

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

DISSERTAÇÃO

Apresentada à UTFPR
para obtenção do grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

por

RODRIGO RICETTI

**SISTEMA DE LEITURA PARA SENSORES A FBG
CODIFICADO EM INTENSIDADE**

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ LUÍS FABRIS

UTFPR

Examinadores:

Prof. Dr. CYRO KETZER SAUL

UFPR

Prof^ª. Dr. MÁRCIA MÜLLER

UTFPR

Curitiba, 30 de maio de 2006

RODRIGO RICETTI

**SISTEMA DE LEITURA PARA SENSORES A FBG
CODIFICADO EM INTENSIDADE**

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

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Co-orientadora: Prof^ª. Dr. Márcia Müller

Curitiba

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

R495s Ricetti, Rodrigo
Sistema de leitura para sensores a FBG codificado em intensidade / Rodrigo Ricetti. Curitiba. UTFPR, 2006
XIII, 156 p. : il.; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2006
Bibliografia: p. 89-94

1. Circuitos integrados de microondas. 2. Sensores. 3. Ondas – Propagação.
I. Fabris, José Luís, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD: 621.38132

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Renato e Eliza e ao meu irmão Renato, por todo o apoio e incentivo que me deram em minha jornada acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador de mestrado, Prof. Dr. José Luís Fabris pela ajuda e incentivo para a realização deste trabalho.

À minha Co-orientadora, Prof^a. Dr. Márcia Müller pela colaboração e atenção dispensada para a realização do trabalho.

Ao Prof. Dr. Mauro Gomes Rodbard, meu ex-professor e amigo, que foi a primeira pessoa a me incentivar a fazer o mestrado.

Ao Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin pela sua cordialidade e por sua humildade como docente, a qual servirá de modelo para minha futura conduta como profissional.

Aos meus amigos Ricardo e Caputo, por todo o apoio que me deram durante a realização deste trabalho, principalmente prestando auxílio nos aspectos relacionados a utilização de meios computacionais.

Aos meus amigos do laboratório de Laser, Rafael, João, Eduardo, Willian, João Carlos, Francelli e Prof^a. Rita pela amizade e oportunidade de compartilhar bons momentos. E especialmente ao Gustavo, pelo auxílio prestado quando de minhas dúvidas em relação a cálculos matemáticos e pela sua grande amizade.

A Marianna, por estar sempre disposta a auxiliar na realização das medidas experimentais e pela sua amizade.

A Rosane, por toda a paciência que teve ao sanar minhas dúvidas e me auxiliar nos momentos críticos, e pela sua amizade.

Ao Fabiano pela gravação das redes utilizadas para a realização deste trabalho.

Ao meu grande amigo Ionildo, pela sua valiosa ajuda em um momento crítico.

Ao funcionário Antônio França, pela amizade e presteza no atendimento na biblioteca da pós-graduação.

À UTFPR, pelas instalações oferecidas para a realização deste trabalho, e a todos os seus funcionários, sem os quais os trabalhos realizados nesta grande instituição não seriam possíveis.

À CAPES, pela concessão de Bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS.....	x
RESUMO	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Redes de Bragg em Fibra	5
2.2 Técnicas para Aumento de Fotossensibilidade	7
2.2.1 Hidrogenação.....	7
2.2.2 Varredura a Chama.....	8
2.2.3 Co-dopagem por Boro.....	8
2.3 Técnicas de Gravação de Redes de Bragg	9
2.4 Tipos de Redes de Bragg.....	10
2.4.1 Refletor Bragg Comum	11
2.4.2 Redes de Bragg Inclınadas	11
2.4.3 Redes de Bragg com Gorjeio (<i>chirped</i>)	12
2.4.4 Outros Tipos de Redes de Bragg.....	13
2.4.5 Redes de Bragg em Fibras Birrefringentes	14
2.5 Aplicações Diversas de Redes de Bragg em Fibra para Sensoriamento.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 LED	24
3.2 <i>Fiber U-Bench</i>	24
3.3 Lente Grın.....	25
3.4 Polarizador Separador de Feixe	26
3.5 Fibras pticas.....	28

3.5.1 Birrefringência em Fibras.....	29
3.6 Circuladores Ópticos	30
3.7 Acopladores Ópticos	31
3.8 Controladores de Polarização.....	32
3.9 Técnicas para Gravação de Redes de Bragg	33
3.9.1 Técnica Interferométrica	34
3.9.2 Técnica da Máscara de Fase.....	35
3.9.3 Fabricação Ponto-a-Ponto	36
3.10 Espectros de Reflexão de Redes de Bragg.....	36
4 METODOLOGIA	39
4.1 Montagem para Acoplamento de Luz e Medição de Potência	40
4.2 Montagem para Análise do Espectro da Rede Hi-Bi	45
4.3 Montagem para Análise do Espectro da Rede Sensora Sobreposto ao da Rede Hi-Bi.....	46
4.4 Montagem do Conjunto Experimental Completo	47
4.5 Sistema para Medidas com Fotodetector	50
4.6 Simulações Computacionais	53
4.6.1 Estudo da Influência da Largura de Banda nas Simulações	55
5 RESULTADOS	59
5.1 Medidas de Potência nas Lentes do Suporte em U para Fibra.....	59
5.2 Espectros da Rede Hi-Bi	61
5.3 Montagem da Configuração Experimental Completa.....	63
5.4 Dados Experimentais – Áreas Abaixo dos Picos	65
5.5 Coleta de Dados para Simulação.....	68
5.5.1 Simulação Computacional.....	70
5.5.2 Variações na Largura de Banda	74
5.6 Medidas com Fotodetectores.....	75
6 DISCUSSÕES	79
6.1 Dados Experimentais.....	79

6.2 Simulações Computacionais	82
7 CONCLUSÕES	85
7.1 Conclusões.....	85
7.2 Trabalhos Futuros.....	86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
Anexo A	95
Anexo B.....	97
Anexo C.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Fiber U-Bench</i> com lentes Grin acopladas.....	25
Figura 2 - Polarizador separador de feixe	27
Figura 3 - Diagrama esquemático de um circulador óptico	31
Figura 4 - Esquema de um acoplador direcional bicônico fundido.....	31
Figura 5 - Sentido de propagação da luz em acopladores 2 x 2	32
Figura 6 - Controlador de polarização.....	33
Figura 7 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg	37
Figura 8 - Montagem do conjunto experimental inicial para alinhamento da lente grin lateral	41
Figura 9 - Esquema de entrada da luz do laser no Suporte em U para fibra e divisão pelo PBS.....	43
Figura 10 - Montagem final utilizada para permitir o melhor alinhamento e acoplamento de luz na lente sobre a qual é projetado o feixe refletido pelo polarizador separador de feixe	44
Figura 11 - Circuito óptico para verificar a separação dos picos da rede Hi-Bi	45
Figura 12 - Circuito óptico para realizar os ensaios de sobreposição dos picos	46
Figura 13 - Mecanismo utilizado para tensionar a rede sensora	46
Figura 14 - Montagem experimental completa para mostrar o princípio de operação do sensor proposto.....	48
Figura 15 - Ilustração do deslocamento da rede sensora.....	49
Figura 16 - Arranjo experimental utilizado para realizar medidas com o uso de fotodetectores.....	50
Figura 17 - Fixação do polarizador separador de feixe no modulador mecânico	51
Figura 18 - Espectro correspondente à luz transmitida pelo polarizador separador de feixe...	60
Figura 19 - Espectro correspondente à luz refletida pelo polarizador separador de feixe	61
Figura 20 - Espectro correspondente ao feixe de luz transmitido, com a melhor razão de extinção.....	62
Figura 21 - Espectro correspondente ao feixe de luz refletido, com a mesma razão de extinção utilizada para o feixe de luz transmitido.....	62

Figura 22 - Valor máximo medido na convolução entre o sinal da rede sensora e o lóbulo esquerdo da rede Hi-Bi	64
Figura 23 - Valor máximo de potência medido na convolução entre o sinal da rede sensora e o lóbulo direito da rede Hi-Bi.....	65
Figura 24 - Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – ajuste lorentziano	67
Figura 25 - Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – ajuste gaussiano	67
Figura 26 - Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido obtida com integração direta pela ORIGIN.....	68
Figura 27 - Ajustes com modelos: (a) gaussiano, (b) lorentziano.....	69
Figura 28 - Resposta da rede sensora em função da posição angular do parafuso: (a) ajuste gaussiano, (b) ajuste lorentziano	69
Figura 29 - Posição da rede sensora após 5 ¾ voltas (a) ajuste lorentziano, (b) ajuste gaussiano	70
Figura 30 - (a) Produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à transmissão da rede Hi-Bi, (b) produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à reflexão da rede Hi-Bi (ajuste lorentziano)	71
Figura 31 - (a) Produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à transmissão da rede Hi-Bi, (b) produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à reflexão da rede Hi-Bi (ajuste gaussiano)	71
Figura 32 - Razão simulada entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – (a) ajuste lorentziano, (b) ajuste gaussiano	72
Figura 33 - Razão simulada entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido, com ajuste pelo produto gaussiana x gaussiana	73
Figura 34 - Razão simulada utilizando modelos gaussianos com adição de offset (a) modelo gaussiano, (b) modelo gaussiana x gaussiana.....	73
Figura 35 - Razão simulada, exibindo retas ajustadas nas regiões da alta e baixa sensibilidade	74
Figura 36 - Variação de sensibilidade em função da largura de banda nas regiões de baixa e alta sensibilidade.....	75
Figura 37 - Espectro da primeira rede sensora (lóbulo de menor comprimento de onda) ensaiada com o sistema de fotodetecção mostrado junto ao espectro da rede Hi-Bi	76

Figura 38 - Razão experimental entre as tensões relativas aos feixes transmitido e refletido medidas com fotodetectores.....	76
Figura 39 - Espectro da segunda rede sensora (lóbulo de menor comprimento de onda) ensaiada com o sistema de fotodetecção mostrado junto ao espectro da rede Hi-Bi.....	77
Figura 40 - Gráfico de uma medida onde alguns dos sinais medidos se aproximam de zero..	77
Figura 41 - Gráfico de medida com fotodetectores, utilizando-se adição de <i>offset</i>	78
Figura 42 - Variação de intensidades dos feixes transmitido e refletido em função da posição do parafuso	78

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

ASE	Amplified Spontaneous Emission
DWDM.....	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium-Dopped Fiber Amplifier
FBG	Fiber Bragg Grating
Hi-Bi.....	High-Birrefringence
Grin.....	Gradient index
HAZ.....	Heat Affected Zone
LED	Light Emitting Diode
MCVD.....	Modified Chemical Vapor Deposition
OSA.....	Optical Spectrum Analyzer
PBS.....	Polarizing Beamsplitter
WDM.....	Wavelength Division Multiplexing

RESUMO

Este trabalho descreve a montagem de um circuito óptico que pode ser utilizado como sistema de leitura para sensores a FBG. A principal vantagem do sistema proposto é o baixo custo para a montagem do conjunto experimental, o qual permite a demodulação codificada em intensidade, sendo, portanto uma alternativa atraente para sensoriamento óptico em relação aos usuais sistemas de leitura codificados em comprimento de onda, os quais necessitam da utilização de equipamentos e componentes caros. A montagem mostra ser possível a utilização de fotodetectores para a monitoração em tempo real de variações de tensão mecânica sobre uma rede sensora. Devido ao fato de que o conjunto experimental pode fazer leitura simultânea de dois feixes de luz distintos, possíveis flutuações da fonte luminosa utilizada não interferirão nas medidas. Os resultados foram obtidos com a rede sensora sendo tensionada com um mecanismo que mostra que uma possível aplicação imediata seria a medição de deslocamentos angulares em torno de um eixo acoplado ao mecanismo tensor. Contudo, a maneira como a rede foi tensionada mostra que os resultados podem ser obtidos para quaisquer sistemas de medida que se valham das propriedades foto-elásticas e termo-ópticas das FBG. A validade da montagem proposta como sistema de leitura é comprovada através da comparação entre leituras obtidas com fotodeteção e analisador de espectros ópticos, sendo confirmada através de simulações computacionais nas quais as FBG são modeladas por curvas gaussianas e lorentzianas. Um resultado importante obtido através das simulações é o fato de a resolução do sistema de leitura ser determinada em função da largura de banda da rede sensora utilizada.

ABSTRACT

This work shows the development of an optical system that can be used in the interrogation of Fiber Bragg Grating (FBG)-based sensors. The demodulation system is intensity coded instead of the traditional wavelength coded demodulation systems. The main advantage of the proposed system is its low cost, when compared with the cost of wavelength coded interrogation systems. Splitting the reading beam in two components and taking the ratio between them compensate eventual changes in the source intensity. The splitting is accomplished with the combined use of a High-Birefringence Fiber Bragg Grating (Hi-Bi FBG) and a polarizing cube beamsplitter. The equipment is used to analyze the behavior of a FBG under the effect of an external applied stress, and the results are compared to the grating behavior determined with the aid of an Optical Spectrum Analyzer. Numerical analysis shows that the system resolution is related to the bandwidth of the sensing grating. The experimental results showed that the demodulation system proposed presents a good performance for measuring angle positions and can be applied in other detection systems that use a FBG sensor.

CAPÍTULO 1

Introdução

Com o advento das fibras ópticas as comunicações foram revolucionadas pelas técnicas de transmissão de dados, velocidade e quantidade de informação que se pode propagar através destes componentes ópticos, sendo seu uso preferível aos sistemas eletrônicos. Em comparação aos tradicionais meios de comunicação que dependem de circuitos eletrônicos, a transmissão por fibra possui ainda a vantagem de não ocasionar perdas significativas de energia no sistema, por efeito Joule, por exemplo.

Durante um experimento para estudar efeitos não lineares em fibras ópticas, evidenciou-se a fotossensibilidade das mesmas. Devido ao fato de as fibras serem sensíveis à radiação altamente energética incidindo sobre seu núcleo, pode-se gravar nelas estruturas que proporcionam reflexão de comprimentos de onda específicos se propagando no núcleo. Desta maneira, desenvolveu-se a tecnologia de gravação de Redes de Bragg em fibras ópticas ou FBG (*Fiber Bragg Grating*). Nas últimas décadas, extensas pesquisas vêm sendo desenvolvidas para ampliar o potencial das FBG como elementos integrantes de sistemas de telecomunicações.

Paralelamente ao uso em telecomunicações, as FBG têm sido amplamente utilizadas no desenvolvimento de sensores à fibra óptica. Isto se deve ao fato de as redes de Bragg em fibra serem bastante sensíveis a variações de temperatura e tensão longitudinal. Desta forma, pode-se, por exemplo, construir termômetros para altas temperaturas ou dispositivos sensores para monitoração de esforços mecânicos, o que confere a esta classe de sensores ampla aplicação em diversos setores industriais e na pesquisa em engenharias. Em contraste à alta sensibilidade exibida pelas redes de Bragg em fibra óptica à variação de parâmetros externos, as mesmas exibem também particularidades interessantes para uso em sensoriamento, tal como imunidade a campos eletromagnéticos externos, resistência a altas temperaturas e a

agentes químicos. Para muitos propósitos, porém, o que torna uma rede de Bragg em fibra interessante como parte de um dispositivo sensor é a sua dimensão reduzida.

O objetivo principal deste trabalho é demonstrar que o sensoriamento óptico pode ser codificado em intensidade, técnica que busca eliminar o Analisador de Espectros ópticos, ou OSA (*Optical Spectrum Analyzer*) da configuração experimental para sensoriamento. A remoção do OSA é desejável devido a seu alto custo, o que eventualmente torna o sensoriamento por fibras ópticas inviável em circunstâncias reais de operação. Desta forma, se codificado em intensidade, um sensor a rede de Bragg em fibra dependerá deste equipamento apenas para calibração e caracterização.

A idéia do dispositivo proposto neste trabalho é que a rede sensora seja deslocada em função de parâmetros externos, por exemplo, temperatura ou tensão mecânica e a esse deslocamento seja associado um deslocamento correspondente do espectro de reflexão da rede sensora. Uma vez que este espectro seja deslocado, pode-se analisar matematicamente o efeito a ser medido através da técnica de convolução, combinando o sinal da rede sensora com uma segunda rede de Bragg, no caso uma FBG Hi-Bi (*High-Birrefringence*). A rede Hi-Bi tem um espectro de reflexão com dois picos característicos, correspondentes a dois estados de polarização mutuamente ortogonais, que podem ser separados por um divisor de polarização. Uma vez separados os estados de polarização, são enviados os sinais correspondentes a dois fotodetectores diferentes. Como o sinal originário da rede sensora será deslocado em direção a um dos dois espectros da rede Hi-Bi quando houver variação do parâmetro a ser medido, a convolução fornece uma variação na intensidade dos fotodetectores, sendo possível relacionar de forma unívoca a intensidade resultante em função do deslocamento sofrido pela rede sensora em resposta ao parâmetro externo analisado. Os ensaios iniciais realizados utilizaram o OSA e a confirmação da validade do modelo foi demonstrada com a utilização de fotodetectores.

No capítulo dois, o Estado da Arte descreve a evolução das redes de Bragg em fibra, mostrando aplicações variadas da utilização de redes como elementos sensores.

No capítulo três será discutida a fundamentação teórica e serão introduzidos os conceitos necessários ao desenvolvimento do trabalho à medida em que se descreve diversos componentes ópticos utilizados para a montagem experimental.

No capítulo quatro, será apresentada a metodologia utilizada para a montagem dos dispositivos sensores, com a descrição das configurações utilizadas.

No capítulo cinco são apresentados os resultados mais importantes e gráficos obtidos.

No capítulo seis são apresentadas as discussões.

No capítulo sete são apresentadas as conclusões e proposições para trabalhos futuros e também sugeridas modificações para melhor funcionamento do sistema de leitura.

CAPÍTULO 2

O Estado da Arte

2.1 Redes de Bragg em Fibra

As fibras ópticas indubitavelmente revolucionaram as telecomunicações. Porém, tão importante para os sistemas de comunicações ópticas quanto a própria invenção das fibras ópticas a partir de extensos estudos sobre guias de ondas, foi o aparecimento das redes de Bragg em fibra ou FBG. Em comunicações ópticas, estes dispositivos fotorrefrativos podem ser aplicados com diversos propósitos diferentes, como por exemplo, para compensação de dispersão na fibra ou em sistemas de multiplexação por divisão em comprimentos de onda (WDM - *Wavelength Division Multiplexing*) e multiplexação por divisão de onda densa (DWDM – *Dense Wavelength Division Multiplexing*).

Curiosamente, o aparecimento das FBG ocorreu de maneira não planejada quando a luz azul de um laser de Argônio foi lançada no interior de uma fibra por Hill et al em 1978 [1]. O efeito observado após alguns minutos foi a reflexão quase total de toda a luz incidente no interior da fibra, o que sugeria a formação de uma anormalidade que pudesse promover a reflexão da luz. A este novo efeito suposto não linear foi associado à formação das então chamadas “Redes de Hill”. Os espectros dessas redes mostraram que as mesmas eram sensíveis a variações de temperatura e tensão mecânica longitudinal. Em função destas variações, os espectros podiam sofrer deslocamentos em torno de seu comprimento de onda central. Os espectros confirmaram também que as recém descobertas redes de Hill comportavam-se como filtros de banda muito estreita. A explicação para a reflexão da luz era que uma perturbação no índice de refração da fibra, com uma dada periodicidade espacial havia sido formada. O período da modulação seria então definido pelo padrão de ondas estacionárias que se formam pela reflexão de Fresnel, que ocorre devido à clivagem da ponta da fibra [2]. O comprimento físico da rede seria então função do comprimento de coerência da radiação usada para gravar a rede. Convém observar que nesta época as redes de Bragg em fibra não passavam de mera curiosidade científica.

Ao ser gravada, a rede atua como um refletor distribuído, acoplando os modos propagante e contrapropagante, determinando assim a eficiência da gravação e o limite de

saturação para a refletividade da rede. Como estas redes foram gravadas inicialmente sem intervenção humana, foram chamadas auto-organizadas ou auto-induzidas.

