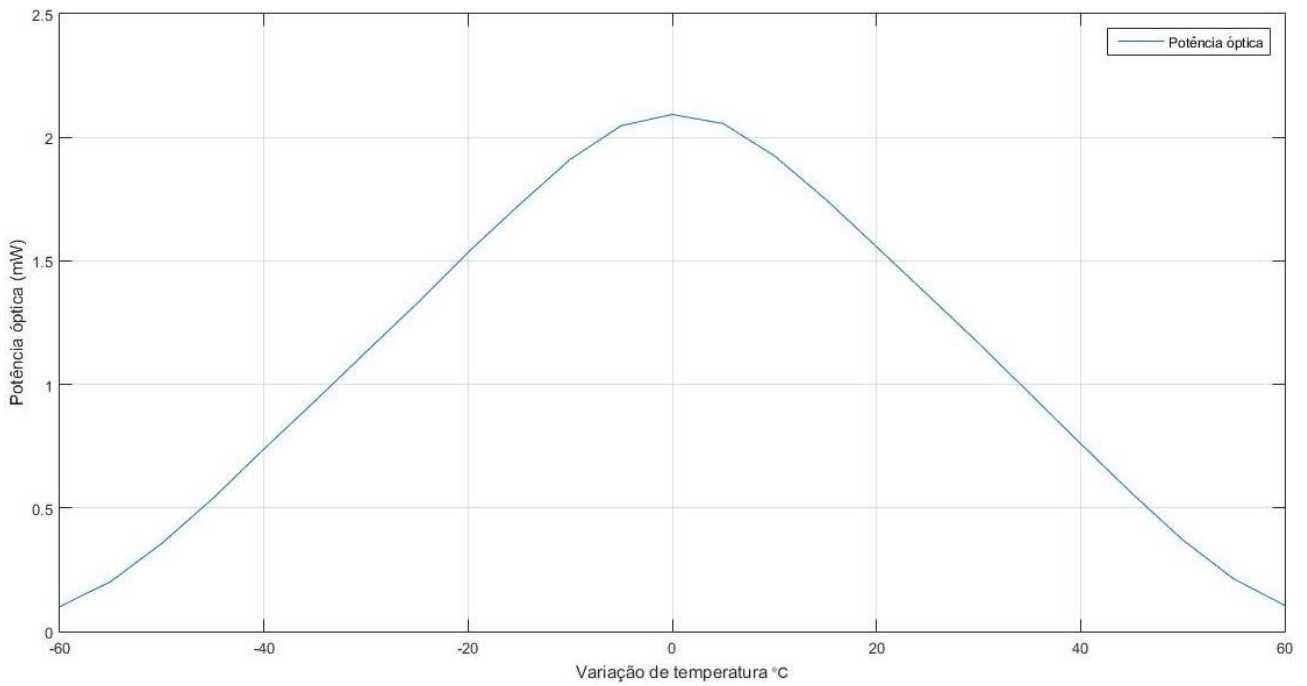


Figura 29 – Variação da potência óptica do sinal com a temperatura.

Novamente, desejamos uma relação linear entre os dois parâmetros. Foi selecionada a faixa de variação de temperatura de 10°C a 50°C para que uma relação linear seja aplicada, como visto na figuras 30.