Três anos após a descoberta da fotossensibilidade, Lam e Garside [3] mostraram que a dependência da magnitude do índice de refração induzido por irradiação varia com o quadrado da potência do laser utilizado, o que sugeria um processo de dois fótons como sendo o responsável pela formação da rede.

Uma das primeiras aplicações das FBG propostas pelo próprio Hill et al [4] foi para a realimentação distribuída em um laser de argônio. Sugeriram ainda que estes novos filtros poderiam ser usados em controle de modos de propagação e em chaveamento seletivo por comprimentos de onda e em acopladores. Nesta época já estava evidente que a resposta do filtro, ou rede, era dependente da flutuação de temperatura e tensão mecânica sobre ele. Mostraram ainda que a refletividade destas redes estava próxima de 100%. Observaram também que a fotossensibilidade era maior para maiores concentrações de Germânio na fibra.

Apesar da fotossensibilidade ter dado significativa contribuição para novas tecnologias com dispositivos a fibra óptica, as redes gravadas poderiam desaparecer se as fibras fossem expostas a luz com comprimentos de onda situados na região entre o azul e o verde. Desta forma, deu-se início à busca por processos que garantissem redes melhores e que não sofressem essa indesejável mudança em seu índice de refração. Surgem então as fibras com menor diâmetro de núcleo e dopadas com Germânio, tendo Stone [5] estudado diferentes fibras, todas dopadas com altas concentrações deste elemento químico. As redes obtidas por Stone duravam cerca de cinco dias, sendo o desaparecimento das mesmas atribuído ao fato de que foram gravadas em fibras multimodo, as quais podiam acoplar a luz em modos diferentes daqueles utilizados para a gravação. Stone fez ainda tentativas de gravação de redes em fibras altamente birrefringentes ou Hi-Bi, porém a refletividade das mesmas era no máximo 2%. Isto foi atribuído ao fato de que estas fibras eram multimodo para o verde (comprimento de onda utilizado para a gravação), o que dificultava a formação de uma rede forte.

É importante observar que já nesta época as recém descobertas redes eram contempladas como dispositivos fotorrefrativos com grande potencial à aplicação em telecomunicações (especificamente em comunicações ópticas) e em sensoriamento óptico. Assim, o desenvolvimento de novas técnicas de gravação e aumento da fotossensibilidade das fibras tornaram-se necessárias.

Desta forma, um considerável esforço tem sido empreendido para compreender o mecanismo envolvido na fotossensibilidade e também para desenvolver técnicas para aumentá-la nas fibras. As técnicas mais utilizadas são a hidrogenação, a varredura a chama e a co-dopagem por boro. Uma maneira alternativa de se garantir boas redes é a utilização de um laser de excímero de fluoreto de Argônio, sendo que esta técnica dispensa tratamento prévio da fibra para torná-la mais fotossensível [2].

2.2 Técnicas para Aumento de Fotossensibilidade em Fibras Ópticas

2.2.1 Hidrogenação

Nessa técnica as fibras ópticas de silicato de Germânio são submetidas a um ambiente em alta pressão de Hidrogênio. Sob estas condições, as moléculas do gás difundem para o interior do núcleo da fibra, promovendo mudanças no índice de refração quando o Hidrogênio reage com o Oxigênio, formando íons hidroxila (OH) e com o Germânio, formando íons GeH. Esta, porém, não é uma mudança permanente, uma vez que as moléculas podem novamente difundir para fora do núcleo.

Uma vez que a fibra é hidrogenada, a exposição à radiação ultravioleta leva a dissociação das moléculas de H₂ e favorece a formação dos centros de cor, os quais estão associados a fotossensibilidade da fibra. Os íons OH são formados por reações térmicas entre o Hidrogênio e o Silicato de Germânio da fibra. Estas ligações entre Silício ou Germânio e as hidroxilas são fortes absorvedores de ultravioleta [2, 8].

A principal vantagem de aumentar a fotossensibilidade da fibra por hidrogenação é a possibilidade de se gravar redes de Bragg em qualquer fibra de silicato de Germânio. Observa-se que em fibras hidrogenadas a mudança no índice de refração da região irradiada é permanente. Outra vantagem é que nas regiões em que não houve a formação dos defeitos ou centros de cor, o Hidrogênio difunde novamente para fora do núcleo da fibra, o que é interessante para que não haja perdas por absorção nas janelas de comunicações ópticas. A hidrogenação é um processo relativamente demorado, sendo necessário a exposição da fibra por cerca de dez dias, em temperaturas menores que 150° C e a pressões típicas da ordem de 800 atm. O tempo exigido para completar o processo pode ser reduzido se a temperatura for aumentada. Valores de mudança no índice de refração são da ordem de 10⁻¹ [2, 6].

2.2.2 Varredura a Chama

Esse método consiste em submeter uma seção da fibra a uma chama de Hidrogênio a fim de reduzir a fibra após o processo de fabricação, criando ligações OH [6]. Uma desvantagem deste método é que ele cria forte absorção em 1,4 μm , afetando as duas principais janelas de comunicações ópticas. As principais vantagens da varredura a chama são a fotossensibilização permanente da fibra e o tempo relativamente curto para terminar o processo (cerca de 20 minutos). Os valores obtidos para mudança de índice de refração são maiores que 10^{-3} , o que representa um aumento de dez vezes em fibras padrão para telecomunicações [2].

2.2.3 Co-dopagem por Boro

Quando o mecanismo da mudança de índice de refração ainda não era conhecido, Willians et al [7] sugeriram que a adição de Boro aumentava o índice de refração fotoinduzido em fibras padrão para telecomunicações. As redes obtidas apresentaram 95% de refletividade com exposição de cerca de 10 minutos à radiação de gravação. Concluíram que a adição de Boro não afeta o pico de absorção a 240 nm. Obtiveram saturação na mudança de índice de refração mais rápido que em outras fibras, sendo a magnitude da mudança próxima de 10^{-3} . A possível causa do aumento da fotossensibilidade devida ao Boro foi atribuída à relaxação da tensão mecânica fotoinduzida.

A principal vantagem de se usar boro como co-dopante é que este elemento promove um aumento adicional na fotossensibilidade de fibras dopadas com Germânio, além de se alcançar os níveis de saturação de refletividade mais rapidamente durante a gravação. Ao contrário das técnicas de hidrogenação e varredura a chama, a co-dopagem por Boro não aumenta a fotossensibilidade por criação de defeitos ou centros de cor. O aumento vem da relaxação do *stress* do material pela quebra de defeitos de ligação pela radiação ultravioleta. O Boro é um co-dopante que quando adicionado à sílica reduz seu índice de refração. Quando utilizado como co-dopante com o Germânio, permite a fabricação de fibras com alta concentração de Germânio, que, entretanto são compatíveis com fibras padrão para telecomunicações. As fibras dopadas com Boro e Germânio são fabricadas através de Deposição de Vapor Quimicamente Modificado (MCVD-*Modified Chemical Vapor*

Deposition). O uso de Boro e Germânio como dopantes aumenta o *stress* e conseqüentemente a birrefringência da fibra.

Fibras dopadas com cerca de 9% de GeO₂ e 7% de B₂O₃ podem apresentar modulação de índices mais altos que 10⁻³, o que é mais de uma ordem de grandeza da magnitude da variação do índice de refração em relação a fibras dopadas apenas com germânio [6, 7, 8].

2.3 Técnicas de Gravação de Redes de Bragg

As técnicas de gravação externa de FBG dividem-se basicamente em dois tipos: as técnicas interferométricas e as holográficas. Estas técnicas basicamente derivam daquela originalmente proposta por Meltz [9]. Diversas combinações envolvendo espelhos ou prismas podem ser utilizadas para criar a interferência de um feixe de laser dividido por um divisor de feixe. As técnicas de gravação externa podem ainda envolver o uso de máscara de fase. Em qualquer dos casos, a gravação externa exige considerável precisão para a formação de um padrão periódico ou modulação do índice de refração do núcleo da fibra.

A gravação com uso de interferômetro divisor de frentes de onda não é tão comum e este tipo de equipamento compreende o interferômetro de prisma e o interferômetro de Lloyd. O interferômetro de Lloyd é considerado um equipamento simples de usar e de fácil sintonia, sendo bastante estável. Esta estabilidade pode ainda ser aumentada pela substituição do espelho por um prisma. Um interferômetro de prisma possibilitou a gravação da primeira FBG para comprimento de onda de 1500 nm, para utilização em lasers a fibra dopada com Érbio por Kashyap et al [10]. Esta foi a primeira demonstração de gravação com técnica transversal, que possui a vantagem de possibilitar a gravação com comprimento de onda diferente do comprimento de onda a ser refletido pela rede. As redes obtidas tinham refletividade de cerca de 10% com variação do índice de refração de $6,5 \times 10^{-5}$ para redes com 3 mm de comprimento e reflexão de 80% para redes de 20 mm. Neste trabalho, Kashyap et al fazem alusão a possibilidade de utilização das redes obtidas como compensadores de dispersão.

Othonos e Lee [11] mostraram a importância da coerência espacial na técnica da máscara de fase quando se deseja uma rede de Bragg com comprimento de onda central bem definido. A coerência espacial é requerida devido à necessidade de um alto contraste no padrão de interferência. Como os experimentos foram conduzidos com diferentes distâncias

da máscara de fase à fibra, o contraste do padrão de interferência pode diminuir em função da distância se o laser não tiver alta coerência temporal.

Wang et al [12] mostraram que o comprimento de onda central e a largura de banda da rede podem ser controlados pela translação da fibra ou da máscara de fase durante a gravação. A largura de banda pode também ser controlada por inclinação da fibra. Com um interferômetro de Talbot modificado, gravaram também redes com gorjeio com comprimento de onda central de 600 a 1300 nm em fibras padrão para telecomunicações, as quais foram hidrogenadas. As redes com gorjeio são caracterizadas por possuírem uma variação monotônica em seu período [2]. A configuração utilizada para o interferômetro envolve técnicas para a conversão de frentes de onda para variar o comprimento de onda central das redes. A conversão é feita com uma lente cilíndrica côncava que converte duas frentes de onda planas em duas frentes de onda cilíndricas.

Através da chamada técnica de fabricação ponto-a-ponto, Hill et al [13] obtiveram a gravação de redes com pico de reflexão de 70% a 1536 nm com difração de segunda e terceira ordem. Obtiveram redes com 100% de refletividade com cerca de 300 translações e mostraram ser possível estreitar a largura de banda com 1000 translações. Este trabalho mostra também que torção na fibra pode ser utilizada para melhorar o acoplamento de luz em um modo específico, bem como a sintonia pode ser feita por *stress* na fibra.

2.4 Tipos de Redes de Bragg

Existem diversos tipos de redes de Bragg, sendo mais comuns o refletor Bragg, a rede de Bragg inclinada e a rede de Bragg com gorjeio. Cada rede foi desenvolvida para aplicações diferentes, que vão desde as comunicações ópticas a sensoriamento a fibra óptica. Essas aplicações são determinadas pelos parâmetros dessas redes, que podem ser variados de acordo com a técnica de gravação utilizada. Uma breve descrição de alguns tipos de redes de Bragg mais comuns é apresentada a seguir.

2.4.1 Refletor Bragg Comum

Uma rede de Bragg em fibra basicamente consiste em uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra. Esta perturbação pode ser produzida pela exposição do núcleo da fibra a um padrão de interferência de um sistema de gravação. O Refletor Bragg comum é o tipo de rede mais freqüentemente utilizado em sensoriamento óptico. Também se pode utilizar estes dispositivos como espelhos de banda estreita [4]. Outra aplicação comum é em sistemas laser, onde são usados nas extremidades das cavidades para promover realimentação e mesmo sintonia do laser [2].

Em sensoriamento as redes de Bragg são exploradas devido ao fato de se poder codificar as medidas em comprimento de onda. Isto é proveitoso devido ao fato de as redes de Bragg apresentarem efeitos foto-elástico e termo-óptico. Isto quer dizer que os comprimentos de onda refletidos variam em função das variações de temperatura e tensão mecânica longitudinal sobre a rede.

2.4.2 Redes de Bragg Inclínadas

Pode-se gravar redes de Bragg cujas modulações de índice de refração são inclinadas em relação ao eixo longitudinal da fibra. Isto faz com que a luz seja refletida para a casca ou para fora da fibra, promovendo guiamento de luz fora do núcleo da fibra, ou nos modos guiados pela casca. A eficiência do acoplamento entre núcleo e casca será determinado pelo ângulo de inclinação e intensidade da variação do índice de refração da rede e é uma função das três coordenadas cartesianas [8]. É muito importante observar que em uma rede de Bragg inclinada, diferentes comprimentos de onda serão refletidos em diferentes ângulos e também modos de propagação distintos de um mesmo comprimento de onda podem ser refletidos a diferentes ângulos em função das diferentes constantes de propagação [2]. Uma das aplicações das redes inclinadas é nos amplificadores a fibra dopada com érbio (EDFA - *Erbium-Dopped Fiber Amplifier*) [14].

Meltz e Morley [2] utilizaram redes inclinadas para acoplamento em seus trabalhos de discriminação de modos, obtendo eficiência de acoplamento maior que 21% em 488 nm e 541,5 nm. Isto é possível devido ao fato de que o feixe de laser de Argônio ao se propagar em fibras tem dois modos de propagação de luz verde e três para a luz azul. Kashyap et al [14]

descrevem o uso de redes inclinadas como dispositivos para tornar constante o ganho de amplificadores a fibra dopada com érbio.

2.4.3 Redes de Bragg com Gorjeio (*chirped*)

Redes de Bragg com gorjeio são utilizadas principalmente como compensadores de dispersão em fibras ópticas. Através do uso de redes com gorjeio, o pulso alargado pode ser novamente comprimido. O *chirp* (ou gorjeio) de uma rede, que pode ser linear ou quadrático pode ser obtido através de “saltos” no período da rede. Algumas redes possuem ainda gorjeio que varia randomicamente através de seu comprimento. Variações randômicas são usualmente obtidas com lasers pulsados, uma vez que a radiação ultravioleta tem pontos mais intensos no feixe, o que resulta em uma rede com pontos que não foram expostos igualmente à radiação [8].

A gravação de uma rede com gorjeio pode ser feita através de um feixe de ultra-violeta que produza um feixe não uniforme no padrão de difração, ou variando-se o índice de refração de maneira não uniforme através do período da rede. Diversas outras maneiras podem ainda produzir o gorjeio durante a gravação, como por exemplo submetendo-se a fibra a uma tensão não uniforme.

Na compensação de dispersão cromática as redes com gorjeio linear são as aplicadas [8]. As redes com gorjeio podem também ser aplicadas para comprimir pulsos não lineares que foram alargados através de modulação de fase. Willians et al [15] descrevem as redes com gorjeio como dispositivos de compressão de pulsos de sólitons em dispositivos de chaveamento fotônico em fibras. O trabalho observa a potência disponível da fonte e o comprimento da fibra como fatores que influenciam o alargamento e relaciona o fator de compressão da rede com uma razão de compressão que é função da amplitude do pico do espectro. Estas redes são ainda recomendadas para a redução de efeitos não lineares na fibra pelo alargamento dos pulsos, conforme descreve o trabalho de Farries et al [16]. As redes utilizadas neste ensaio são gravadas por feixes de íons, técnica em que a largura de banda de reflexão é determinada pelo comprimento da rede, pela profundidade das ranhuras e pelo gorjeio da rede. Este tipo de rede é recoberta com material de alto índice de refração após a gravação, para que o campo efetivamente se propague na região gravada. Redes deste tipo

podem ser usadas para otimizar o bombeamento de lasers a fibra, promovendo a reflexão da potência rejeitada para a fibra dopada.

2.4.4 Outros Tipos de Redes de Bragg

Usualmente dizemos que redes de Bragg gravadas com feixes de baixa intensidade são chamadas de redes de Bragg tipo I [8]. Normalmente estas redes são obtidas através de feixes contínuos ou à baixa taxa de pulsos [6]. Podem ser gravadas em fibras comuns de silicato de Germânio e os espectros de reflexão normalmente mostram baixas perdas.

Askins et al apud Kulshaw e Dakin [6] demonstraram que este tipo de rede pode ser obtida até mesmo por um único pulso de laser de excímero em 248 nm. Valores típicos obtidos são de 4×10^{-5} para modulação de índice e 40% para refletividade.

As redes tipo II também são resultado de irradiação a um único pulso de laser excímero de alta energia. Verifica-se que em determinada faixa de energia, dobrando-se a energia do pulso pode-se obter aumento de modulação de índice de cerca de 3 ordens de grandeza [2]. Deve-se observar, no entanto, que pulsos acima de 60 mJ podem danificar a fibra [8]. Archambault et al [17] obtiveram redes estáveis a temperaturas de até 800° C e altamente refletivas (99,8%), tendo gravado redes tipo I e tipo II. Com temperaturas acima de 1000° C as redes podem desaparecer.

Através de exame ao microscópio eletrônico, observa-se que nas redes tipo II formam-se trilhas na interface núcleo-casca. Assim, este tipo de rede acopla comprimentos de onda mais curtos na casca, resultando em uma rede altamente reflexiva em comprimentos de onda mais longos. Devido ao uso de laser de excímero e à gravação ser obtida a um único pulso, estas redes possuem a vantagem de serem facilmente produzidas em larga escala. As redes obtidas usualmente possuem refletividade próxima de 100% e largura de banda grande.

As redes tipo IIA são gravadas em fibras não hidrogenadas com lasers de baixa potência ou através de exposição prolongada a lasers pulsados [8]. Como resultado as redes obtidas são bastante resistentes a altas temperaturas. Eventualmente estas redes são referenciadas na literatura como tipo III.

Além destas redes, existem outros tipos de redes de Bragg cujo desenvolvimento é mais recente. Um exemplo são as redes de Bragg superpostas, cuja principal aplicação é em

multiplexação e demultiplexação de sinais. Estas redes foram desenvolvidas por Othonos et al [18] e basicamente são resultado da superposição de várias redes em um mesmo pedaço de fibra. Uma particularidade deste tipo de dispositivo é que cada vez que uma nova rede é gravada (sobreposta às já existentes), a refletividade do conjunto diminui. O trabalho de Othonos descreve a gravação de sete redes superpostas numa faixa espectral de 60 nm, apresentando refletividade maior que 45%.

Outro exemplo de redes de Bragg recentes são as chamadas superestruturas. Estas redes resultam de uma exposição com intensidade modulada ao longo do comprimento da fibra. Isto pode ser obtido pelo simples movimento ao longo da fibra do feixe de ultravioleta combinado com uma máscara de fase, enquanto sua intensidade é variada periodicamente, conforme demonstrou Eggleton et al [19]. As redes são gravadas bem próximo à máscara de fase com laser de excímero bombeado, resultando em redes com reflexão de até 95%. As redes foram gravadas com rajadas de 150 pulsos a uma taxa de 10 Hz. As redes refletem múltiplos comprimentos de onda igualmente espaçados de 0,13 nm em uma faixa de 1,0 nm. As principais aplicações deste tipo de redes são em filtros para processamento de sinais e para sintonia de lasers a fibra.

Ainda para sintonia de lasers a fibra pode-se usar as redes de Bragg de fase modificada, as quais atuam como filtros de transmissão de banda estreita. Estas redes são gravadas com um desvio de fase ao longo de seu comprimento, o que permite obter um espectro de transmissão específico, conforme demonstrado por Alferness et al [20].

2.4.5 Redes de Bragg em Fibras Birrefringentes

Em fibras birrefringentes, dois estados de polarização da luz, com mesmo comprimento de onda podem se propagar simultaneamente com uma diferença de fase [21]. A birrefringência induzida por compressão lateral pode levar a novos métodos de análise de variações de parâmetros usualmente utilizados em sensoriamento óptico [22]. A mudança de índice de refração induzida por compressão é chamada efeito foto-elástico e fornece a previsão teórica para a mudança da posição do pico de comprimento de onda para uma fibra submetida à compressão [22]. A birrefringência pode, portanto, ser induzida por pressão hidrostática sobre a fibra. Desta forma, pode-se utilizar as redes de Bragg para medições de variação de pressão hidrostática [23]. Uma aplicação imediata de um sensor baseado em

birrefringência induzida por compressão seria em monitoração de pressão de gases, onde a fibra apresentaria ainda a vantagem de ser um componente eletricamente passivo, conferindo a esta modalidade de sensoriamento uma característica intrínseca de segurança em ambiente potencialmente inflamável.