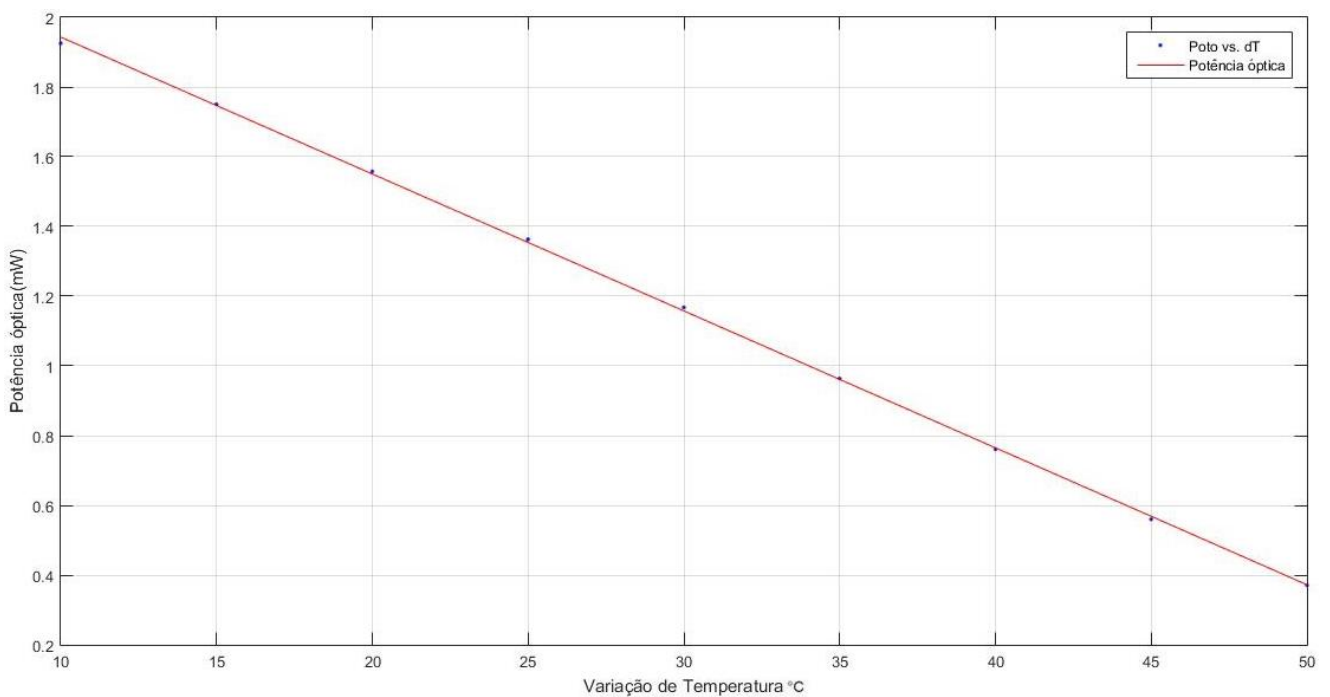


Figura 30 – Variação da potência óptica do sinal com a temperatura em uma range otimizada.



Para esse esquema, temos um range de 10 °C a 50 °C, com uma sensibilidade menor, tendo uma queda de potência por variação de temperatura de 0.04mW/°C para um detector óptico. Este esquema tem a vantagem da insensibilidade da grade FBG interrogadora ao índice de refração do meio externo, o que garante uma maior confiabilidade da medida em certos ambientes. Portanto, um leve deslocamento para o ponto de 10°C da FBG de interrogação leva à operação na região linear de 0°C a 40°C de variação. Logicamente um aumento da largura de banda da FBG de interrogação leva a aumento no *range* da medida porém com impacto na sensibilidade.

#### 6.4 ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA FBG UTILIZANDO DUAS FBGs

No terceiro esquema de interrogação, mostrado na figura 31, uma LPG é interrogada por duas FBGs, e o sinal resultante detectado por um *Power meter* óptico para cada FBG.

As FBGs fixas usadas como interrogadoras tem comprimento de onda de Bragg de 1550nm e de 1550.79nm e a FBG com comprimento de onda de ressonância de 1550.395nm sofre interferência de uma variação de temperatura. Os comprimentos de onda de 1550nm e 1550.79nm foram escolhidos de modo que as regiões lineares das grades demoduladoras tenham um ponto de interseção que divida as duas retas em metades iguais. Neste ponto de interseção foi posicionado o comprimento de onda de ressonância da grade que variará com a temperatura.

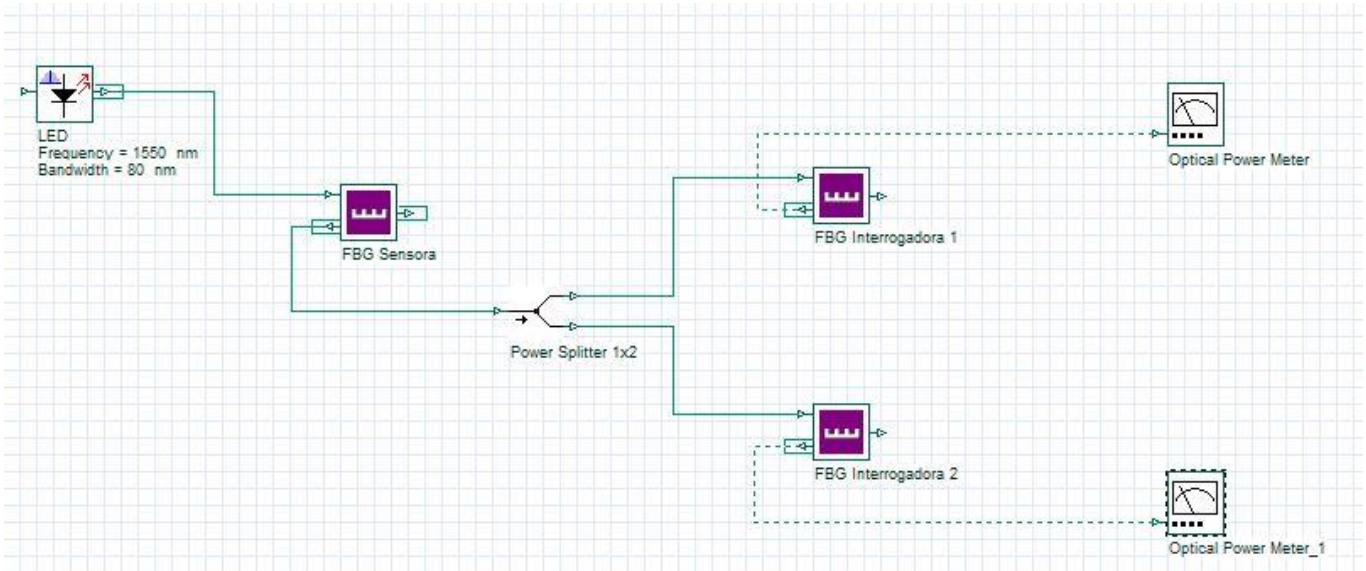


Figura 31 – Esquema de interrogação de uma FBG utilizando duas FBGs como filtros fixos.

Variando a temperatura de -25°C a 25°C, escolhido de acordo com a extensão da região linear das grades demoduladoras, o esquema foi simulado e os dados dos *Power meters* adquiridos. A figura 32 nos mostra a relação entre a variação da temperatura e a potência detectada para esta faixa de temperatura.