Como uma rede birrefringente, ou Hi-Bi, apresenta dois índices de refração ligeiramente diferentes, o que confere a estas redes a particularidade de possuírem dois picos característicos, é possível a monitoração simultânea de temperatura e pressão do gás. Isto foi demonstrado por Chen et al [23], que utilizou uma rede Hi-Bi gravada em fibra quase-retangular de silicato de boro. Estas redes foram também utilizadas pelo mesmo autor [24] para medição simultânea de variação de temperatura e tensão mecânica.

Nas chamadas fibras quase-retangulares a birrefringência é resultado da colocação lado a lado de dois elementos de borosilicato no núcleo. Isto resulta em valores de birrefringência muito mais alta do que nas fibras *bow-tie* e PANDA, devido à existência de dois coeficientes de expansão térmica distintos. As fibras *bow-tie*, PANDA e de núcleo ou casca elíptica também são propícias à gravação de redes de Bragg, conforme demonstrou Chehura et al [25]. Esse estudo demonstra que as fibras com casca elíptica apresentam maior sensibilidade quando uma carga é aplicada paralelamente ao eixo lento. Mesmo o eixo rápido mostra maior sensibilidade em comparação às outras fibras estudadas.

2.5 Aplicações Diversas de Redes de Bragg em Fibra para Sensoriamento

As redes de Bragg em fibra possibilitaram o sensoriamento óptico através de diversas técnicas, as quais estão relacionadas aos diversos tipos de redes existentes. O uso de fibras ópticas em sensoriamento é uma técnica que permite medir em tempo real os parâmetros desejados, os quais causaram algum tipo de variação no comportamento da rede de Bragg gravada. As aplicações práticas estendem-se desde construção civil até a indústria aeronáutica.

O princípio básico de um sensor a rede de Bragg é a mudança na condição de ressonância da rede, que dá o comprimento de onda de Bragg descrito pela equação [1]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo da rede e Λ é o período da rede.

Assim, ao se lançar luz de uma fonte de banda larga sobre a rede, a mesma irá refletir parte do espectro. Em outras palavras, uma rede de Bragg funciona como um filtro que transmite parte do espectro e reflete uma pequena parte. Este fato permite a interrogação da rede, pela análise do espectro refletido e/ou transmitido, verificando-se o deslocamento do comprimento de onda de Bragg central da luz refletida quando a rede sofre variação de temperatura ou tensão mecânica.

Desta forma, os sensores a rede de Bragg são vantajosos exatamente por serem codificados em comprimento de onda, porém surge a desvantagem de ser necessário utilizar o OSA. Trabalhos recentes mostram maneiras alternativas de se decodificar o sinal de sensores a rede de Bragg [26, 27] em adição às técnicas usuais que utilizam OSA, ou os interferômetros Fabri-Perot e Mach-Zehnder.

Além das tradicionais aplicações extensamente exploradas na literatura, pode-se citar o uso de redes de Bragg para monitoração de condições e controle de processos de fabricação de estruturas metálicas para aplicação em engenharia. Sandlin e Hokkanen [28] mostraram o uso de sensores a fibra embutidos em ligas de níquel que permitem a operação em ambientes com temperaturas próximas a 600° C. Mostraram ainda como a fibra embutida pode atuar como um sensor de tensão aplicada à curvatura em temperatura ambiente. Este tipo de rede de Bragg é descrita ainda como sendo vantajosa por ser protegida contra danos por agentes químicos e mecânicos. Ainda devido à simetria cilíndrica da camada protetora, efeitos de atenuação e polarização por microcurvaturas são mínimos.

MacPherson et al [29] utilizaram redes gravadas em fibras com quatro núcleos para construir um sensor capaz de detectar variações de ângulo de inclinação e rotação através da ação da força gravitacional sobre uma pequena estrutura suspensa. O sensor em questão atua como um dispositivo capaz de dar a orientação espacial do arranjo experimental. O sensor funciona baseado no fato de que um par de redes sob rotação fornece uma diferença entre a razão entre as tensões em dois eixos ortogonais distintos. Da mesma forma, a inclinação pode ser medida pela magnitude da diferença de tensão entre os pares. As aplicações sugeridas para o dispositivo seriam em robótica, arranjos hidrofônicos e telescópios.

Fukuchi et al [30] utilizaram um arranjo com duas redes para construir um sensor de nível de água para ambientes hídricos, baseados em tensão mecânica aplicada sobre uma rede solidária a um diafragma sob o qual a pressão hidrostática exerce uma força. A segunda rede

tem a finalidade de fazer correções devido a variações de temperatura. Os testes realizados em um período de um ano mostraram resultados satisfatórios, provando que este tipo de sensor não sofre danos devidos ao ambiente de trabalho desfavorável.

Maier et al [31], também utilizando um arranjo com duas redes desenvolveram um sensor de pressão barométrica, sendo o arranjo, porém insensível à temperatura. As redes são dispostas em uma estrutura em T dentro de uma câmara evacuada de paredes muito finas, que podem deformar-se sujeitas à pressão atmosférica, causando variação de tensão mecânica sobre elas. Os resultados obtidos, embora não em total acordo com as previsões teóricas mostraram que este princípio pode ser aplicado a sistemas barométricos através da transdução de força exercida pela pressão em uma superfície em tensão sob a rede.

Para medidas de pressão lateral, Sheng et al [32] utilizaram redes recobertas com uma camada polimérica, a qual possui módulo de Young quatro vezes menor que a rede. Sob ação da pressão hidrostática, o polímero expande e atua sob uma pequena placa colocada na ponta da rede, submetendo-a à tensão mecânica. Os resultados mostraram que este sistema é mais eficiente em resposta do que a simples exposição da rede a pressão lateral por um fator de 10^4 .

Betz et al [33] utilizaram uma rede de Bragg para monitoração de ondas ultra-sônicas em estruturas, vislumbrando principalmente a possibilidade de utilização do dispositivo na indústria aeronáutica. O trabalho observa que normalmente os danos causados por ondas ultra-sônicas são de difícil detecção, pois os níveis de tensão mecânica induzidos geram deformações normalmente da ordem de $\mu strain$. Como as ondas acústicas que se propagam em um meio material são descritas como uma série de expansões e compressões, estas são naturalmente relacionadas à tensão mecânica. Desta forma, o desvio do comprimento de onda de Bragg pode ser modulado com a frequência da onda acústica, sendo possível então a monitoração e previsão de danos devidos a estas ondas.

Fernandez et al [34] demonstraram a aplicação de redes de Bragg em ambiente sujeito a doses de radiação gama e de nêutrons para sensoriamento de temperatura em reatores. Supondo-se que radiações nucleares podem produzir efeitos semelhantes à radiação utilizada para gravação das fibras, o trabalho mostrou que o desvio do comprimento de onda de Bragg em função da radiação nuclear sofre saturação e estabiliza depois de determinado tempo de exposição.

Güemes et al [35] estudaram o comportamento sob esforços de tração, compressão e torção para determinar curvaturas em materiais laminados para uso em aeronáutica, através de

redes de Bragg. Embora o uso aeronáutico submeta a fibra a ambientes hostis, os autores mostram que as fibras podem ser embutidas nas estruturas adequadamente em tubos de silicone para proteção contra agentes externos. Os testes foram realizados à temperatura ambiente e comparados a resultados obtidos através de extensômetro.

Ainda tratando de estruturas laminadas com potencial aplicação em aeronáutica, Kuang et al [36] realizaram medidas de tensão residual e resposta a impacto em compostos laminados com sensores a rede de Bragg embutidos. Estes materiais podem ser encontrados em condições operacionais em aeronaves Airbus A3XX de última geração. Porém, devido a possibilidade de cargas mecânicas induzidas por impactos, por exemplo durante a queda de ferramentas na ocasião da manutenção, testes não destrutivos devem ser feitos com frequência (raio-x, ultrassom) para detectar possíveis danos. Porém, estas inspeções de rotina exigem desmontagem parcial da aeronave envolvendo grande número de profissionais e alto custo na operação. Desta forma, redes de Bragg são uma opção atraente para uso em aeronaves, até mesmo pela sua vantagem relacionada ao fato de ser um componente eletricamente passivo e sua imunidade a campos eletromagnéticos. Os resultados mostraram que as redes se comportaram como previsto pelo modelo teórico e concordaram com resultados obtidos em testes usuais de tensão. As redes também suportaram os rigores dos testes de impacto, mostrando a possível progressão dos danos, provando que podem operar em condições reais de uso aeronáutico.

Na indústria mecânica, além de monitoração em testes de propriedades mecânicas de materiais, pode-se usar as redes de Bragg para acompanhar a temperatura em zonas afetadas por calor (*HAZ-Heat Affected Zone*), conforme sugere Suárez et al [37]. As redes, neste procedimento são colocadas paralelamente às gotas produzidas pelo material de adição do processo de soldagem. A rede pode sofrer efeitos de expansão devido a dois fatores durante a soldagem, a temperatura e *stress* do material durante a aplicação do arco elétrico. Foram utilizadas duas redes, uma colocada firmemente à superfície da placa e outra colocada dentro de um fino tubo de aço, que não tinha contato com a placa. A rede que foi colada apresentou aquecimento residual devido ao adesivo, que também dificultou o fluxo de calor para a rede. Para fins de comparação foi usado um termopar para validar os resultados obtidos, mostrando resultados bastante similares. A realização dos ensaios foi possível a temperaturas superiores a 500° C geradas pelo arco elétrico.

Sensores a rede de Bragg com gorjeio (*chirp*) são descritos por Gillooly et al [38] para medir desgaste por abrasão. Os ensaios foram realizados com barras de fibra de carbono as

quais sofrem desgaste pela ação de uma lima. Nestas barras são coladas as redes, e o parâmetro físico definido como desgaste pode ser medido pela redução do comprimento das redes, pois o desgaste será uma função relacionada ao comprimento de onda de Bragg central medido durante o ensaio, o qual naturalmente vai sofrer variação devido ao encurtamento da rede. Os autores atentam para o efeito do atrito no aquecimento das redes, o qual, entretanto não afetaria o sensoriamento em condições reais.

Uma interessante aplicação dos sensores a rede de Bragg é proposta por Falciai et al [39]. O trabalho descreve o uso de redes para medida de deformação de artefatos de madeira, pela umidade relativa ambiental. Os ensaios foram realizados em uma peça de madeira, construída utilizando-se técnicas dos séculos XV e XVI. Sob as condições normais de exposição de um objeto artístico, os autores puderam concluir que deformações em sentido longitudinal são cerca de 20 vezes maiores que no sentido transversal.

Além destas aplicações específicas das redes de Bragg, devemos observar que elas permitem o sensoriamento simultâneo de temperatura e tensão mecânica, conforme descrevem alguns trabalhos [40, 41, 42, 43].

Porém, a quase totalidade dos trabalhos envolvendo redes de Bragg descreve técnicas de leitura que se baseiam no fato de que a interrogação de uma rede é codificada em comprimento de onda, o que acarreta em utilização de um OSA como sistema de leitura. Alguns trabalhos propõem o uso de interferômetros para leitura, como o desenvolvido por Kersey et al [44]. A técnica de detecção é proposta para sistemas em que se deseja alta resolução em medidas de deformação por tensão mecânica. O interferômetro usado é um Mach-Zehnder não balanceado, ou seja, um interferômetro que se comporta como um filtro espectral com uma função de transferência representada por um co-seno aumentado. Nesta função existe um fator que é proporcional à intensidade de entrada. Este interferômetro atua como um discriminador que detecta os desvios de comprimento de onda de uma fonte efetiva formada devido à deformação da rede. O aparato experimental utiliza um OSA e fotodetectores conjugados a um osciloscópio para a aquisição de dados.

Kersey e Davis [45] propuseram uma técnica de interrogação de baixo custo que utiliza um arranjo de redes de Bragg. Redes de referência sintonizáveis atuam como filtros rejeita faixa e podem direcionar o sinal das redes sensoras do arranjo para um transdutor, por exemplo um atuador piezoelétrico. As redes de referência atuam na verdade como receptores que podem ser sintonizados independentemente, para atuar com uma das redes sensoras do arranjo que possua mesma largura espectral, comprimento de onda central e refletividade. A

luz transmitida pelo sistema de filtros pode então ser detectada por um único fotodetector, o qual alimenta dois amplificadores *Lock-In*, cuja referência é dada pelo valor do sinal das redes de referência. Pela soma dos sinais medidos pode-se determinar o valor de deformação da rede sensora sintonizada com o filtro de referência, pois a tensão elétrica medida é diretamente proporcional à deformação.

Coroy e Measures [46] criaram uma técnica de demodulação que usa a eletroabsorção do poço quântico de um semiconductor. A borda de absorção do poço quântico é sintonizada através do efeito Stark para atuar como um filtro sintonizável para uma rede de Bragg. O detector utilizado é de InGaAs/InP e este sistema de leitura possibilita a medição de sinais da ordem de 3nW de potência.

Fallon et al [47] propuseram um sistema de baixo custo para sensoramento de tensão mecânica que conduzam a grandes deformações. Também demonstraram um método para interrogação simultânea de quatro redes de Bragg. Os dois sistemas propostos utilizam fotodetectores. Interessante observar que este trabalho, em oposição ao trabalho de Kersey e Davis [45], permite a interrogação simultânea de duas redes de Bragg idênticas. A rede de referência neste caso funciona como um filtro de rejeição melhor que aquele apresentado no trabalho de Kersey e Davis.

Going et al [48] propuseram uma técnica chamada Variação Mínima de Desvio para determinar o desvio do comprimento de onda de Bragg. Esta técnica implica em um espectro cuja forma continua praticamente a mesma durante a operação. Os resultados mostraram-se semelhantes aos obtidos pela técnica de detecção convencional de pico. A técnica se vale efetivamente da “construção” do espectro de duas redes de Bragg. Para cada valor de tensão mecânica aplicada a uma das redes, o espectro é desviado artificialmente e o desvio de comprimento de onda da rede sensora é calculado em função do comprimento de onda de Bragg central antes da aplicação da tensão mecânica.

Martelli [49], após revisão bibliográfica constata que a detecção de pequenos valores de deslocamento espectral do comprimento de onda central de Bragg é um dos problemas encontrados na utilização prática de sensores a rede de Bragg em fibra. Seu trabalho, porém, foi centrado na construção de um termômetro utilizando uma rede de Bragg com alta estabilidade térmica e capaz de operar a altas temperaturas. O trabalho propõe dois sistemas de monitoração. Um deles é baseado em demodulação por filtro sintonizável e se vale de fotodetectores como sistema de aquisição de dados. O outro sistema de demodulação é sensível à fase e faz uso de um fotodiodo.

Oliveira [50] também utilizando um atuador piezoelétrico para sintonia, modula mecanicamente uma rede de Bragg de referência e trabalha com a convolução entre o espectro de reflexão desta rede e o de uma rede sensora e propõe um sistema de fotodeteção utilizando um foto-diodo de InGaAs.

O trabalho desenvolvido por MacPherson et al [29] é bastante complexo por utilizar cinco fotodetectores no total, sendo quatro deles utilizados associados aos múltiplos núcleos das fibras utilizadas. Este trabalho é interessante também por mostrar que ao se trabalhar com vários fotodetectores, uma técnica bastante confiável é proceder à razão entre as intensidades.

O sistema de sensoriamento de pressão barométrica, desenvolvido por Maier et al [31], utiliza dois fotodetectores distintos, sendo um deles para monitorar a potência da fonte óptica. Um segundo detector, o qual recebe um sinal de luz, cujo comprimento de onda foi selecionado por um filtro Fabri-Perot, efetivamente faz a leitura através de um sistema de aquisição de dados via interface computacional, controlada pelo programa Lab ViewTM.

Gillooly et al [38] ao medirem o desgaste por abrasão utilizaram um sistema convencional de leitura, codificado em comprimento de onda, sendo utilizado no arranjo um reflectômetro de alta resolução para proporcionar alta resolução nas medidas. Um segundo conjunto experimental mostrou ser possível realizar a leitura com foto-diodo, o qual mede a intensidade de luz refletida pela FBG com gorjeio. Com ambos os sistemas de medida foi possível determinar o desgaste como função da variação de gorjeio.

Embora vários sistemas de leitura já possam dispensar a utilização do OSA, a busca por novos sistemas de leitura codificados em intensidade torna-se uma opção mais atraente devido ao baixo custo do equipamento de leitura e pela simplicidade do mesmo. Há de se observar ainda que a remoção do OSA do conjunto torna o sensor mais compacto, requisito quase sempre desejável em condições operacionais reais.

CAPÍTULO 3

Fundamentação Teórica

O sistema de leitura codificado em intensidade para sensores de FBG proposto consiste em um circuito óptico capaz de separar os dois estados de polarização ortogonais da luz refletida por uma Rede de Bragg gravada em fibra óptica altamente birrefringente. Quando um feixe de luz incide sobre uma rede deste tipo, conhecida como FBG Hi-Bi, o espectro de reflexão tem a particularidade de apresentar dois picos característicos correspondentes aos dois estados de polarização ortogonais entre si. A separação entre os dois picos do espectro surge como característica intrínseca da birrefringência da fibra.

O circuito óptico em questão conta com um componente capaz de separar estes dois estados de polarização para que se possa convoluir a intensidade do sinal dos picos da rede Hi-Bi com o sinal de uma rede sensora que sofra uma variação de tensão mecânica, por exemplo. Este componente é chamado PBS (*Polarizing Beam Splitter*) ou polarizador separador de feixes e é um pequeno cristal de forma cúbica com aresta de 3 mm.

A rede sensora tem a finalidade de monitorar variações de temperatura ou tensão mecânica, sendo que seu comportamento é regido pela equação [2]

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T}\right)\Delta T \quad (2)$$

onde o primeiro termo da primeira parcela do lado direito da equação representa o efeito da tensão mecânica sobre o índice de refração efetivo da fibra. Analogamente, o primeiro termo da segunda parcela do lado direito representa o efeito da temperatura sobre o índice de refração. Ainda na primeira parcela, o segundo termo representa a dilatação mecânica da rede e o segundo termo da segunda parcela representa a dilatação térmica. Nesta equação l é o comprimento da rede, T é a temperatura, ΔT é a variação da temperatura, Λ é o período da rede e n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra. Neste trabalho é de particular interesse a primeira parcela do lado direito da equação, a qual descreve o comportamento foto-elástico da rede. A segunda parcela descreve o comportamento termo-óptico, que também é apresentado por todas as redes de Bragg, mas não será explorado neste ensaio,

embora o sistema de leitura proposto possa também realizar medidas de variação de temperatura sobre a rede.

Deve-se observar que um circuito óptico deste tipo uma vez caracterizado dispensa a utilização do OSA. Nos últimos anos, diversas configurações foram desenvolvidas e testadas com sistemas a fibra óptica com finalidade de sensoriamento, porém quase todos dependem da monitoração constante com o OSA, o que pode muitas vezes tornar tais configurações inviáveis operacionalmente devido ao alto custo do equipamento. Dessa forma, a utilização de circuitos fotodetectores é uma opção mais atraente devido ao custo reduzido da montagem. Porém, a montagem de um circuito óptico deste tipo é complexa e sua caracterização bastante difícil, principalmente por depender de alinhamento preciso entre alguns componentes ópticos utilizados e devido a altas perdas nas conexões entre os diversos componentes. Para uma melhor compreensão do funcionamento deste sistema de leitura, os elementos utilizados são brevemente descritos a seguir.

3.1 LED

O LED ou *Light Emitting Diode* (diodo emissor de luz) é uma fonte de luz que tem como característica um espectro largo da luz gerada e menor eficiência do acoplamento da luz na fibra, se comparado a diodos laser, além de limitações quanto à taxa de modulação [51]. O LED difere do diodo laser pela predominância do mecanismo de geração de fótons, pois o mecanismo predominante são recombinações espontâneas, enquanto no diodo laser, quando operado acima do limiar de oscilação, predomina a emissão estimulada de luz.

3.2 *Fiber U-Bench*

O *Fiber U-Bench*, ou Suporte em U para Fibra, é um equipamento dotado de duas lentes Grin (*gradient index*), ou lente de índice gradual, separadas por uma distância de 30 mm. A particularidade deste componente é que ele possui duas lentes Grin perfeitamente alinhadas no sentido de seus eixos axiais, promovendo assim o acoplamento de luz entre as lentes. Normalmente, o Suporte em U para Fibras é utilizado para permitir modulação de luz

através de um *Chopper* (modulador mecânico), ou sobre ele pode ser colocado um polarizador separador de feixe. O Suporte em U para Fibra é mostrado na figura 1.



Figura 1 – *Fiber U-Bench* com lentes Grin acopladas

3.3 Lente Grin

Lentes Grin são pequenas barras utilizadas em microóptica para focalizar o feixe proveniente de uma fibra óptica em outra fibra, expandindo e colimando o feixe [52]. Como este tipo de lente possui uma pequena distância focal, é possível utilizá-las para a construção de dispositivos compactos, o que quase sempre é desejável em sensoriamento óptico. A distância focal de uma lente Grin é determinada pela mudança no índice de refração, Δn , o qual é limitado pelas técnicas de fabricação, não atingindo valores maiores que 0,1. Esta variação de índice de refração se pronuncia radialmente de fora para dentro, em direção ao eixo axial da lente. O nome Grin deriva de *Gradient Index*, o que sugere variação no índice de refração deste componente óptico. O desenvolvimento deste tipo de lente se deu devido a necessidade de reduzir aberrações em sistemas ópticos.

Atualmente, diversos tipos de lentes Grin são encontradas comercialmente, sendo sua aplicação variando desde a utilização em impressoras *laser*, até o tipo utilizado em comunicações ópticas, sendo esta última constituída de um pequeno cilindro com poucos milímetros de diâmetro, utilizada principalmente em acopladores tipo estrela $n \times n$, sendo chamadas de barras misturadoras neste tipo de componente óptico.

As lentes Grin são usualmente fabricadas imergindo-se barras de vidro homogêneo de formato cilíndrico em um banho de sal fundido. Neste processo, existe a troca de íons entre o vidro e o sal, o que efetivamente promove a mudança no índice de refração.

Como descrito anteriormente, as lentes Grin são parte importante do Suporte em U para Fibra, funcionando conjugadas com o polarizador separador de feixe.

3.4 Polarizador Separador de Feixe

Um Polarizador Separador de Feixe é um elemento óptico capaz de promover a divisão de um feixe de luz. Usualmente são encontrados em interferômetros, como por exemplo, no interferômetro de Michelson. Neste caso possuem a forma de lâminas. O polarizador separador de feixe, ou PBS (*Polarizing Beamsplitter*) é um elemento básico utilizado em óptica para promover a divisão de um feixe de luz, separando também os dois estados de polarização ortogonais entre si do feixe. Um PBS pode ser constituído de dois prismas de vidro colados de modo a formar um cubo, como é mostrado na figura 2, que ilustra como os estados de polarização ortogonais são separados. A separação dos dois estados de polarização é feita através da reflexão da luz na interface entre as duas faces. Tipicamente, este tipo de Polarizador separador de feixe pode proporcionar razões de extinção de 1000:1 no feixe transmitido.

A separação de dois estados de polarização pode ser promovida também por prismas feitos de material birrefringente [52], ou seja, por meio de um material que possui dois índices de refração distintos, o que ocorre em função da forte absorção para um estado de polarização da luz e transparência ao outro. A birrefringência em um cristal está intimamente associada ao eixo óptico, que é a direção em torno da qual os átomos se distribuem de maneira simétrica no arranjo cristalino. Isto está associado ao fato de que o eixo óptico é determinado em função da intensidade das forças de ligação no arranjo. Estas forças de ligação podem ser diferentes em direções ortogonais entre si, determinando desta forma o eixo óptico em função da direção em que a transparência a um determinado estado de polarização é observada. Em outras palavras, pode-se dizer que a birrefringência em um cristal surge em função da anisotropia das forças de ligação na estrutura, o que faz com que determinadas propriedades ópticas não se observem igualmente em todas as direções. Assim, a luz não se propaga no interior do cristal

uniformemente como uma onda esférica, dando origem a ondas ordinárias esféricas e ondas extraordinárias elipsoidais.

Assim, à onda ordinária é associado um índice de refração n_o e à onda extraordinária é associado um índice de refração n_e . Como estes polarizadores são constituídos de dois prismas colados, é necessário que a cola utilizada possua um índice de refração que seja aproximadamente igual à média de n_o e n_e . A pequena diferença entre as eficiências de transmissão e reflexão em um PBS está relacionada aos dois valores distintos de índices de refração. O polarizador separador de feixe construído com material birrefringente tem a vantagem de proporcionar melhores razões de extinção, na ordem de 10000:1 em transmissão.

No domínio da microóptica, especificamente em sistemas que utilizam fibras ópticas, uma aplicação particular é em alguns tipos de acopladores estrela. Mesmo em sensoriamento óptico [21, 53] diversas são as aplicações destes componentes.

Alguns tipos de acopladores dotados de PBS quando conjugados com redes de Bragg em fibra podem funcionar como filtros passa banda [8], utilizados para acoplar modos de polarização ortogonais entre si em fibras distintas.

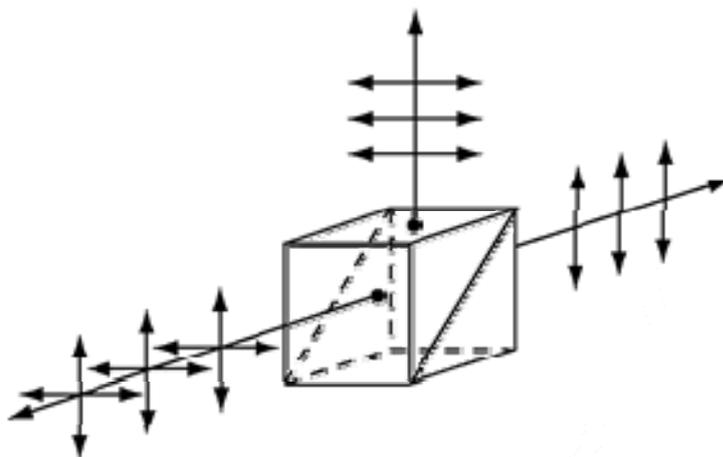


Figura 2 – Polarizador separador de feixe

3.5 Fibras Ópticas

Uma fibra óptica é um meio material propício à propagação de ondas eletromagnéticas, utilizado para a transmissão de potência luminosa de uma fonte óptica até um elemento detector.

O núcleo de uma fibra óptica, com dimensões características de algumas dezenas de micrometros ou menos, no caso de fibras monomodo, é constituído de um material dielétrico, em geral sílica (SiO_2), que deve apresentar boa transparência ao comprimento de onda da radiação que se deseja propagar, situado na região do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético. O conjunto de comprimentos de onda cuja propagação é permitida numa fibra óptica constitui a banda passante, e é função da geometria da fibra e do índice de refração, podendo sofrer alterações também em função do comprimento do enlace óptico devido à dispersão.

Se uma fibra fosse constituída apenas do núcleo de sílica (vidro), qualquer tipo de material adjacente a sua superfície, por exemplo, poeira, poderia resultar em refração e implicar em perda de energia. Por esta razão existe a necessidade de envolver o núcleo em uma casca, cujo índice de refração deve ser ligeiramente menor do que o do núcleo, a fim de promover reflexão interna total no interior do núcleo.

O índice de refração do núcleo pode ser alterado através de dopagem, sendo comumente utilizado Germânio, Fósforo e Boro, sendo a adição destes elementos também vantajosa para o aumento da fotossensibilidade.

O índice de refração é também utilizado para classificar as fibras quanto ao chamado perfil. Nas fibras com perfil gradual ou fibras de índice gradual, o índice de refração é função do raio do núcleo, o que dá origem a uma curva parabólica de índice em função do raio.

No caso de o núcleo apresentar índice de refração que não varia com o raio, ele é chamado perfil degrau ou a fibra é dita de índice degrau. No caso do índice degrau, a luz que se propaga no interior do núcleo pode ser tratada de acordo com a óptica geométrica, aproximando-se a propagação por uma sucessão de trajetórias retilíneas do feixe que sofre múltiplas reflexões. No caso da fibra de índice gradual, as trajetórias são curvas em função da variação constante do índice de refração em função do raio. Em ambos os casos, contudo, a propagação deve satisfazer às Equações de Maxwell em coordenadas cilíndricas, em função da geometria da fibra.

As soluções das Equações de Maxwell para ondas eletromagnéticas conduzem a modos específicos de propagação relacionados ao diâmetro da fibra como condições de contorno. Em virtude das condições de contorno as fibras podem ainda ser classificadas como monomodo e multimodo. Na fibra monomodo apenas um modo de propagação é permitido, e na multimodo vários modos de propagação são permitidos, sendo cada um associado a um ângulo diferente de incidência do raio luminoso no interior do núcleo. Evidentemente esta é uma aproximação simplificada pela óptica geométrica [51, 54, 55].

3.5.1 Birrefringência em Fibras

A birrefringência em fibras ópticas é uma propriedade que possibilita a propagação da luz em dois estados de polarização isoladamente. Isto é consequência da anisotropia na estrutura do material, que conduz a diferentes frequências de vibração nas moléculas, em diferentes direções. Em geral, a propagação de uma onda eletromagnética em uma fibra birrefringente pode ser feita em duas velocidades diferentes, dessa forma o material passa a exibir dois índices de refração diferentes.

Uma fibra monomodo deve ser usada quando se deseja manter a luz em um estado de polarização definido [56]. Isto implica em dizer que se a luz entra na fibra polarizada linearmente, irá sair polarizada linearmente, em função de uma perfeita simetria da fibra e de esta não exibir nenhum tipo de anisotropia. Esta, porém é uma aproximação idealizada, uma vez que na verdade o próprio processo de conformação da fibra induz tensões mecânicas residuais que podem alterar o estado de polarização da luz. As fibras multimodo podem alterar o estado de polarização de entrada em relação ao de saída. Quando se deseja propagar a luz independentemente em dois estados de polarização distintos, pode-se usar fibras birrefringentes. O fato de se utilizar fibras birrefringentes é necessário, mas não suficiente para garantir a propagação de luz em um determinado estado de polarização [57]. Mesmo fibras birrefringentes podem acoplar um determinado estado de polarização para outro modo, se ela for de baixa birrefringência. Desta forma, existe um coeficiente, normalmente denotado por h , que define o parâmetro de acoplamento de modos [58].

Um exemplo de fibra birrefringente é aquela que possui seção transversal assimétrica, por exemplo, com núcleo elíptico. Nestas fibras, existem regiões com índices de refração diferenciais entre o núcleo e a casca [53]. Neste caso, a luz só manterá seu estado de

polarização inicial se for lançada dentro do núcleo com polarização linear e alinhado com o eixo menor da seção elíptica. As fibras birrefringentes de núcleo elíptico normalmente requerem altos níveis de dopagem que contribuem para aumentar as perdas de potência [58].

Outros tipos de fibras birrefringentes utilizam núcleos submetidos a tensão linear ou tensionamento através de torção [56]. A birrefringência por tensão mecânica (*stress*) pode ser induzida usando cascas elípticas com altos coeficientes de expansão térmica. As fibras que apresentam duas regiões distintas de tensão são muitas vezes chamadas *bow-tie* e PANDA, devido ao formato das regiões sob tensão mecânica.

No caso da birrefringência obtida por torção, o efeito é obtido pela rotação do campo elétrico quando da propagação da luz no guia de onda torcido. Isto ocorre porque as constantes de propagação dos modos polarizados por torção à direita e a esquerda são diferentes. Quando se trabalha com sistemas em que a polarização é um fator importante, o uso de fibras mantenedoras de polarização é muitas vezes necessário. Uma fibra mantenedora de polarização possui dois eixos sob os quais se podem acoplar estados de polarização distintos. Estes eixos são chamados de eixo rápido e eixo lento e a diferença entre os seus índices de refração dá a medida quantitativa da birrefringência. Este tipo de fibra evita que o estado de polarização linear seja modificado para circular ou que o contrário aconteça. Mesmo sob influência de distorções que possam ser causadas por agentes externos, tais como microcurvaturas, dobras ou torções, este tipo de fibra continua a propagar a luz no modo de polarização original em que ela entrou na guia [58].

3.6 Circuladores Ópticos

Um circulador óptico é um componente óptico passivo utilizado em sistemas de comunicações a fibra óptica. Sua principal aplicação é em sistemas que necessitem de um elemento capaz de direcionar o feixe de luz sem promover sua divisão, como acontece com os acopladores ópticos. Por esta razão, sua utilização é preferível em algumas montagens experimentais para sensoriamento óptico. Também pode ser usado para separar a luz do sentido propagante da luz no sentido contrapropagante de um sistema óptico.

Pode-se dizer que um circulador é um circuito óptico com n portas. Para nossos propósitos, interessa o funcionamento do circulador de três portas. A figura 3 mostra um diagrama esquemático de um componente deste tipo e ilustra seu funcionamento [59].

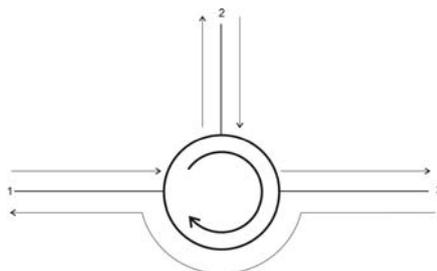


Figura 3 – Diagrama esquemático de um circulador óptico

3.7 Acopladores Ópticos

Acopladores ópticos, como os circuladores, são componentes ópticos passivos que possuem diversas e importantes funções em sistemas a fibra óptica, promovendo a junção e distribuição de ondas de luz. Um tipo particular de acoplador interessante para sensoriamento óptico é o Acoplador Direcional Bicônico Fundido, o qual utiliza fibras unidas por fusão como uma guia de ondas capaz de promover o acoplamento [59]. Este acoplamento é possível devido ao fato de duas ou mais fibras serem fundidas juntas, formando uma guia de ondas acoplado. Isto é feito aquecendo-se as fibras e tracionando-as na região da junção, o que faz com que seus núcleos fiquem suficientemente próximos para permitir o acoplamento. Neste caso, o acoplamento é promovido através da propagação de campos evanescentes em guias de ondas adjacentes. A figura 4 mostra um esquema de um acoplador direcional bicônico fundido.

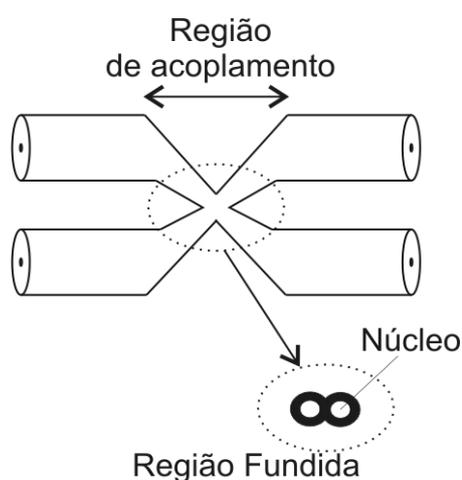


Figura 4 – Esquema de um acoplador direcional bicônico fundido

Ao contrário dos circuladores, alguns tipos de acopladores permitem sentido de propagação unidirecional em uma ou mais portas. Outros sentidos de propagação podem ser encontrados em outros tipos de acopladores, porém a figura 5 ilustra o acoplamento específico promovido por um determinado tipo de acoplador direcional bicônico fundido, o qual é de interesse a este trabalho.

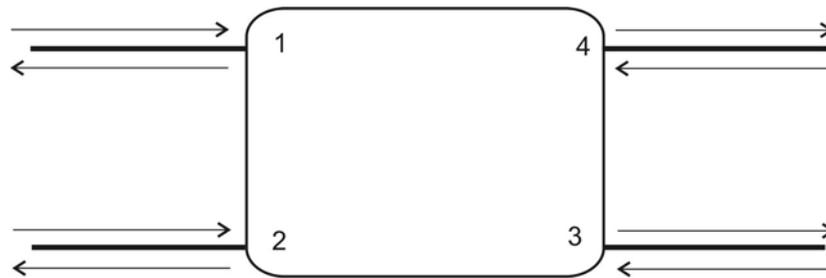


Figura 5 – Sentido de propagação da luz em acopladores 2 x 2

Os acopladores muitas vezes são ditos $n \times n$ quando o número de portas de entrada da luz é igual ao número de portas que possibilita a saída e/ou retorno da luz. Para este trabalho, a descrição foi focada no acoplador 2 x 2, pois foi o tipo utilizado. É importante observar que devido a perdas por inserção e derivação, o uso de acopladores limita significativamente a potência útil retirada do sistema.

3.8 Controladores de Polarização

Sabe-se que o estado de polarização da luz pode variar como consequência de variações de temperatura e tensão na fibra. Desta forma, deve-se usar um controlador de polarização para manter o estado de polarização desejado a um determinado arranjo experimental. Basicamente, um controlador de polarização ou transformador de polarização consiste em uma fibra enrolada e acondicionada em um receptáculo que permite seu manuseio, causando torção mecânica na fibra e alterando o estado de polarização.

Alguns controladores de polarização consistem em dois ou três destes receptáculos posicionados sequencialmente. Assim, cada um dos elementos atua independentemente, rotacionando os estados de polarização em relação ao eixo longitudinal. Uma vez que um estado de polarização tem dois graus de liberdade, são necessários pelo menos dois destes elementos para se obter a resposta desejada.

Os controladores de polarização modificam os estados de polarização da luz através de indução de birrefringência na fibra, principalmente por forças externas ou curvaturas. Neste caso, a amplitude do campo elétrico é mantida, mas sua direção é variada. Ao se combinar dois ou mais enrolamentos, cada um deles é responsável por induzir uma diferença de fase. Um tipo comum de controlador de polarização é apresentado na figura 6.



Figura 6 – Controlador de polarização

Os três elementos de formato quadrado ou placas que podem ser vistos na figura acomodam em seu interior uma parte da fibra enrolada. Assim, ao variar o ângulo de cada um destes elementos, pode-se variar o estado de polarização da luz que atravessa este componente óptico. Este tipo de controlador de polarização utiliza a birrefringência induzida por *stress* para alterar a polarização da luz. Porém, a birrefringência é obtida pela curvatura da fibra acomodada, não pelo efeito de torção. Como o eixo rápido da fibra está no mesmo plano do enrolamento, os vetores de polarização horizontal e vertical serão alterados pela mudança de ângulo das placas. Cada uma das placas atua como lâminas de atraso. A primeira placa atua como lâmina de um quarto de onda, transformando a polarização de entrada em polarização linear. A placa do meio funciona como uma lâmina de atraso de meia onda, permitindo a rotação do estado de polarização linear. A última placa, também atuando como uma lâmina de um quarto de onda, pode transformar o estado linear de polarização em um estado arbitrário de polarização [57, 59, 60, 61].

3.9 Técnicas de Gravação de Redes de Bragg

Algumas das principais técnicas utilizadas para gravação de redes de Bragg são apresentadas a seguir [6, 8], dando-se destaque as técnicas de interferométricas, pois as redes

sensores utilizadas para a realização deste trabalho foram gravadas com um interferômetro de Talbot modificado [12].

3.9.1 Técnica Interferométrica

Nesta técnica podem ser utilizados dois tipos de interferômetros, o interferômetro divisor de amplitude e o interferômetro divisor de frentes de onda. Em ambas as técnicas interferométricas existe a necessidade de se garantir boa estabilidade do conjunto, a fim de garantir que as franjas de interferência permaneçam posicionadas no mesmo local no núcleo da fibra. Diversos fatores podem afetar a gravação, tais como vibrações mecânicas no equipamento de gravação, mudança de temperatura no ambiente e correntes de ar, entre outros.

Desta forma, o interferômetro deve ser montado sobre uma base com boa estabilidade mecânica, principalmente considerando que algumas redes necessitam de tempo de exposição à radiação incidente bastante prolongado.