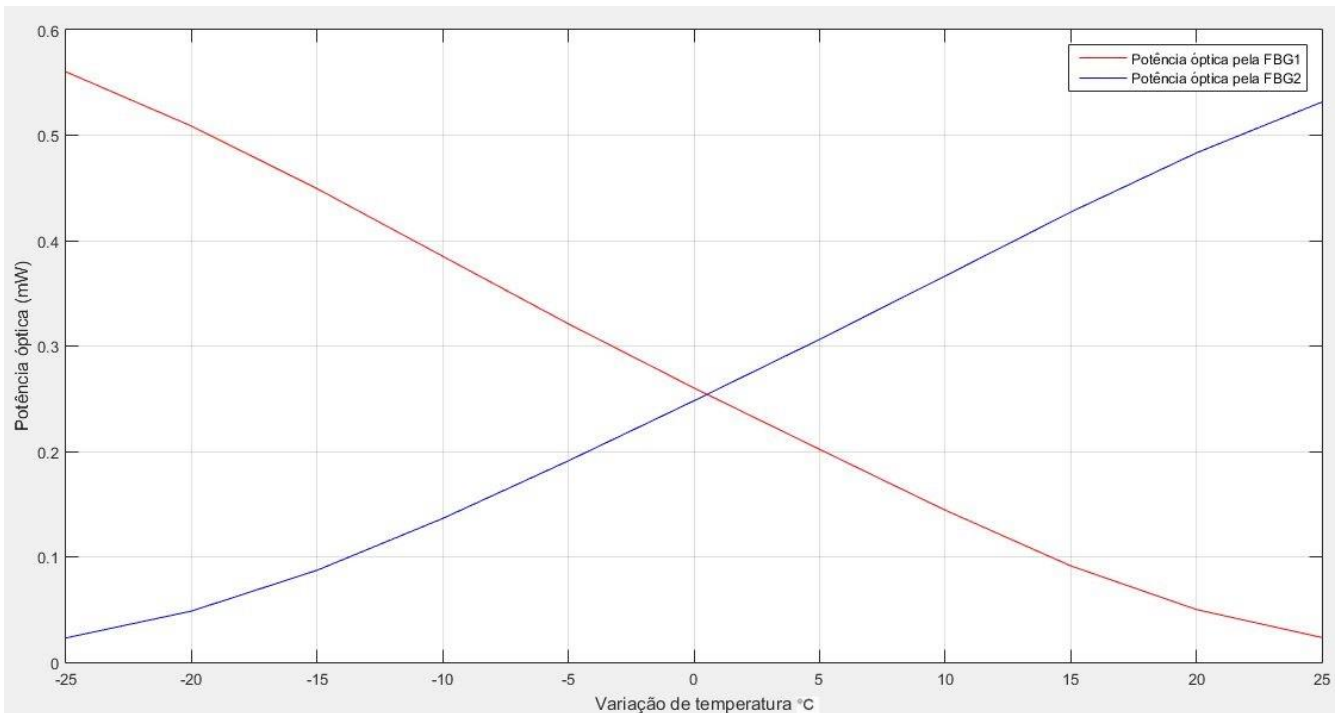


Figura 32 – Variação das potências ópticas das FBGs com a temperatura.

Desejamos uma relação linear entre os dois parâmetros. Porém, isso não seria possível apenas utilizando as informações fornecidas acima. Para isso, é utilizado o parâmetro R visto na seção 4.3.1.1 que relaciona as duas potências obtidas através da equação (4.2). Relacionando o parâmetro R com a variação de temperatura obtemos os gráficos da figura 33.