O interferômetro divisor de amplitude basicamente divide o feixe de radiação ultravioleta em dois outros feixes de igual intensidade os quais são recombinados para formar o padrão de interferência no núcleo da fibra. Normalmente o sistema requer o uso de uma lente cilíndrica para facilitar a focalização.

O período da rede de Bragg é determinado pelo período do padrão de interferência e pelo ângulo entre os dois feixes interferentes. Este período é dado por

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2 \sin \varphi} \quad (3)$$

onde λ_w é o comprimento de onda da radiação utilizada na gravação e φ é a metade do ângulo entre os dois feixes. A condição de Bragg estabelece que no núcleo da fibra o comprimento de onda de ressonância λ_B é dado pela equação (1)

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$

onde n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra e Λ é o período da rede. Então, podemos relacionar o comprimento de onda da radiação utilizada na gravação com o comprimento de onda de Bragg por

$$\lambda_B = \frac{n_{eff} \lambda_w}{\text{sen } \varphi} \quad (4)$$

o que nos leva a concluir que o comprimento de onda de Bragg pode ser variado ou pela mudança do ângulo entre os feixes ou pelo comprimento de onda da radiação de gravação. Isto determina a principal vantagem da técnica interferométrica, que permite a utilização de diversos comprimentos de onda para a gravação, bastando alterar o ângulo entre os feixes.

Os chamados interferômetros divisores de frente de onda, os quais incluem o interferômetro de prisma e o interferômetro de Lloyd, apresentam a nítida vantagem de utilizarem apenas um componente óptico, o espelho de Lloyd ou o prisma. Porém, isto limita o comprimento da rede gravada em função do ângulo entre os feixes e a sintonia da rede também é afetada pelo aumento da diferença entre os caminhos dos dois feixes, ficando limitada pelo comprimento de coerência do laser.

3.9.2 Técnica da Máscara de Fase

Este é um sistema que permite alta reprodutibilidade dos padrões das redes gravadas. Isto incorre na desvantagem de se necessitar de máscaras de fase específicas para cada comprimento de onda de Bragg. A máscara de fase é uma peça de sílica sobre a qual são gravadas ranhuras por processo litográfico através de feixe de elétrons. Essas ranhuras promovem a difração do feixe de laser incidente e sua espessura determina a maximização da difração de primeira ordem e pode minimizar o feixe de ordem zero.

A máscara de fase quase sempre é colocada bem próxima a fibra, para se assegurar que a rede gravada possua o comprimento desejado e também para se obter a máxima variação do índice de refração. Uma possível sintonia da rede de Bragg pode ser obtida através da colocação de uma lente antes da máscara. O controle de tensão mecânica sobre a fibra, bem como o controle de temperatura também podem permitir a sintonia.

O comprimento de onda de Bragg, λ_B é relacionado ao período da máscara de fase Λ_{MF} por [8]

$$\Lambda_{MF} = \frac{N\lambda_B}{n_{eff}} \quad (5)$$

onde $N \geq 1$ é um número inteiro que indica a ordem do período da rede. A técnica de gravação com máscara de fase simplifica o equipamento utilizado, com a vantagem adicional de ser mais estável e menos susceptível a vibrações mecânicas. Outra vantagem de se gravar redes com máscara de fase é que o laser utilizado necessariamente não precisa possuir alta coerência temporal e espacial.

3.9.3 Fabricação Ponto-a-Ponto

Nesta técnica cada linha da rede é gravada individualmente, havendo necessidade de se deslocar a fibra para a gravação das sucessivas linhas, possuindo limitações quanto à gravação de redes com períodos curtos. Outra particularidade desta técnica é que o comprimento e inclinação da rede são independentes, o que permite controle preciso da resposta espectral.

Este método de fabricação de redes permite fácil alteração dos parâmetros da rede (comprimento, passo e resposta espectral). Porém, o equipamento necessário exige precisão submicrométrica e estabilidade. Podem ocorrer erros durante a gravação devido a efeitos térmicos na fibra [2].

3.10 Espectros de Reflexão de Redes de Bragg

De acordo com o que foi descrito na seção 2.4.1, uma rede de Bragg em fibra é uma modulação periódica do índice de refração do núcleo da fibra. Desta forma, uma rede de Bragg permite a reflexão total ou parcial de uma onda eletromagnética incidente. Assim, a condição de Bragg dada pela equação (1) é determinada pela exigência de que a energia e

momento sejam conservados, implicando no fato de que a frequência da radiação incidente seja a mesma da radiação refletida [2].

Quando se trabalha com uma rede de Bragg a refletividade é uma propriedade de interesse ao estudo. Para uma rede de Bragg uniforme, ou seja, uma rede que tem uma modulação de índice com perfil constante, a refletividade R é dada por

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (6)$$

onde l é o comprimento da rede, Ω é o coeficiente de acoplamento, Δk é o vetor de onda com descasamento de fase e s é definido como

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \Delta k^2} \quad (7)$$

Podemos utilizar a equação (6) para ajustar uma envoltória nos pontos experimentais de uma rede de Bragg real com lóbulos laterais a partir de simulação computacional, a fim de adequar o perfil da rede aos propósitos de sua utilização. Um espectro característico é mostrado na figura 7.

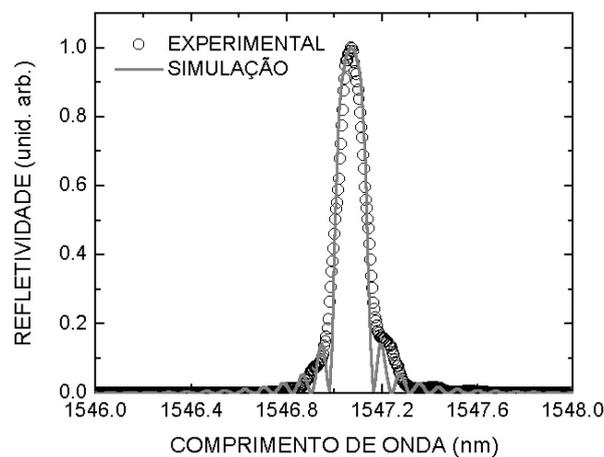


Figura 7 – Espectro de reflexão de uma rede de Bragg

Na figura 7, podemos ver que uma rede de Bragg real possui lóbulos laterais, os quais podem ser eliminados pela técnica de apodização [2, 8]. A apodização é uma técnica de

supressão de lóbulos laterais que é possível em sistemas de gravação a partir de *lasers* de ultravioleta, por meio da variação de amplitude do coeficiente de acoplamento ao longo do comprimento da rede [62]. Em uma rede apodizada, a forma do espectro é ajustada por uma função que engloba os lóbulos laterais, tal como uma gaussiana, tangente hiperbólica, sinc (seno cardinal) ou cosseno aumentado, entre outras [8].

CAPÍTULO 4

Metodologia

Para a realização de medidas quantitativas que realmente comprovassem o funcionamento do circuito óptico proposto como um sistema de sensoriamento operacional, foram necessárias etapas intermediárias que compreenderam a montagem de circuitos parciais que proporcionaram recursos principalmente para análise de acoplamento de potência e estado de polarização da luz das montagens.

Na montagem proposta, a rede sensora uma vez iluminada reflete a luz e ilumina a rede Hi-Bi, que por sua vez ilumina os dois fotodetectores, uma vez que o feixe tenha sido separado pelo polarizador separador de feixe. Dessa forma, uma vez que a rede sensora tenha seus parâmetros variados em função de variação de tensão mecânica ou temperatura, um dos picos da rede Hi-Bi irá se intensificar, pois seu sinal irá se convoluir com o sinal da rede sensora, ao passo que o outro pico deve diminuir sob tais condições.

A idéia principal do sistema de leitura proposto, é que uma vez separados os dois estados de polarização ortogonais da luz refletida pela FBG Hi-Bi em dois feixes distintos, a intensidade da luz correspondente a cada estado de polarização poderá ser medida através de fotodetectores, os quais convertem a intensidade luminosa de um feixe de luz em diferença de potencial elétrica que pode ser medida com auxílio de um amplificador diferencial *Lock-in*.

Assim, uma vez que o circuito óptico tenha sido caracterizado com a utilização de um OSA, pode-se determinar a resposta do sistema e associar à intensidade medida pelos fotodetectores um deslocamento correspondente no comprimento de onda central da rede sensora. Este deslocamento corresponderá a uma variação de tensão elétrica medida no amplificador diferencial *Lock-in*, ou variação na intensidade de potência medida com o OSA. No caso do uso de fotodetectores, a tensão elétrica medida é resultado da conversão da taxa de fótons incidentes no fotodetector em diferença de potencial. Essa variação de tensão que pode ser medida é devida a combinação do sinal proveniente da rede sensora com o sinal da rede Hi-Bi, de maneira proporcional à deformação induzida na rede sensora.

Em condições operacionais, o sistema deverá ser calibrado para estabelecer a relação entre as medidas de intensidade e o deslocamento da rede sensora, porém a proposta do

presente trabalho é apenas demonstrar o princípio através da verificação da relação unívoca entre a razão das tensões elétricas medidas e a posição da rede sensora. Em condições operacionais, dois fotodetectores mediriam simultaneamente as variações de intensidade nos feixes transmitido e refletido e então se poderia estabelecer para qual lado a rede sensora se deslocou em relação ao seu comprimento de onda inicial.

Para a comprovação do princípio de funcionamento do sistema de leitura proposto, foram utilizadas três FBG sensoras. A primeira serviu para testes iniciais com utilização do OSA, sendo uma rede gravada em fibra hidrogenada. Esta rede serviu ainda para fornecer parâmetros para a realização da simulação computacional. A segunda rede foi ensaiada já com a utilização do sistema de fotodeteção, sendo o OSA utilizado para a determinação das posições angulares do parafuso do mecanismo tensor que proporcionavam a maior amplitude do espectro de convolução. Esta rede foi gravada em fibra fotossensível. A terceira rede também foi utilizada com esta técnica para comprovar efetivamente a validade do modelo, sendo igualmente gravada em fibra fotossensível.

4.1 Montagem para Acoplamento de Luz e Medição de Potência

Devido à complexidade do conjunto experimental proposto, torna-se necessário a montagem parcial e progressiva de partes menores do circuito óptico para melhor avaliação dos resultados. A primeira série de testes que foi realizada teve o propósito de verificar a eficiência de acoplamento entre as lentes Grin do Suporte em U para Fibra, que é o equipamento sobre o qual se acomoda o cristal polarizador separador de feixe (PBS). O arranjo experimental utilizado é mostrado na figura 8. O Suporte em U para Fibra utilizado é o modelo FB 221-FC fabricado pela Thorlabs. Este equipamento é dotado de duas lentes Grin alinhadas coaxialmente (LG2 e LG4 na figura 8) para promover a máxima eficiência de acoplamento do feixe através de uma distância de 30 mm. As lentes grin embutidas são propícias à propagação de ondas em 1550 nm. Para testar a eficiência de acoplamento entre as duas lentes do Suporte em U para Fibra foi inicialmente utilizada uma fonte ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) operando a 10 mW de potência. Este modelo de Suporte em U para Fibra possui lentes Grin que operam com feixes de diâmetro de 0,50 mm com perdas por inserção típicas máximas de 0,5 a 1 dB, capazes de operar a larguras de banda

maiores que 40 nm. As potências de entrada e saída para determinar a eficiência de acoplamento foram medidas com um medidor de potência (*Power Meter*) marca Wandel & Goltermann modelo OLP-10.

Após os testes de acoplamento de potência das lentes embutidas no Suporte em U para Fibra, foi iniciado o alinhamento da lente Grin lateral (LG3 na figura 8), a qual seria responsável por coletar o feixe que emerge lateralmente do polarizador separador de feixe. Para estes testes o Suporte em U para Fibra foi inicialmente assentado sobre uma peça de alumínio, confeccionada a partir de uma cantoneira a 90° de duas polegadas de largura (50,8 mm) por um oitavo de polegada de espessura (3,175 mm). Esta cantoneira foi preparada para receber um suporte para lente Grin. Esta peça é uma base de alumínio adequada a fixação da lente. O modelo utilizado é o SM1PT fabricado pela Thorlabs. A cantoneira recebeu elementos para permitir a mobilidade da base para a lente Grin e conseqüentemente, permitir a focalização do feixe refletido pelo polarizador separador de feixe no centro da lente Grin montada lateralmente neste conjunto. Uma vista do conjunto é apresentada na figura 8.

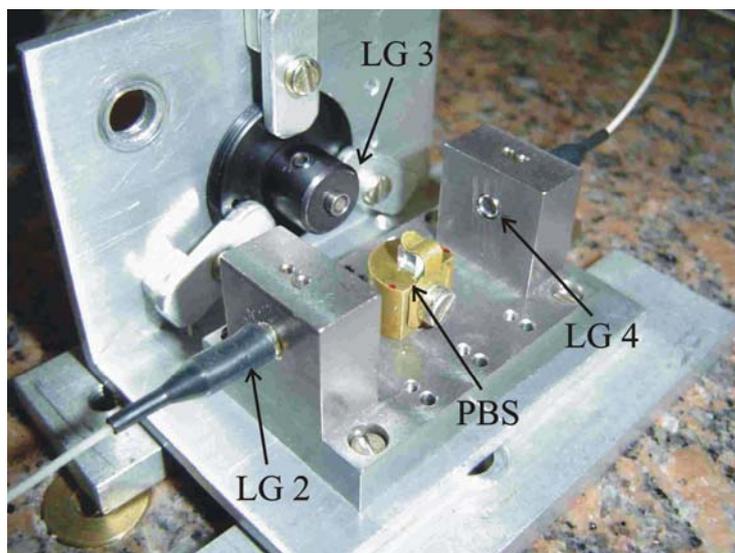


Figura 8 – Montagem do conjunto experimental inicial para alinhamento da lente grin lateral

A fim de colocar o polarizador separador de feixe ajustado adequadamente em altura no interior do Suporte em U para Fibra para que o feixe de luz incidisse exatamente no centro de sua face, foi usinada uma peça de latão de formato cilíndrico com chanfro lateral que permite adicionar um outro elemento que fixa efetivamente o polarizador separador de feixe.

Esta peça assenta perfeitamente na base do Suporte em U para Fibra, sendo fixada por uma porca. Deve-se observar que foi confeccionada em latão porque este material possui

módulo de Young semelhante ao do aço inox, com o qual é construído o Suporte em U para Fibra. A peça cilíndrica tem a função de substituir um componente também fabricado pela Thorlabs, o qual permite a fixação do polarizador separador de feixe na base do Suporte em U para Fibra. Esta peça, especificada no catálogo deste fabricante como *2 mm Filter Mount*, apresentaria para esta montagem o inconveniente de direcionar o feixe refletido para cima, e não para o lado como se desejava. Se o feixe refletido fosse direcionado para cima, como ocorreria no caso de utilização de peças originais da Thorlabs, o dispositivo de alinhamento da lente para focalização do feixe refletido seria tanto mais complexo, razão pela qual se optou pela construção da nova peça.

Esta peça teve que ser usinada com extremo cuidado, principalmente para manter o perfeito esquadramento, para evitar desvios angulares do feixe refletido, pois a lente Grin utilizada lateralmente possui ângulo de aceitação de $0,15^\circ$. Sobre esta peça de latão foi fixada uma pequena lâmina também de latão para fixar o polarizador separador de feixe.

Uma vez montado este arranjo para separar o feixe de luz em dois feixes, um transmitido e outro refletido pelo polarizador separador de feixe, os primeiros testes foram feitos ainda com a fonte ASE e o medidor de potência. Porém, o acoplamento de luz na lente lateral se mostrou insignificante mesmo na melhor medida. Como se verificou que a resposta do medidor de potência era bastante lenta, o movimento da lente no plano em que ela tinha liberdade de transladar não permitia acompanhar adequadamente a resposta do instrumento de medida. Assim, optou-se por montar este conjunto sobre uma mesa preparada para fixação de componentes ópticos, conferindo ao conjunto maior rigidez. Optou-se também por utilizar um OSA marca Anritsu modelo MS 9710B nos testes de alinhamento, pois este aparelho tem uma maior rapidez de resposta se comparado ao medidor de potência.

A fonte utilizada foi um LED superluminescente marca SUPERLUM modelo Pilot 2. Mesmo com melhorias nas condições de estabilidade do conjunto não se obteve bons resultados experimentais. Desta forma, foram feitas tentativas de se localizar o feixe refletido com auxílio de um cartão para detecção de luz infravermelha marca KODAK, capaz de operar na faixa de 700 a 1300 nm. Ainda não se obtendo nenhum acoplamento de luz mensurável no OSA, optou-se pela tentativa de alinhamento com luz vermelha de 632,8 nm proveniente de um laser de hélio-neônio marca UNIPHASE modelo 1135P. A fim de acoplar a luz deste laser na entrada do Suporte em U para Fibra, seu feixe foi direcionado para uma outra lente Grin, a qual foi conectada à entrada do Suporte em U para Fibra por um adaptador de conectores FC-PC. O diagrama esquemático desta montagem é apresentado na figura 9.

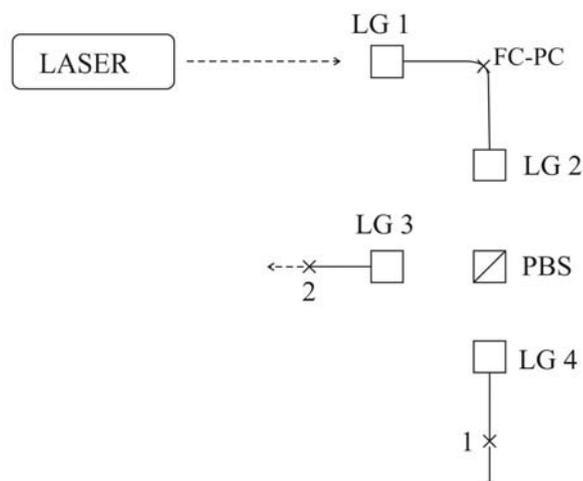


Figura 9 – Esquema de entrada da luz do laser no Suporte em U para Fibra e divisão pelo PBS

Verificou-se visualmente na fibra que coleta a luz transmitida pelo polarizador separador de feixe um bom acoplamento de luz, sendo possível projetá-la em um anteparo. Mesmo em condições de um suposto bom alinhamento, sob avaliação visual, a fibra que coletava a luz refletida mostrava intensidade muito fraca até mesmo depois de se fazer o melhor ajuste com os parafusos. Deve-se ressaltar que ambas as fibras que coletavam a luz separada pelo polarizador separador de feixe eram dotadas de conectores FC-PC na extremidade oposta à que continha a lente. Desta forma, era razoável supor que a intensidade de luz observável deveria ser aproximadamente igual nas duas pontas.

Uma nova peça foi construída para acoplar o Suporte em U para Fibras e o suporte para lente Grin que fixava a lente lateral, sendo que esta peça conferia ao sistema um melhor mecanismo de manuseio do suporte desta lente, permitindo o movimento do mesmo no plano através de dois parafusos, com deslocamento vertical e horizontal. O alinhamento e esquadreamento da peça foram melhorados, pois esta foi confeccionada em uma fresadora a partir de um bloco de latão maciço. Porém, mesmo esta peça não implicou em melhores resultados nas medidas. Optou-se então por montar a lente Grin lateral sobre uma peça que permite dois graus de liberdade angulares em relação ao feixe refletido emergente do polarizador separador de feixe. Estes dois graus de liberdade angulares são necessários e suficientes para garantir o alinhamento, pois os dois graus de liberdade que a lente tem no plano da peça não permitem a correção de desvios angulares do feixe em relação ao eixo axial da lente Grin. Embora a peça utilizada não possua parafusos de ajuste micrométrico, esperava-se melhora significativa do alinhamento, o que não ocorreu. Somente após a remoção de uma pequena porção de fita de teflon que protegia o polarizador separador de

feixe, foi possível o alinhamento, verificando-se visualmente intensidade aproximadamente igual da luz emergente nos dois ramos do circuito óptico, ou seja, na fibra correspondente ao feixe refletido e na fibra correspondente ao feixe transmitido.

O sistema pode então ser avaliado novamente com o uso do LED e do OSA, tomando-se o cuidado de otimizar o alinhamento através dos parafusos de regulagem para corrigir os efeitos de dispersão devido ao material do polarizador separador de feixe, pois o alinhamento foi feito com luz vermelha, e o LED opera no infravermelho. Por melhor que fosse o ajuste, não foi possível obter intensidades exatamente iguais nos ramos correspondentes ao feixe transmitido e refletido. Isto na verdade não representou nenhum problema para a proposta do trabalho, uma vez que a idéia central era verificar se a razão entre as intensidades dos picos transmitido e refletido traçada contra as posições da rede sensora apresentava uma relação unívoca. Obtidos estes resultados experimentais, procedeu-se à montagem de um novo circuito óptico para verificar a separação dos picos da rede Hi-Bi com o uso do polarizador separador de feixe. O arranjo experimental com quatro graus de liberdade, dois angulares e dois cartesianos é mostrado na figura 10.



Figura 10 – Montagem final utilizada para permitir o melhor alinhamento e acoplamento de luz na lente sobre a qual é projetado o feixe refletido pelo polarizador separador de feixe

4.2 Montagem para Análise do Espectro da Rede Hi-Bi

Conforme descrito na fundamentação teórica, uma rede Hi-Bi tem dois picos característicos correspondentes aos dois estados de polarização da luz ortogonais entre si. O polarizador separador de feixe utilizado deveria ser capaz de separar cada um dos picos associados aos estados de polarização e associá-los aos feixes de luz transmitido e refletido. Foram realizadas medidas com o arranjo experimental mostrado na figura 11 para verificar se isto realmente ocorria. Observou-se que necessariamente a separação não ocorreu de forma tão simples. Foi necessária a introdução de um controlador de polarização na porta três do circulador mostrado na figura 11. Com este componente foi possível buscar a melhor razão de extinção para cada um dos braços do circuito. Embora a suposição de que se em um determinado braço do circuito se tivesse obtido a melhor razão de extinção, no outro braço o pico correspondente também deveria estar otimizado, isso não ocorreu na prática. A melhor razão de extinção no braço de luz refletida não implicou necessariamente em melhor razão de extinção no braço correspondente à luz transmitida para um mesmo ajuste do controlador de polarização. Assim, houve necessidade de se fazer diversas análises dos espectros antes de se proceder a uma medida efetiva para registro.

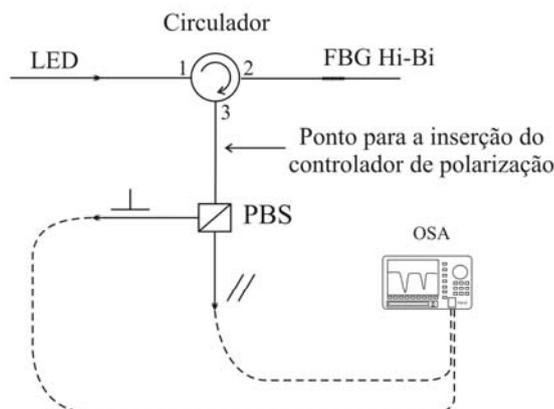


Figura 11 – Circuito óptico para verificar a separação dos picos da rede Hi-Bi

Nesta ocasião também se observou que a simples mudança na posição dos cabos alterava significativamente o espectro mostrado pelo OSA. Desta forma, foi necessário manter os componentes nas mesmas posições e fixar-se os cabos na bancada de trabalho para prosseguir o ensaio.

4.3 Montagem para Análise do Espectro da Rede Sensora Sobreposto ao da Rede Hi-Bi

Uma vez definido qual estado de polarização correspondia a qual feixe emergente do polarizador separador de feixe procedeu-se à montagem de um arranjo experimental intermediário para verificar o comportamento da rede sensora sobreposta à rede Hi-Bi. Este arranjo é mostrado na figura 12.

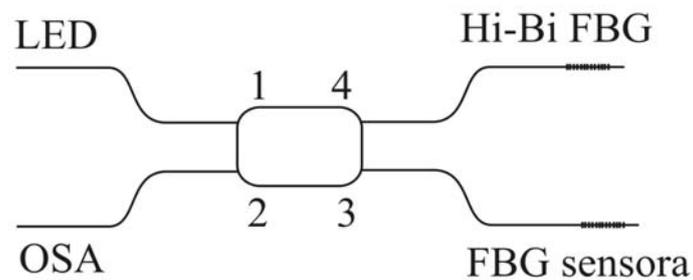


Figura 12 – Circuito óptico para realizar os ensaios de sobreposição dos picos

Para a realização deste ensaio, a rede sensora foi colada sobre uma lâmina metálica curvada, cujo raio de curvatura era controlado sob a ação de um parafuso micrométrico, promovendo o tensionamento da rede. O mecanismo utilizado é mostrado na figura 13.

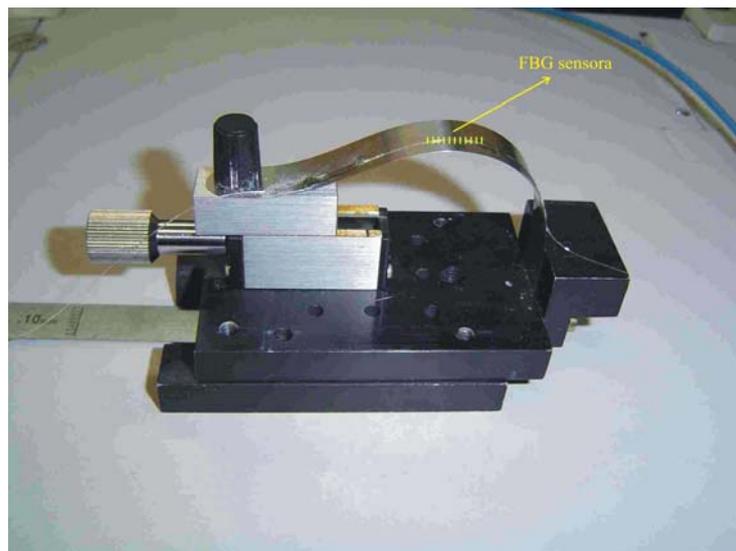


Figura 13 – Mecanismo utilizado para tensionar a rede sensora

Assim, pode-se relacionar o comprimento de onda de Bragg central com a posição angular do parafuso, ou número de voltas do parafuso tensor, como se convencionou dizer. Com o mesmo equipamento pode ser traçado um gráfico para analisar o comportamento da rede sob tensão e verificar o grau de linearidade da resposta.

O ensaio foi realizado registrando-se o espectro das duas redes simultaneamente no OSA, com a rede sensora se deslocando desde sua posição mais relaxada até a posição angular final do parafuso, que lhe causava máxima tensão.

Com isto, a rede sensora inicialmente posicionada razoavelmente distante dos lóbulos da Hi-Bi varreu toda a largura da mesma, sendo possível a visualização das convoluções entre a rede sensora e cada lóbulo da Hi-Bi. Para coletar os dados que foram utilizados na simulação computacional, a varredura foi realizada girando-se o parafuso tensor um quarto de volta cada vez e registrando-se os espectros. Os dados colhidos também serviram para fornecer outros parâmetros necessários à realização de simulações computacionais, tais como largura de banda das redes e suas áreas.

4.4 Montagem do Conjunto Experimental Completo

Uma vez realizado o ensaio para verificar a posição do comprimento de onda de Bragg central da rede sensora, procedeu-se à montagem do arranjo experimental completo, que efetivamente permite avaliar se o sistema proposto permite a interrogação da rede associando a variação da tensão mecânica sobre a rede com variações de intensidade de reflexão. Embora as montagens das configurações experimentais anteriores tenham tido como propósito determinar a melhor razão de extinção para os estados de polarização em função da reflexão ou transmissão pelo polarizador separador de feixe, a introdução de outros componentes inevitavelmente alterou o estado de polarização da luz no conjunto experimental. Foi necessário então determinar novamente a melhor razão de extinção para os feixes transmitido e refletido, observando-se novamente que o melhor ajuste para um dos ramos necessariamente não correspondia ao melhor ajuste no outro ramo. Todo o procedimento de controle de estados de polarização e ajuste de razão de extinção foi novamente necessário. O diagrama esquemático do circuito óptico completo é mostrado na figura 14.

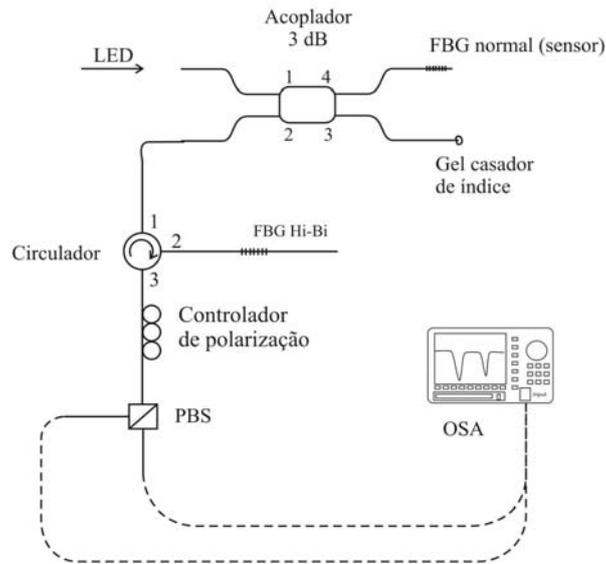


Figura 14 – Montagem experimental completa para mostrar o princípio de operação do sensor proposto

Pela análise do circuito óptico vemos que a luz lançada na rede sensora é refletida e direcionada para a rede Hi-Bi. Desta forma, uma rede sensora cujo comprimento de onda de Bragg central seja sintonizado com os comprimentos de onda dos lóbulos da rede Hi-Bi vai causar variações de intensidade luminosa nos detectores posicionados nas saídas do polarizador separador de feixe mostrado no diagrama, quando a rede sensora sofrer variações positivas de temperatura ou tensão. A variação da intensidade luminosa ocorre devido à sintonia da rede sensora com cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi, convoluindo o sinal das duas redes. O circuito óptico mostrado na figura 12 possibilitou verificar a convolução através do espectro registrado no OSA, quando a rede sensora sob tensão mecânica varreu toda a faixa de comprimentos de onda entre os dois lóbulos da rede Hi-Bi sobrepondo-se a cada um dos dois picos. A sintonia é feita submetendo-se a rede sensora à tensão mecânica com o mecanismo mostrado na figura 13. Desta forma, com a montagem completa mostrada na figura 14, é possível analisar separadamente o efeito da convolução da rede sensora com cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi. Embora os testes iniciais tenham sido feitos utilizando-se o OSA como instrumento de medida de intensidade, a coleta de dados pode ser feita com utilização de fotodetectores. Neste caso, assumimos que a leitura em tensão obtida é proporcional à área abaixo da curva do espectro, levando-nos a concluir que à medida que a rede é tensionada mecanicamente, a tensão elétrica no fotodetector deve variar. Como a varredura com o mecanismo tensor é realizada sobre todo o espectro da rede Hi-Bi, a intensidade medida na saída do polarizador separador de feixe deve variar no ramo

correspondente ao estado de polarização do lóbulo da Hi-Bi ao qual a rede sensora está se sobrepondo. Para uma variação positiva no comprimento de onda da rede sensora quando esta se encontra entre os dois lóbulos da rede Hi-Bi, a intensidade resultante de superposição com o lóbulo esquerdo (de menor comprimento de onda) deve diminuir. De forma análoga, a intensidade resultante de superposição com o lóbulo direito (de maior comprimento de onda) vai aumentar, resultando numa dada relação de razão entre as intensidades medidas e a grandeza sendo medida (neste caso, tensão mecânica).

Como descrito anteriormente, a proposta do trabalho é coletar dados pra verificar se a razão entre as intensidades do feixe transmitido e refletido pelo polarizador separador de feixe define uma relação unívoca para cada posição angular do parafuso. Isto foi feito relaxando-se totalmente a rede sensora e tensionando-a sob a ação do parafuso micrométrico e coletando-se os espectros no OSA para gerar gráficos com o *software* ORIGIN™. Inicialmente a varredura foi feita no braço do circuito correspondente ao feixe transmitido e depois novamente relaxando a rede a coleta de dados foi feita no braço correspondente ao feixe refletido. Com a configuração apresentada na figura 14 a varredura e coleta de dados foram feitas a cada um oitavo de volta no parafuso tensor. A figura 15 mostra a direção do deslocamento da rede sensora em função da posição angular do parafuso tensor.

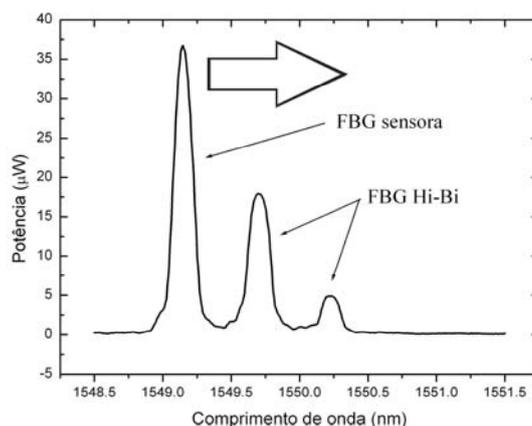


Figura 15 – Ilustração do deslocamento da rede sensora

O anexo A mostra o efeito da sobreposição da rede sensora com a rede Hi-Bi para cada posição do parafuso tensor, com um incremento de um quarto de volta. Os espectros mostrados foram colhidos com a montagem experimental mostrada na figura 12.

4.5 Sistema para Medidas com Fotodetector

Para comprovar efetivamente que a técnica de leitura em intensidade é válida e é possível eliminar a utilização do OSA para realizar a medição, foram realizadas medidas com o uso de fotodetectores. A fim de se obter gráficos mais completos de razão entre as intensidades contra posição angular, foram utilizadas duas novas redes sensoras, que foram coladas no mecanismo tensor em outra posição para favorecer a completa transposição dos dois picos da rede Hi-Bi. Foi utilizado um conjunto experimental semelhante ao mostrado na figura 14, com a diferença de que foram trocadas as posições do acoplador e do circulador. O arranjo experimental utilizado é mostrado na figura 16.

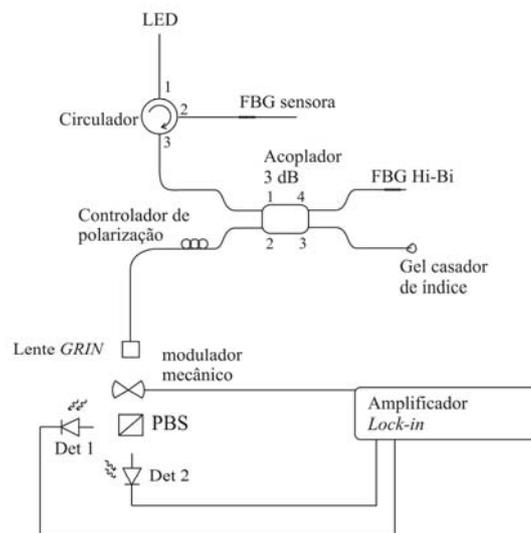


Figura 16 – Arranjo experimental utilizado para realizar medidas com o uso de fotodetectores

Esta modificação foi feita para melhor aproveitamento da potência da luz proveniente do LED ao incidir sobre a rede sensora, uma vez que o acoplador é um circuito óptico que divide o sinal em intensidades iguais, e conforme sugere a figura 14, 50% da potência acaba por ser perdida sem incidir sobre a rede sensora. Com o uso do circulador naquela posição, apenas pequenas perdas por inserção são observadas, e a rede sensora pode iluminar a rede Hi-Bi com maior intensidade, resultando em maior amplitude do espectro na convolução.

Devido à necessidade de se utilizar um amplificador diferencial *Lock-In* para realizar as medições de intensidade com o fotodetector, o Suporte em U para Fibra foi removido, pois foi necessária a adição de um modulador mecânico (*Chopper*) para modular a luz do LED.

Este modulador foi ajustado para trabalhar com uma frequência de 37 Hz. O amplificador Lock-In foi ajustado para trabalhar com uma constante de tempo de 100 ms. Um suporte para lente Grin foi colado com fita dupla face no próprio modulador, permitindo que uma lente Grin promovesse a incidência da luz no polarizador separador de feixe. O polarizador separador de feixe foi instalado no lado oposto do modulador com auxílio de uma peça confeccionada a partir de uma cantoneira de alumínio. A fixação do polarizador separador de feixe e da lente Grin no modulador mecânico é mostrada na figura 17.

Antes de se proceder as medidas com o sistema de fotodeteccção, com o auxílio do OSA foram determinadas as posições angulares do parafuso tensor nas quais a amplitude do espectro é máxima devido a convolução entre o sinal da rede sensora e cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi. A primeira rede cujos ensaios foram realizados com o sistema de fotodeteccção mostrado na figura 16 exhibe valores de pico na convolução com os lóbulos da rede Hi-Bi a três quartos de volta e a uma volta e meia no parafuso tensor, tendo sido o primeiro pico associado ao feixe transmitido e o segundo pico associado ao feixe refletido. Esta associação é feita por meio do ajuste adequado do estado de polarização da luz com o uso do controlador de polarização. A aquisição dos dados foi feita através de leitura direta no mostrador do amplificador diferencial Lock-In. O aparelho utilizado foi o modelo SR 830 DSP da Stanford Research Systems. O avanço no parafuso tensor foi feito com variação angular de um oitavo de volta.

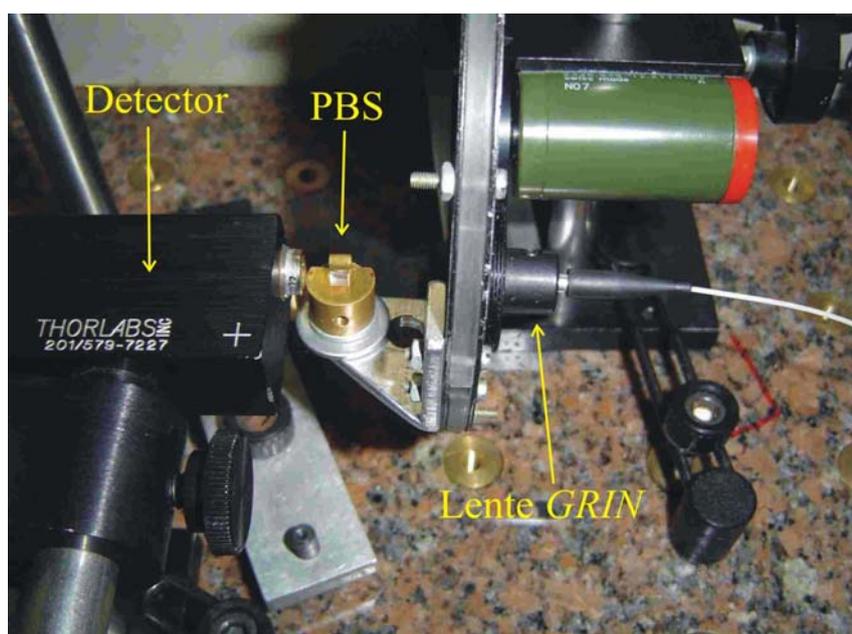


Figura 17 – Fixação do polarizador separador de feixe no modulador mecânico

A segunda rede exibe os valores de pico na convolução com a rede Hi-Bi a duas voltas e três quartos e a quatro voltas e um oitavo no parafuso tensor, sendo os picos associados aos feixes transmitido e refletido de maneira análoga à primeira rede utilizada com o sistema de fotodeteção. As duas redes não apresentavam resposta similar ao deslocamento angular do parafuso em função das posições em que foram coladas no dispositivo tensor. Com esta rede, foi utilizado o programa Sist40, desenvolvido no laboratório de Laser da UTFPR que propicia recursos para a aquisição de dados com o amplificador *Lock-In* acoplado a um computador. O programa foi utilizado para permitir a leitura no display através de médias, tendo sido adotado o número de médias igual a dez.