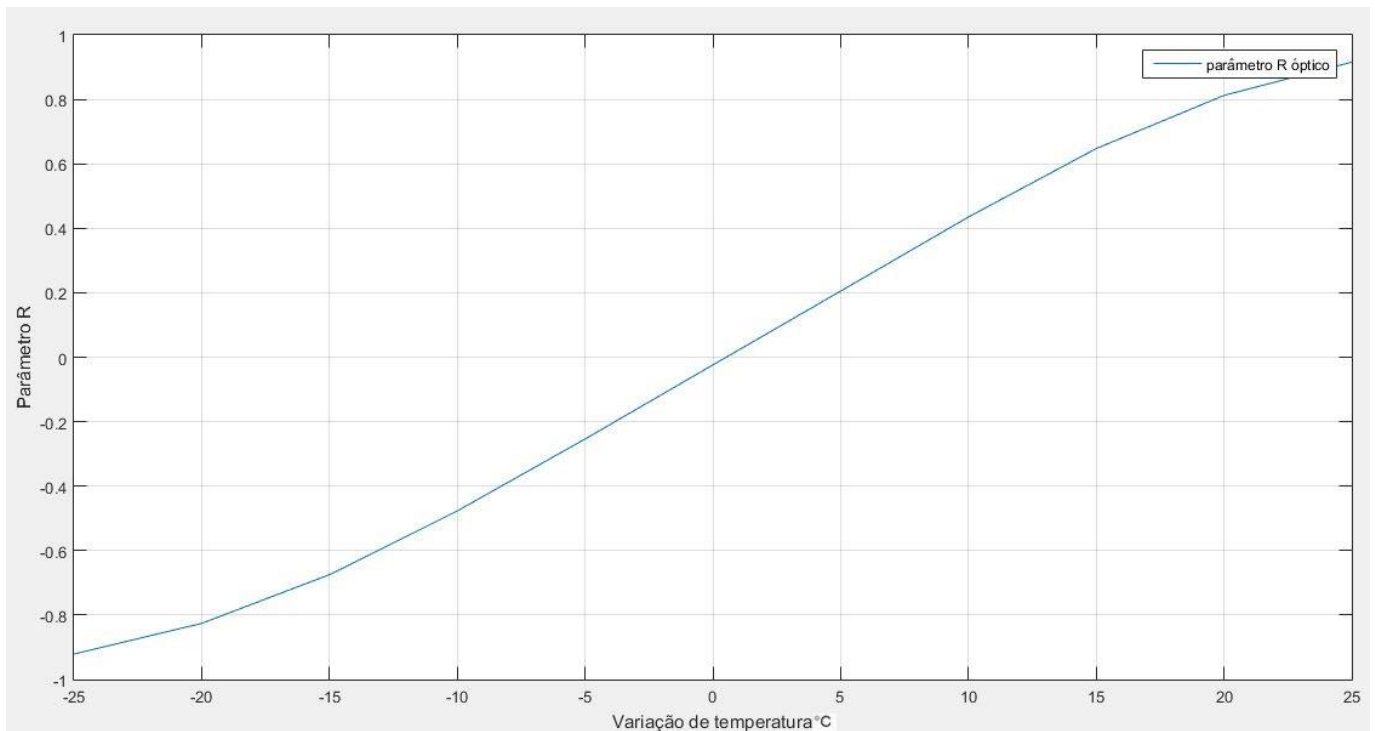


Figura 33 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura.

A figura 34 nos mostra a aproximação linear feita para essa curva.

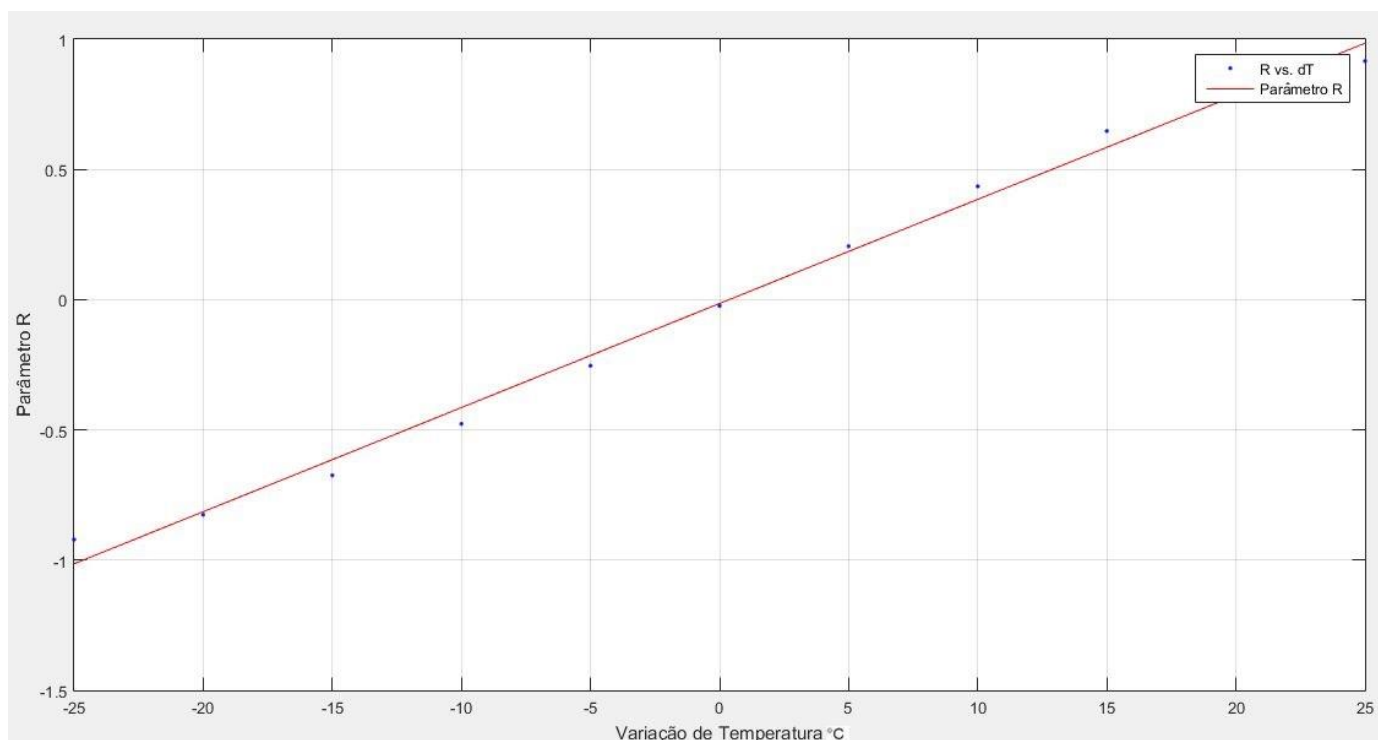


Figura 34 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura em um range otimizado.

Neste esquema, temos um *range* de  $-25\text{ °C}$  a  $25\text{ °C}$  para um esquema óptico, com uma variação no parâmetro R de  $0.04/\text{°C}$  para um detector óptico. Como era de se esperar ocorreu um aumento no range da medida. Este *setup* também nos permite utilizar um fotodetector para cada grade fixa a fim de realizar a interrogação elétrica. Além disso, por ser uma medida ratiométrica, esta elimina a interferência do ruído de intensidade da fonte.