Embora a determinação da posição dos picos tenha sido realizada com o OSA, ao incidir o feixe de luz no polarizador separador de feixe para se proceder a leitura com o fotodetector, tornou-se necessário buscar uma nova razão de extinção com o uso deste novo elemento de leitura, pois a inserção da fibra com a lente Grin mostrada na figura 17 altera o estado de polarização na montagem. A nova melhor razão de extinção foi obtida maximizando-se a leitura em tensão elétrica no feixe transmitido, com o parafuso tensor posicionado de modo a permitir a maior amplitude do espectro na posição correspondente ao lóbulo da esquerda (de menor comprimento de onda) da rede Hi-Bi, o que foi feito posicionando-se o parafuso tensor nas posições pré-estabelecidas com a utilização do OSA. O parafuso tensor foi então relaxado e a varredura foi realizada, inicialmente para o feixe transmitido até duas voltas e um quarto. O fotodetector foi mudado para a posição lateral, a fim de captar o feixe refletido e o melhor alinhamento do fotodetector foi obtido maximizando-se novamente a leitura de tensão no amplificador diferencial *Lock-In*, para a posição angular do parafuso que corresponde ao pico da direita da rede Hi-Bi, que corresponde ao feixe refletido, sem que se alterasse a polarização do conjunto com o controlador de polarização.

Uma vez coletados os valores de tensão, foi traçado o gráfico de razão entre as tensões medidas no amplificador *Lock-In* correspondentes aos feixes transmitido e refletido contra a posição angular do parafuso, para comparação com os resultados obtidos pelas simulações computacionais e pela medida de intensidade com o OSA, feita com a primeira rede ensaiada. Os valores registrados foram obtidos com o fotodetector posicionado a cerca de 6 mm da face do polarizador separador de feixe. O avanço no parafuso tensor foi feito com variação angular de um oitavo de volta.

4.6 Simulações Computacionais

A validade de um modelo teórico pode eventualmente ser verificada através de simulações computacionais. A fim de verificar o funcionamento do sensor proposto, foram realizadas simulações para prever o comportamento das redes sensora e Hi-Bi durante a varredura realizada com a rede sob tensão mecânica, na montagem experimental mostrada na figura 12. Estas simulações tiveram como propósito principal verificar o comportamento do espectro quando a rede sensora se sobrepõe a cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi, e a coleta das áreas sob as curvas dos espectros dos feixes transmitido e refletido. Foram utilizados três modelos de ajuste para as curvas que representam o espectro da luz. O modelo de ajuste gaussiano e o modelo de ajuste lorentziano são definidos pelo próprio ORIGIN. O modelo de ajuste que foi feito através da multiplicação de duas gaussianas, teve que ser definido e acrescentado ao programa. Para todos os tipos de ajuste utilizados, os passos realizados na simulação foram os mesmos.

O primeiro passo consiste em gerar os gráficos correspondentes aos espectros de cada uma das posições angulares do parafuso, a partir dos dados em formato .txt provenientes do OSA. Assim, ao todo, devem ser gerados vinte e dois gráficos, correspondentes aos avanços a cada quarto de volta do parafuso micrométrico.

Sobre estes gráficos deve ser feito o ajuste das curvas que representam o modelo escolhido, por exemplo, gaussiano. Isto é feito utilizando-se a função *Fit Multi Peaks* do ORIGIN, e ajustando-se três curvas, uma para cada lóbulo do espectro.

Após o ajuste das curvas sobre os espectros, deve-se coletar os seguintes dados: do primeiro arquivo, que corresponde à posição da rede sensora relativa ao seu relaxamento total, deve-se coletar as áreas dos três picos (A_1 , A_2 , A_3), a largura dos três picos (w_1 , w_2 , w_3) e a posição do comprimento de onda central dos dois lóbulos da rede Hi-Bi (x_{c2} , x_{c3}). Estes serão os parâmetros fixos da simulação, ou seja, os dados representativos do fato de que a rede Hi-Bi estará sempre na mesma posição, para fins de simulação. Deve-se coletar também o comprimento de onda central da rede sensora (x_{c1}) do primeiro arquivo. Para os demais arquivos, deve-se coletar apenas o comprimento de onda central da rede sensora, ajustado pelo modelo de curva escolhido, o que na simulação representará o avanço da rede em função da posição angular do parafuso.

De posse destes dados, passamos ao melhor ajuste da posição da rede sensora, o que é feito utilizando-se a função *Non Linear Curve Fitting*. Esta função permite definirmos os

parâmetros que desejamos que sejam fixos na simulação, no caso, área e largura dos três picos do espectro e posição central dos dois lóbulos da rede Hi-Bi. Devem então ser feitas tantas iterações quantas necessárias a fim de minimizar a função qui-quadrado, quando temos certeza de que o melhor ajuste foi obtido para a posição central da rede sensora, para cada um dos vinte e dois arquivos. A função qui-quadrado é resultado de um teste de significância que permite determinar a qualidade do ajuste de uma curva $y = y(x)$ a um conjunto de dados experimentais do tipo $\{x_i, y_i\}$ [63]. As iterações foram feitas programando-se o a função *Non Linear Curve Fitting* do ORIGIN para deixar apenas a variável x_{ci} sofrer ajuste.

O passo seguinte consiste em criar uma planilha no ORIGIN, que irá possibilitar gerar as curvas correspondentes aos espectros que se pretende simular. Esta planilha é representada na tabela 1, para o modelo gaussiano. Construindo-se esta planilha no ORIGIN, para cada um dos vinte e dois arquivos estaremos determinando a posição da rede sensora e da rede Hi-Bi em função da posição angular do parafuso. As colunas Sensora x Transmitida e Sensora x Refletida irão fornecer o resultado da multiplicação ponto a ponto dos espectros da rede sensora e da rede Hi-Bi, que é o que efetivamente se deseja determinar. As áreas abaixo destas curvas são os dados de interesse para verificar o modelo teórico proposto para este tipo de sensor, pois se deve analisar o comportamento da curva determinada pela razão entre as áreas abaixo dos espectros correspondentes a luz transmitida e refletida contra posições angulares do parafuso, num gráfico que contenha os pontos da varredura correspondentes à superposição das redes. Como a posição central da rede sensora totalmente relaxada está relativamente distante do primeiro lóbulo da rede Hi-bi, a resposta desejada, ou seja, a convolução dos dois espectros começa a ser observado apenas após quatro voltas e meia do parafuso do mecanismo tensor.

Para coletar as áreas abaixo das curvas faz-se novamente o ajuste de uma curva do modelo escolhido sobre o espectro simulado com o modelo escolhido e a área é calculada pelo ORIGIN por integração. Deve-se então coletar as áreas correspondentes aos gráficos gerados pelo produto Sensora x Transmitida e Sensora x Refletida dos vinte e dois gráficos e fazer a razão. Finalmente, as razões são traçadas contra as posições angulares do parafuso tensor e o gráfico desejado é obtido. Os gráficos resultantes dos três modelos de ajuste foram então comparados com os gráficos experimentais.

O primeiro gráfico de razões entre intensidade transmitida e refletida foi gerado a partir dos dados experimentais com ajuste gaussiano. Foi realizada então a simulação com ajuste gaussiano. A seguir procedeu-se a construção do gráfico a partir dos dados

experimentais com ajuste lorentziano e em seqüência o mesmo ajuste para os dados da simulação. Como houve discrepâncias entre resultados experimentais e simulados para o modelo gaussiano, optou-se pela tentativa de se ajustar as curvas resultantes do produto Sensora x Transmitida e Sensora x Refletida pelo modelo gaussiana x gaussiana.

TABELA – 1 Representação das planilhas utilizadas para cada um dos 22 arquivos da simulação, correspondentes às posições angulares do parafuso tensor.

Coluna λ	Gaussiana transmitida	Gaussiana refletida	Gaussiana sensora	Sensora x Transmitida	Sensora x Refletida
Nesta coluna são inseridos os valores de comprimento de onda em arquivos .txt provenientes do OSA	Nesta coluna define-se uma equação gaussiana com os parâmetros do lóbulo da Hi-Bi correspondente à luz transmitida (fixos em toda a simulação)	Nesta coluna define-se uma equação gaussiana com os parâmetros do lóbulo da Hi-Bi correspondente à luz refletida (fixos em toda a simulação)	Nesta coluna define-se uma equação gaussiana com os parâmetros do lóbulo da rede sensora, variando-se X_{c1} para cada um dos 22 arquivos	Nesta coluna define-se o produto das colunas Gaussiana transmitida e Gaussiana sensora	Nesta coluna define-se o produto das colunas Gaussiana refletida e Gaussiana sensora

4.6.1 Estudo da Influência da Largura de Banda da Rede Sensora nas Simulações

Para se determinar a sensibilidade do sistema de leitura em função da largura de banda da rede sensora, variou-se a largura de banda desta rede nas simulações. O modelo utilizado foi gaussiano. Aproveitando-se os comprimentos de onda central da rede sensora colhidos com a montagem experimental mostrada na figura 12, foram substituídos nas planilhas de simulação no ORIGIN, representadas na tabela 1, novos valores de largura de banda, de 0,06 nm a 0,18 nm, com variação de incremento de 0,02 nm. Assim, resultaram espectros com áreas diferentes para o produto da rede sensora com cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi. Desta forma, todo o procedimento de coleta de áreas foi refeito para conjuntos de dez gráficos correspondentes às posições da rede sensora no intervalo de interesse, entre os dois lóbulos da rede Hi-Bi. Este procedimento teve que ser feito para cada largura de banda. Sete novos gráficos de razão entre as áreas coletadas foram construídos, para se proceder a análise.

Como a rede sensora teve sua largura de banda variada, ao se definir este parâmetro na coluna do ORIGIN relativa aos dados desta rede, teve-se que tomar o cuidado de alterar também a área abaixo da curva que representa a rede, a fim de tornar a sua refletividade de pico constante nas simulações. A partir da equação gaussiana

$$y = y_0 + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-2(x-x_c)^2/\omega^2} \quad (8)$$

na qual y_0 representa o *offset*, A representa a área abaixo do espectro, ω representa a largura de banda da rede, x representa os valores de comprimento de onda resultantes da excursão da rede sensora sobre a rede Hi-Bi (coluna λ na tabela 1) e x_c representa os valores de comprimento de onda central da rede sensora para as posições do parafuso tensor nas quais foram coletados os dados, define-se então uma razão R , entre a área e a largura de banda

$$R = \frac{A}{\omega} \quad (9)$$

e portanto a nova área utilizada para cada nova largura de banda será calculada por

$$A = R\omega \quad (10)$$

Com os valores colhidos para a rede utilizada na simulação, $\omega_s = 0.125$ nm e $A_s = 6,189 \times 10^{-6}$ W, a razão a ser utilizada é então $4,94 \times 10^{-5}$ W/nm.

Uma vez traçados os gráficos de razão entre as áreas contra as posições do parafuso tensor, o próximo passo é ajustar em cada gráfico retas nas regiões da curva que são aproximadamente lineares. Em cada curva, são ajustadas duas retas, que representam as regiões de baixa e alta sensibilidade de resposta. Na região de alta sensibilidade, foram utilizados três pontos da curva, os quais descrevem aproximadamente uma reta. Na região de baixa sensibilidade, para o ajuste das retas foram utilizados quatro pontos, sendo, porém desconsiderado o último ponto do gráfico, pois neste ponto a rede sensora já havia transposto o comprimento de onda central do lóbulo de maior comprimento de onda da rede Hi-Bi, sendo, portanto uma região que não interessa aos propósitos deste estudo.

Depois de ajustadas as retas nas curvas de razão entre as intensidades, foram coletados os coeficientes angulares correspondentes a cada uma das regiões (alta ou baixa sensibilidade) e com estes coeficientes foram traçados gráficos com estes dados no eixo das ordenadas e as larguras de banda no eixo das abscissas. Estes gráficos exibem então a sensibilidade do sistema de leitura em função da largura de banda.

Os resultados experimentais e simulados são apresentados no capítulo 5, onde se mostra os espectros coletados nas diversas etapas da montagem do circuito óptico completo e também das diversas etapas da simulação. Finalmente são apresentados os gráficos resultantes das medidas de tensão elétrica, os quais finalmente comprovam a validade do sistema de leitura proposto.

CAPÍTULO 5

Resultados

5.1 Medidas de Potência nas Lentes do Suporte em U para Fibra

Os testes iniciais visaram a medição da potência da luz acoplada entre as lentes Grin do Suporte em U para Fibra. Embora no início dos testes não se tenha conseguido alinhar a lente Grin lateral, os valores foram registrados com a utilização do medidor de potência. Os valores registrados na tabela 2 referem-se aos melhores valores obtidos em uma série de medidas, onde se deslocava a lente lateral (LG3) no plano perpendicular à incidência do feixe. As medidas foram realizadas com o conjunto mostrado na figura 8, sendo que a luz proveniente da ASE foi acoplada à fibra de uma das lentes solidárias (LG2) ao Suporte em U para Fibra, para verificar o acoplamento em transmissão e em reflexão.

Tabela 2 – Medidas de potência dos feixes transmitido e refletido pelo polarizador separador de feixe.

Potência da fonte ASE (mW)	LG4 – feixe transmitido (mW)	LG3 – feixe refletido (mW)
7,415	2,343	0,001
9,105	2,424	0,001

Como os valores medidos na lente lateral (feixe refletido) foram muito diferentes dos valores medidos na lente que coleta o feixe transmitido, foram feitas novas medidas. Antes, porém, tomou-se o cuidado de se retirar o polarizador separador de feixe do interior do Suporte em U para Fibra para medição do acoplamento direto entre as duas lentes deste equipamento. Uma vez feita a verificação do acoplamento direto, sendo constatado que o acoplamento era eficiente, o polarizador separador de feixe foi novamente colocado neste equipamento e novas medidas foram realizadas em transmissão e reflexão. Os valores registrados para o acoplamento na lente lateral possivelmente se devem à luminosidade ambiente, e não a acoplamento da luz da ASE. Novamente as medidas registradas correspondem aos melhores valores obtidos. Estes valores são mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Nova série de medidas para avaliar o acoplamento de luz nas lentes Grin

Potência da fonte ASE (mW)	Acoplamento direto entre lentes do suporte em “U” para a fibra (mW)	LG4 – feixe transmitido (mW)	LG3 – feixe refletido (nW)
6,500	2,841	1,424	9,000
6,500	2,841	1,464	6,000
9,365	6,838	3,498	26,000

Nesta série de medidas o melhor valor obtido para o acoplamento de luz na lente lateral ocorreu quando o polarizador separador de feixe foi girado levemente em relação à linha axial entre as duas lentes do Suporte em U para Fibra. Desta forma, começou-se a observar a dependência angular do sistema. A nova peça utilizada para acoplar o suporte em U para Fibra e a base para lente Grin que recebe a lente lateral foi construída com observação de critérios mais rigorosos, e novas medidas para tentativa de acoplamento na lente lateral foram feitas, porém utilizando-se um OSA e um LED. Boas relações de acoplamento de luz foram observadas na lente que capta a luz transmitida, porém nenhum sinal significativo foi observado na lente lateral. Observou-se também que com o uso do LED a montagem começou a ficar susceptível ao posicionamento dos cabos, os quais poderiam alterar o estado de polarização na montagem.

Finalmente após a montagem do Suporte em U para Fibra sobre a mesa para fixação de componentes ópticos e com auxílio do sistema que permite os dois graus de liberdade angulares além dos dois graus de liberdade cartesianos (figura 10), foi possível um alinhamento razoável, que permitiu acoplamento de luz suficiente para ser medido no OSA. Os espectros correspondentes à luz transmitida e refletida pelo polarizador separador de feixe são mostrados nas figuras 18 e 19 respectivamente.

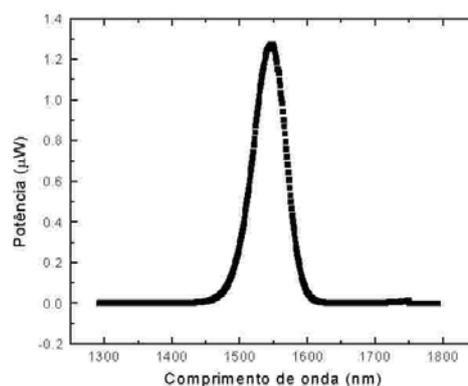


Figura 18 – Espectro correspondente à luz transmitida pelo polarizador separador de feixe

Estes espectros mostram que a divisão de intensidade da luz proveniente do LED pelo polarizador separador de feixe não foi otimizada com esta montagem, pois a potência de transmissão ficou cerca de três vezes maior que a de reflexão.

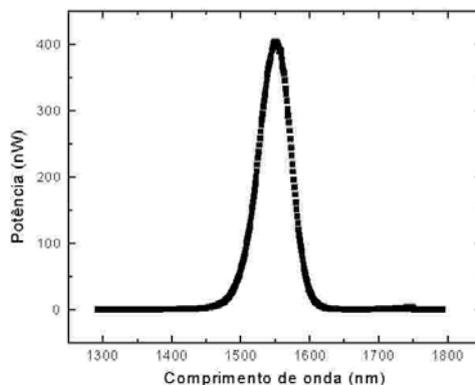


Figura 19 - Espectro correspondente à luz refletida pelo polarizador separador de feixe

Os espectros mostrados são a melhor medida obtida, porém não representam um dado significativo para a montagem do arranjo experimental completo mostrado na figura 14, pois como foi mencionado anteriormente, à medida que se introduz novos componentes no circuito óptico, os estados de polarização dos feixes transmitido e refletido podem ser alterados pela inserção de outros cabos ópticos na montagem. Além disto, a adição de novos componentes ao circuito óptico causa atenuações de potência. Este ensaio teve o propósito apenas de garantir que o melhor alinhamento da lente lateral fosse obtido. Pela comparação dos espectros vemos que a diferença entre a potência do feixe transmitido e a potência do feixe refletido é bastante pronunciada, mesmo sob condição de melhor alinhamento, porém como se pretendia trabalhar com as razões entre as intensidades dos feixes, isto não representou necessariamente um empecilho. Outro passo intermediário foi necessário antes de se proceder à montagem completa. Foi necessário analisar o espectro da rede Hi-Bi e determinar a melhor razão de extinção para os picos da mesma.

5.2 Espectros da Rede Hi-Bi

Uma vez garantido um alinhamento razoável da lente Grin lateral, que possibilitasse uma intensidade de luz mensurável, procedeu-se os ensaios para controle de polarização da luz que entrava no Suporte em U para Fibra. Utilizando-se a montagem experimental

mostrada na figura 11, com a adição do controlador de polarização na porta três do circulador, procurou-se a melhor razão de extinção inicialmente para o feixe de luz transmitido, cujo espectro é mostrado na figura 20.

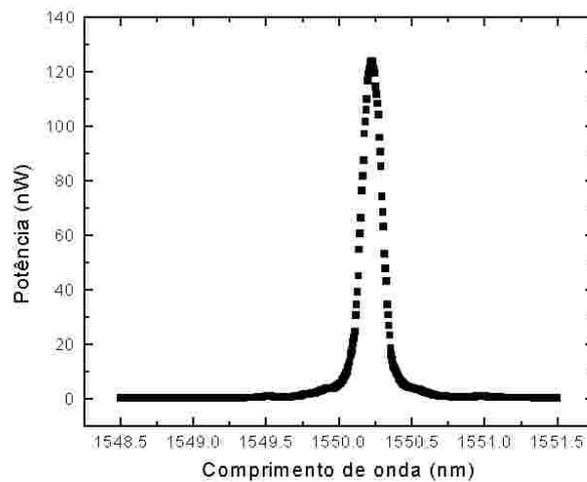


Figura 20 – Espectro correspondente ao feixe de luz transmitido, com a melhor razão de extinção

A seguir, coletou-se no OSA o espectro correspondente ao feixe de luz refletido, cujo espectro é mostrado na figura 21, sem que se alterasse o estado de polarização com o controlador de polarização.