## 6.5 ESQUEMA DE INTERROGAÇÃO DE UMA LPG UTILIZANDO DUAS FBG

No último esquema de interrogação, mostrado na figura 35, uma LPG é interrogada por duas FBGs, e o sinal resultante detectado por um *Power meter* óptico para cada FBG.

As FBGs tem comprimento de onda de Bragg de  $1548\text{nm}$  e de  $1552\text{nm}$  fixados e a LPG com comprimento de onda de ressonância de  $1550\text{nm}$  sofre interferência de uma variação de temperatura. Os comprimentos de onda de  $1548\text{nm}$  e  $1552\text{nm}$  foram escolhidos por se situarem nos centros das regiões de linearidade do espectro desta fibra sensora LPG de  $1550\text{nm}$ .

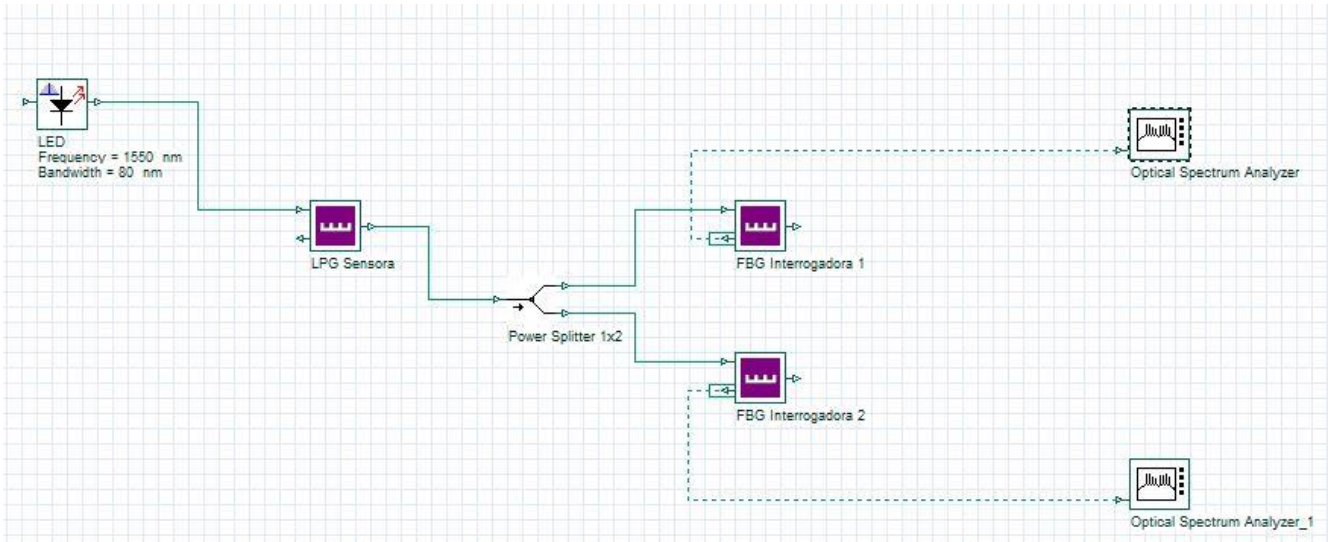


Figura 35 – Esquema de interrogação de uma LPG utilizando duas FBGs como filtros fixos.

Variando a temperatura de  $-60^{\circ}\text{C}$  a  $60^{\circ}\text{C}$ , o esquema foi simulado e os dados dos *Power meters* adquiridos. A figura 36 nos mostra a relação entre a variação da temperatura e a potência detectada para esta faixa de temperatura.

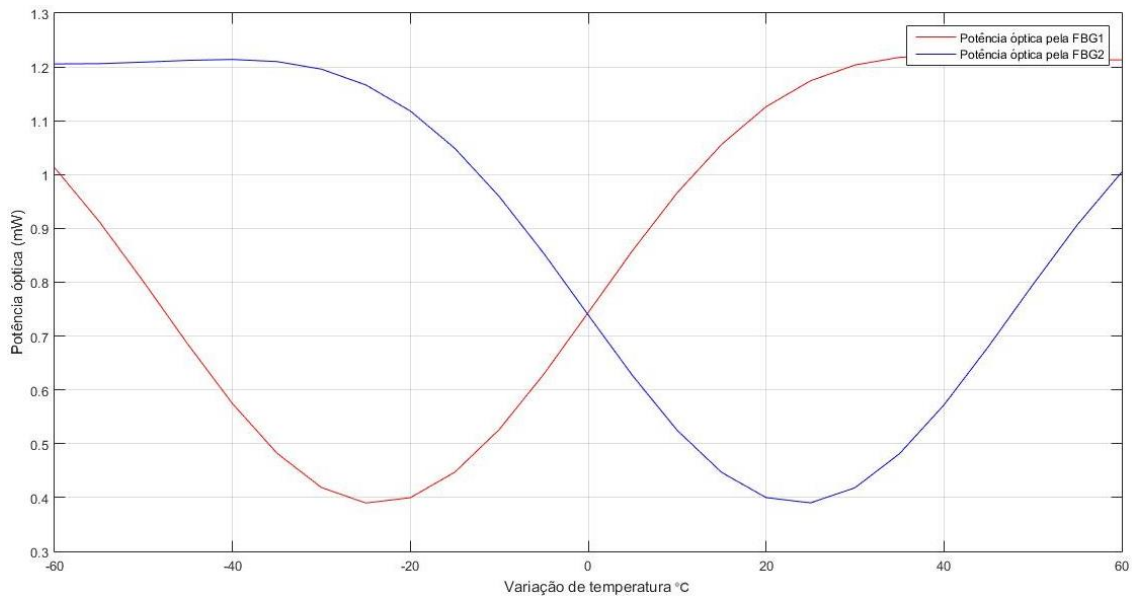


Figura 36 – Variação das potências ópticas das FBGs com a temperatura.

Novamente, desejamos uma relação linear entre os dois parâmetros. Para isso, é utilizado o parâmetro  $R$  visto na seção 4.3.1.1 que relaciona as duas potências obtidas através da equação (4.2). Relacionando o parâmetro  $R$  com a variação de temperatura e limitando o gráfico para a range de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  obtemos os gráficos da figura 37.

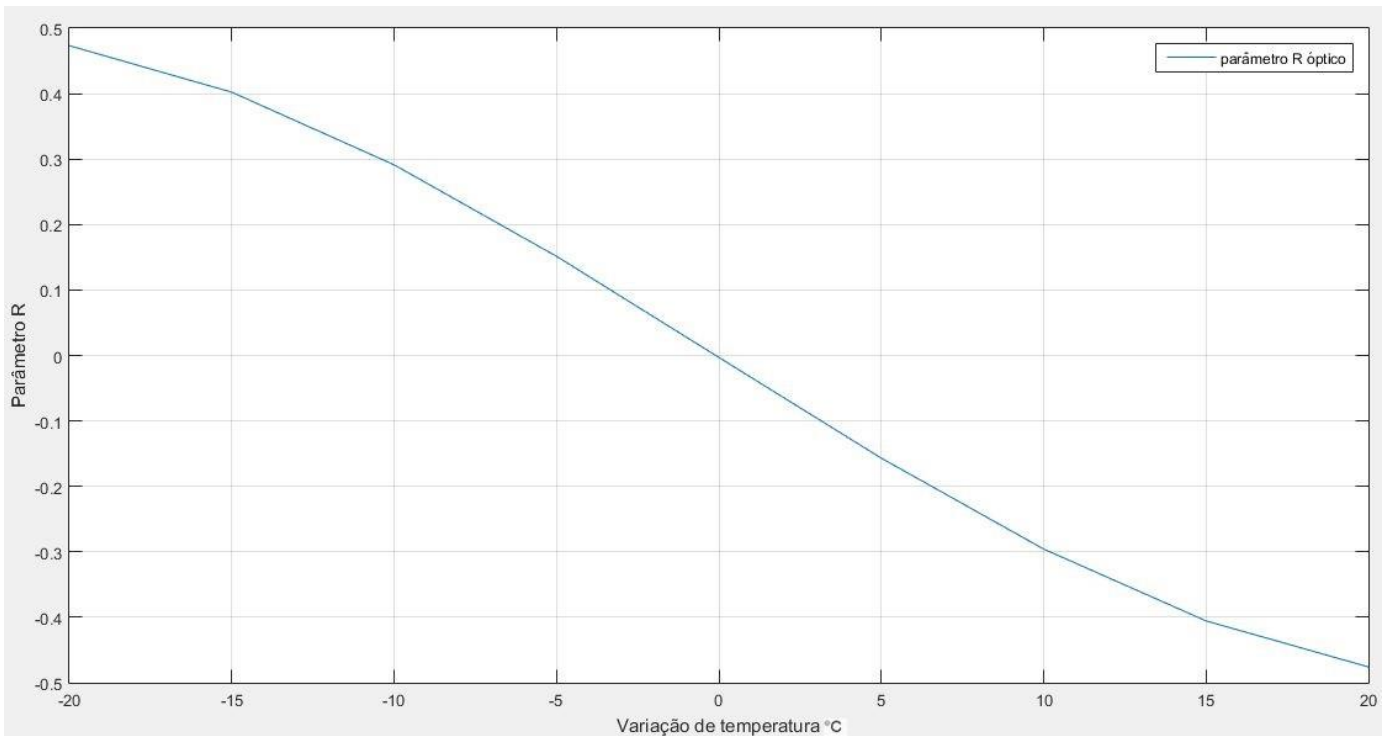


Figura 37 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura.

Mas ainda é necessário descobrir um modelo linear para essa relação. Para isso, é selecionado a faixa de  $-20^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$  para o esquema de medição óptica. A figura 38 nos mostra a aproximação linear feita para essa curva.

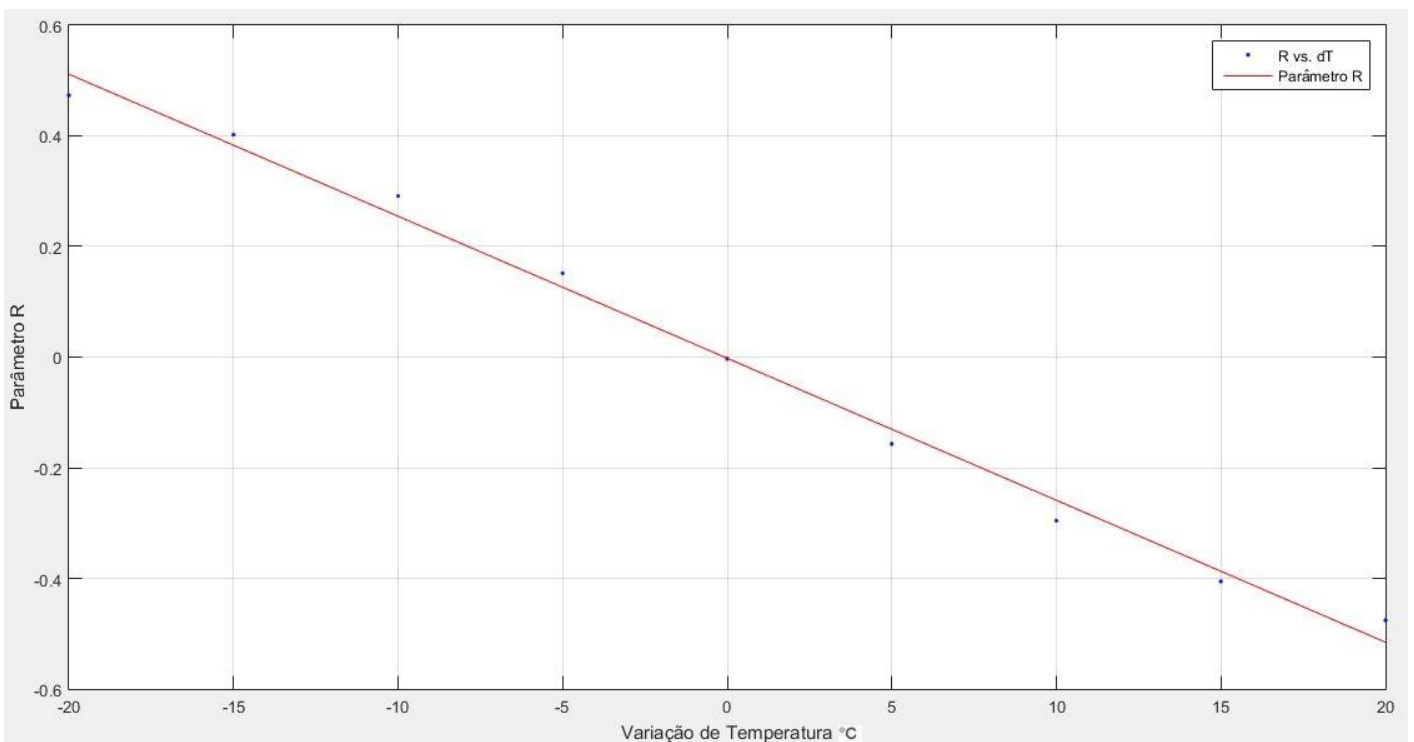


Figura 38 – Variação do parâmetro R óptico com a temperatura em um *range* otimizado.

Neste esquema, temos um *range* de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , e com uma variação no parâmetro R de 0.03 para um detector óptico para cada grau Celsius de variação de temperatura. Este esquema permite a utilização de um PZT alimentado por uma fonte de sinal elétrico para realizar a modulação elétrica do sinal, permitindo utilizar um analisador de espectro elétrico. Logo este tipo de interrogação além de ser menos custoso, permite eliminar o ruído de intensidade da fonte.

## 7 Conclusão

O trabalho teve como objetivo o estudo das características de grades de difração de período uniforme e dos métodos de interrogação de um sensor baseado nessas grades.

Para isso, foi feita uma revisão dos conceitos de sensores em fibras ópticas, seu funcionamento e classificações. Vimos suas vantagens, suas desvantagens e os tipos de sensores disponíveis, destacando os sensores baseados em grades de difração, foco deste estudo.

Foi feita uma revisão também dos conceitos de Grades de Bragg de período uniforme, como a condição de casamento de fase, sua refletividade, e sua sensibilidade à temperatura. Vimos também um pouco dos conceitos de grades de período longo, as diferenças entre elas e as FBGs e suas sensibilidades aos parâmetros externos.

Entrando no conceito de interrogação, uma revisão sobre o assunto foi realizada, apresentando os métodos comuns de interrogação de um sensor baseado em grades de difração e métodos alternativos que otimizam e barateiam a utilização de um sistema sensor óptico

Em seguida, foram apresentadas várias simulações para estudar o comportamento de uma grade Bragg de período uniforme, procurando informações que possa ajudar a otimizar uma grade para fins de utilização em sensores ópticos.

Resumindo os resultados das simulações usando o *software Optigrating*:

- A variação do comprimento de onda de Bragg com o período da grade apresentou uma variação quase constante, com um valor próximo de 3,3pm de variação do comprimento de onda de Bragg para cada picômetro variado no período da grade.
- A diferença entre os índices de refração apresentou uma modificação no comprimento de onda de bragg de aproximadamente 0.72nm para cada variação de 0.001 no índice de refração do núcleo da fibra.
- A variação na intensidade de modulação do perfil da grade, não afetou o comprimento de onda de Bragg, mas sim a largura de banda, como previsto pela teoria, aproximadamente 0,09nm para cada 0.0001 variado na intensidade de modulação.

- O comprimento de onda de Bragg variou de modo quase constante com a temperatura, por um fator de aproximadamente  $11,3\text{pm}/^\circ\text{C}$ .

Por fim, foram apresentadas quatro simulações de esquemas de interrogação de grades de difração, utilizando em conjunto os *softwares Optisystem, Optigrating e Matlab*.

Pode-se notar no primeiro esquema que para uma *range* de  $-20^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$  podemos fazer uma aproximação linear bem precisa, que nos dá uma queda de potência por variação de temperatura de aproximadamente  $0.0875\text{dBm}/^\circ\text{C}$  para um detector óptico. Para o segundo esquema, temos um *range* de  $10^\circ\text{C}$  a  $50^\circ\text{C}$ , e com queda de potência por variação de temperatura de  $0.04\text{mW}/^\circ\text{C}$ .

No terceiro esquema temos um *range* de  $-25^\circ\text{C}$  a  $25^\circ\text{C}$ , e com queda de potência por variação de temperatura de  $0.04/^\circ\text{C}$ . Já no último esquema, temos um *range* de  $-20^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ , e com queda de potência por variação de temperatura de  $0.03/^\circ\text{C}$ .

Portanto, temos quatro modelos com vantagens e desvantagens. Os modelos que utilizam o parâmetro R apresentam resultados independentes das flutuações de amplitude que possam ocorrer no sistema, apresentando imunidade ao ruído de intensidade da fonte. Já os modelos que utilizam LPG apresentam uma sensibilidade ao índice de refração do meio externo, podendo fazer com que o comprimento de onda central varie e interfira no processo de interrogação do sinal.

Conclui-se então que o modelo de interrogação a ser utilizado depende dos requisitos da aplicação. Os valores de *range* e sensibilidade podem ser otimizados variando parâmetros das fibras e dos sensores e aumentando a complexidade do esquema de interrogação.

Como trabalhos futuros, podem ser feitos mais simulações para comparação entre outros esquemas de interrogação, como também a utilização de uma rede de sensores nas simulações, testando a eficiência dos esquemas de interrogação em um sistema sensor com maior complexidade. Pode ser feita também uma análise detalhada do compromisso entre sensibilidade e *range* para esses esquemas de interrogação, variando parâmetros das grades, como largura de banda e sensibilidade à temperatura.

Além disso, devido à alta perda de potência em LPGs e certas FBGs, será estudado o uso de esquemas de amplificação Raman em uma futura pesquisa de mestrado.

## REFERÊNCIAS

- [1] ALLIL, R.C.S.B., *Sensores a Fibra Óptica com Tecnologia FBG para Medida de Temperatura e Alta Tensão*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.
- [2] BARROS, R.E.B.A. *Sistemas de Interrogação de Redes de Bragg: Primeiros Passos na Criação de um Protótipo*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.
- [3] BORGES, B.H.V., ROMERO, M.A., CÉSAR, A.C. *Sensores Ópticos Integrados e em Fibra*. Escola de Engenharia de São Carlos, Capítulo 7.
- [4] CARVALHO, J.P., COELHO, L., BAPTISTA, J.M., SANTOS, J.L., FRAZÃO, O., *Dynamic interrogation for optical fiber sensors based on long-period gratings*. Maio 2011.
- [5] CHEN, J., LIU, B., ZHANG, H., *Review of Fiber Bragg Grating Sensor Technology*. *Frontier Optoelectronics*, Junho 2011.
- [6] COELHO, T.V.N., *Modelagem e Caracterização de Sensores em Fibra com Amplificação Óptica*. Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.
- [7] COMANICI, M.I., *Interrogation System for Fiber Bragg Grating-Based Sensors*. McGill University, 2010.
- [8] CUNHA, J.R.F.A., *Modelo Teórico de Sensores Ópticos Baseados em Fibras com Grade de Bragg*. Universidade federal do Pará, 2007.
- [9] DIAZ-HERREIRA, N., VIEGAS, D., JORGE, P.A.S., ARAUJO, F.M., SANTOS, J.L., NAVARRETE, M.C., GONZALES-CANO, A., *Fiber-Optic SPR Sensor with a FBG Interrogation Scheme for Readout Enhancement Sensors Actuators*. Outubro 2009
- [10] GOMES, G.C., *Sensores Ópticos Com Base em Grades de Bragg em Fibra Para Monitoramento de Temperatura e de Índice de Refração*. Instituto Militar de Engenharia, 2011.
- [11] HARAMONI, N., *Sistema para Interrogação de Redes de Bragg Utilizando Laser EDF Sintonizado Mecanicamente*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.
- [12] JÚNIOR, L.C.C., *Caracterização de um Sensor Baseado em Fibra Óptica Para Medição de Temperatura*. Universidade Federal de Juiz de Fora, 2016.
- [13] RAJAN, G., *Optical Fibers Sensors- Advanced Techniques and Applications*. CRC Press, 2014.
- [14] TRAN, T. V. A., *Performance Enhancement of Long-Distance Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Based on a Fiber Raman Laser with an Etched FBG*. *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 17, n. 9, p. 1920-1922, Setembro 2005.



- [15] VALENTE, L.C.G., SILVA, L.C.N., RIBEIRO, A.S., TRIQUES, A., REGAZZI, R.D., BRAGA, A.M.B., *Técnica de Leitura para Sensores a Fibra Óptica Baseados em Redes de Bragg*. PUC-Rio, Agosto 2002.
- [16] YARIV, A., *Coupled-mode theory for guided-wave optics*. IEEE *Journal of Quantum Electronics*, vol. 9, 9, 1973.