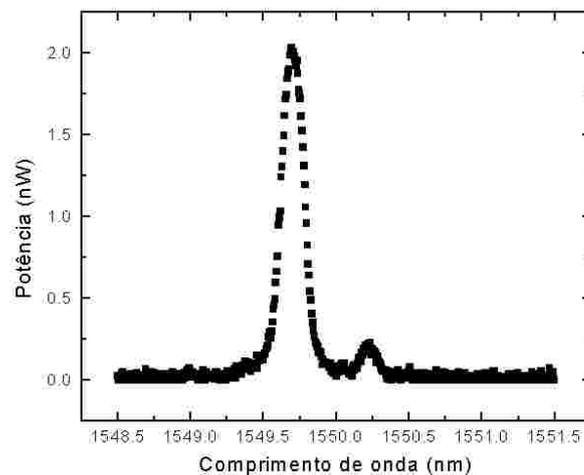


Figura 21 - Espectro correspondente ao feixe de luz refletido, com a mesma razão de extinção utilizada para o feixe de luz transmitido

Após esta nova montagem parcial, podemos verificar que a intensidade entre feixes transmitido e refletido continuava com uma diferença significativa. Podemos observar também que a inserção de qualquer componente óptico pelo caminho contribui para significativas perdas de potência no sistema. Outro fato a ser observado, é que para o feixe de luz refletido, ainda se observa uma pequena porção do lóbulo correspondente ao feixe transmitido. A tentativa de eliminá-lo acarreta em alteração bastante significativa do estado de polarização do feixe transmitido.

5.3 Montagem da Configuração Experimental Completa

Como os estados de polarização e as razões de extinção foram determinados a partir da configuração experimental apresentada na figura 11, tomou-se o cuidado de deixar estes componentes estáticos sobre a bancada de trabalho, a fim de não se alterar os estados de polarização. Porém, a montagem do aparato experimental completo, mostrada na figura 14, que efetivamente determinaria se o modelo proposto seria validado, dependeria da inclusão de um acoplador óptico e de outros cabos (fibras) para completar o circuito. Desta forma, alterações no estado de polarização novamente foram observadas. Facilmente observa-se que para formar o aparato experimental completo, basta introduzir a rede sensora na porta quatro do acoplador, o qual recebe a fonte óptica na porta um, completando-se o circuito óptico pela conexão da porta um do circulador com a porta dois do acoplador. O acoplador deve então ser deixado estático sobre a bancada, juntamente com seus cabos de conexão, a fim de minimizar problemas relativos à polarização. Isto é necessário, pois inúmeras vezes a verificação dos estados de polarização teve de ser feita por meio da montagem mostrada na figura 11, pois a montagem completa implica em estados de polarização bem diferentes. Este fato, somado ao efeito da adição de novos componentes, os quais fatalmente promovem novas perdas de potência no sistema, obrigaram a busca pela melhor razão de extinção no arranjo completo, o que foi feito alternando-se entre as montagens das figuras 11 e 14. Observe-se que para alternar as duas montagens, bastava desconectar-se o LED da porta um do acoplador e conectá-lo à porta um do circulador. Este procedimento era feito com o máximo cuidado para não se deslocar os cabos.

Por meio do procedimento de varredura para verificar o efeito de superposição das duas redes, executado com o circuito apresentado na figura 12, observou-se que as redes começavam a se superpor a partir de quatro voltas e meia no parafuso tensor. Desta forma,

tensionando-se a rede sensora para fazê-la excursionar entre os dois lóbulos da rede *Hi-Bi*, foi possível determinar-se as razões de extinção para a montagem completa, pois a varredura feita anteriormente possibilitou determinar as posições angulares do parafuso que determinavam a superposição da rede sensora com cada um dos lóbulos da *Hi-Bi*. Embora a varredura tenha sido feita com avanços de um quarto de volta do parafuso tensor, os ensaios com a montagem completa foram realizados com avanço a cada um oitavo de volta, a fim de se coletar uma quantidade maior de pontos experimentais. A figura 22 mostra a superposição da rede sensora com a *Hi-Bi* após cinco voltas e um quarto do parafuso tensor, situação em que o valor da potência atinge seu valor máximo na convolução entre os sinais das duas redes. O espectro corresponde ao feixe de luz transmitido, associado ao lóbulo esquerdo (de menor comprimento de onda) da rede *Hi-Bi*.

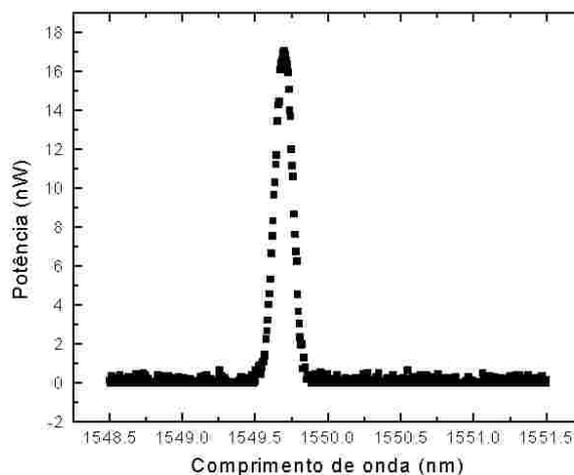


Figura 22 – Valor máximo medido na convolução entre o sinal da rede sensora e o lóbulo esquerdo da rede *Hi-Bi*

A figura 23 corresponde à superposição da rede sensora ao lóbulo direito (de maior comprimento de onda) da rede *Hi-Bi*, associado ao feixe de luz refletido. Neste caso, porém, não se pode afirmar que a potência medida representa o valor máximo da convolução, pois o parafuso tensor havia chegado ao final de seu deslocamento angular, a seis voltas e cinco oitavos. Eventualmente se a rede tivesse sido colada em outra posição sobre a lâmina do mecanismo tensor mostrado na figura 13, o máximo sinal de potência medido poderia ter sido maior.

Embora sejam apresentados apenas os espectros correspondentes aos máximos valores obtidos na convolução entre os sinais das duas redes, todos os espectros correspondentes a

cada variação angular do parafuso tensor foram coletados, a fim de se proceder aos ajustes de curvas que representem os espectros resultantes das convoluções. Após o ajuste das curvas, foram coletadas as áreas sob as mesmas para a construção do gráfico da razão entre as áreas dos feixes transmitido e refletido contra posição angular do parafuso tensor. Os dois modelos utilizados para ajustar os dados experimentais foram lorentziano e gaussiano.

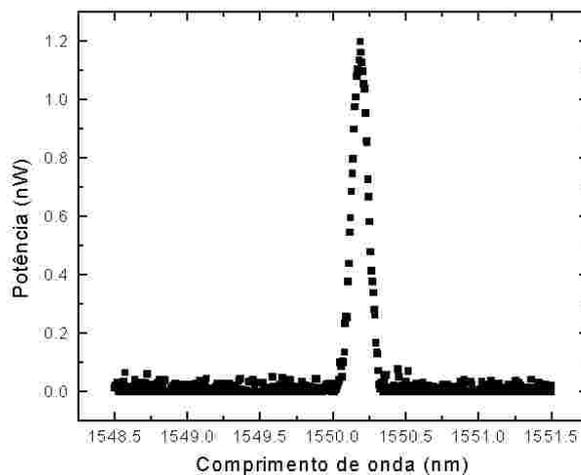


Figura 23 – Valor máximo de potência medido na convolução entre o sinal da rede sensora e o lóbulo direito da rede *Hi-Bi*

O anexo B mostra todos os espectros resultantes da varredura realizada, com incremento de um oitavo de volta no parafuso tensor, com a utilização da montagem experimental mostrada na figura 14. São mostrados os espectros coletados em transmissão e reflexão pelo polarizador separador de feixe. Sobre os espectros foram ajustadas curvas gaussianas para a coleta das áreas.

5.4 Dados Experimentais – Áreas abaixo dos Picos

A varredura realizada com a montagem apresentada na figura 12 mostrou que a rede sensora fica suficientemente próxima do lóbulo esquerdo da rede *Hi-Bi* aproximadamente após quatro voltas e meia do parafuso tensor. Por esta razão, os dados coletados no ensaio com a montagem completa são relativos a sinais de potência medidos a partir desta posição angular do parafuso, até o final de seu deslocamento a seis voltas e um oitavo. Como as áreas abaixo das curvas ajustadas são proporcionais às potências representadas pelos espectros, e

em função de se utilizar a razão entre a potência do feixe transmitido e refletido, a coleta das áreas é o objeto de interesse deste ensaio, pois conduzem à comprovação que o modelo proposto é válido para se codificar em intensidade sensores a rede de Bragg em fibra. As áreas coletadas são apresentadas na tabela 4, sendo que os valores representam potências. Além do procedimento de ajuste de curvas gaussianas e lorentzianas nos espectros de transmissão e reflexão para a coleta das áreas, foram também coletadas através de integração direta com a função “*Integrate*” do ORIGIN, após o ajuste das curvas dos modelos citados.

Tabela 4 – Áreas coletadas dos espectros de transmissão e reflexão, determinadas por ajuste gaussiano e lorentziano

Posição Angular do Parafuso Tensor (voltas)	Área dos Espectros de Transmissão – Ajuste Gaussiano (nW)	Área dos Espectros de Reflexão – Ajuste Gaussiano (nW)	Área dos Espectros de Transmissão – Ajuste Lorentziano (nW)	Área dos Espectros de Reflexão – Ajuste Lorentziano (nW)	Área dos Espectros de Transmissão – Obtida por Integração (nW)	Área dos Espectros de Reflexão – Obtida por Integração (nW)
4,500	37,782	9,308	53,738	17,200	56,008	30,494
4,625	60,385	10,601	87,056	19,820	90,332	34,939
4,750	97,692	10,683	130,710	21,904	13,279	37,450
4,875	145,680	10,708	188,940	21,787	170,486	38,882
5,000	192,460	12,698	247,020	16,866	214,657	55,564
5,125	249,620	10,351	319,740	26,488	268,852	45,301
5,250	257,620	12,605	331,770	28,262	285,118	54,259
5,375	209,000	12,721	271,260	32,705	241,121	54,146
5,500	146,350	11,807	190,760	58,899	176,362	53,812
5,625	95,712	9,545	126,540	22,576	123,658	41,073
5,750	63,268	10,062	89,055	52,856	88,944	50,332
5,875	44,170	12,920	65,056	38,096	72,803	45,481
6,000	34,040	19,285	57,789	50,785	69,881	53,575
6,125	19,508	22,623	39,448	41,933	52,795	50,711
6,250	20,230	31,530	40,620	48,151	58,960	58,739
6,375	20,536	71,424	42,401	96,109	66,201	99,194
6,500	19,825	119,060	53,330	155,910	77,857	149,130
6,625	20,165	160,380	40,049	207,690	64,599	187,163

O gráfico experimental da razão obtido com ajuste lorentziano, para a razão entre as áreas abaixo dos espectros dos feixes transmitido e refletido contra a posição do parafuso tensor é mostrado na figura 24. As linhas tracejadas representam as posições do parafuso tensor que correspondem à superposição da rede sensora aos comprimentos de onda central dos dois lóbulos da rede Hi-Bi. O mesmo é válido para as figuras 25 e 26, e demais gráficos que exibem razão entre intensidades contra posição do parafuso tensor.

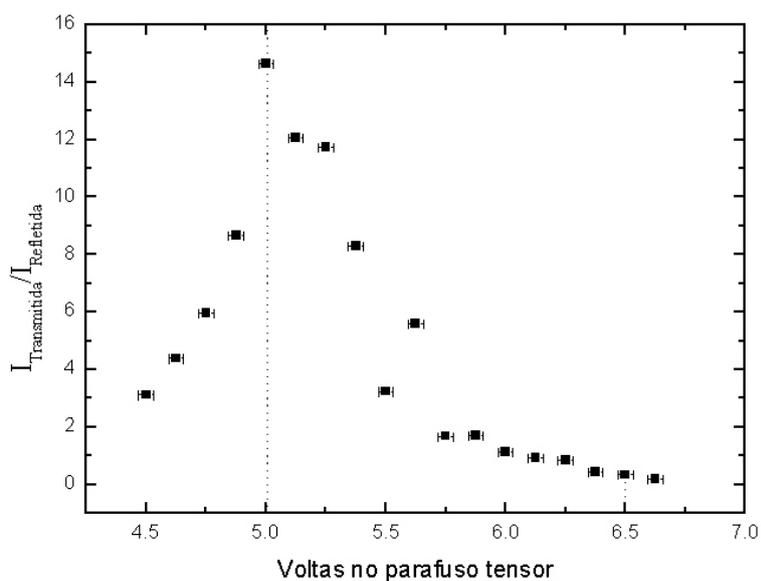


Figura 24 – Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – ajuste lorentziano

O gráfico correspondente aos dados extraídos do ajuste gaussiano para as curvas experimentais é mostrado na figura 25.

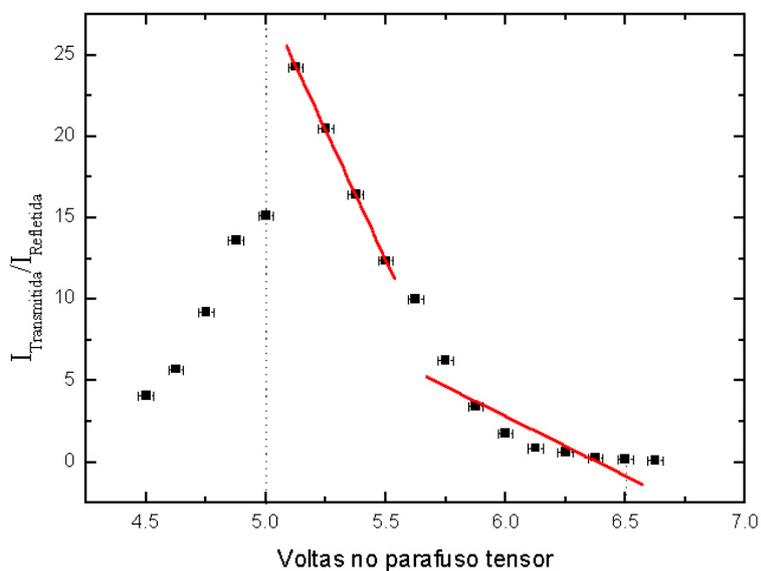


Figura 25 - Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – ajuste gaussiano

Sobre este gráfico foram ajustadas retas, respectivamente nas regiões de alta e baixa sensibilidade do sistema de leitura para posterior comparação com simulações

computacionais. O coeficiente angular da reta na região de baixa sensibilidade é $-37,77311$ e na região de baixa sensibilidade é $-7,34334$.

O gráfico mostrado na figura 26 corresponde a razão entre as áreas dos espectros de transmissão e reflexão para cada posição do parafuso tensor, sendo as áreas abaixo das curvas obtidas pelo processo de integração direta do próprio *software* (função *Calculus/Integrate*).

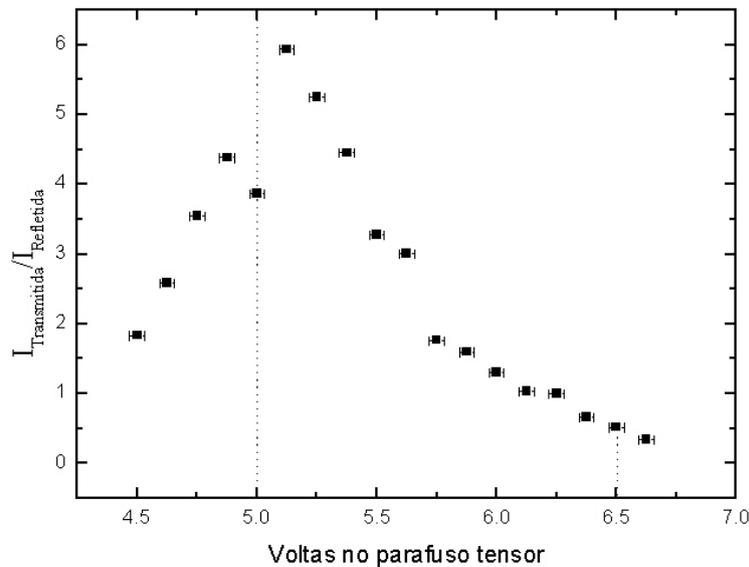


Figura 26 – Razão experimental entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido obtida com integração direta pelo ORIGIN

5.5 Coleta de Dados para Simulação

Os dados para simulação numérica correspondentes aos avanços da rede sensora submetida à tensão mecânica pelo mecanismo mostrado na figura 13 foram coletados com o OSA a partir do circuito óptico mostrado na figura 12. Foram ajustadas curvas gaussianas e lorentzianas para determinar a posição do comprimento de onda central das redes. Um exemplo do ajuste utilizando cada um dos modelos de curvas é mostrado na figura 27. Estes espectros ilustram a posição da rede sensora com o parafuso tensor posicionado a três voltas e três quartos.

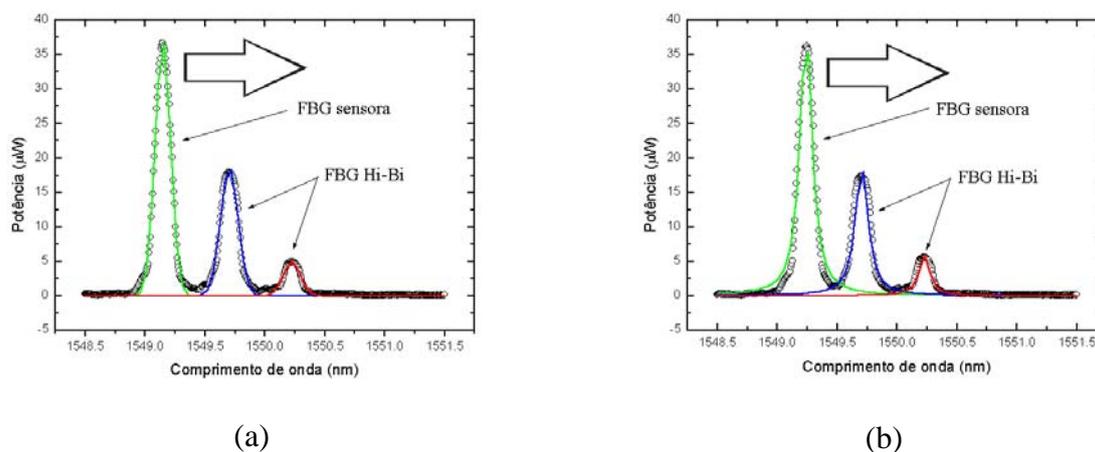


Figura 27 – Ajustes com modelos: (a) gaussiano, (b) lorentziano

Depois de coletadas as posições da rede sensora em função do avanço angular do parafuso, foram construídos gráficos para avaliar a resposta da rede e verificar sua linearidade. Estes gráficos são mostrados na figura 28.

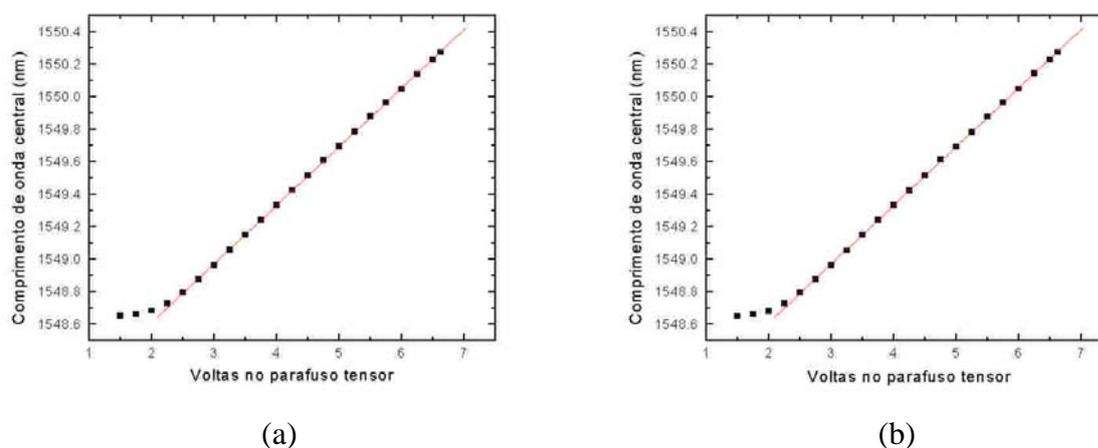


Figura 28 – Resposta da rede sensora em função da posição angular do parafuso: (a) ajuste gaussiano, (b) ajuste lorentziano

Devemos observar que a primeira etapa da simulação utilizando o ajuste modelo gaussiana x gaussiana, compreende o ajuste de três curvas gaussianas sobre os espectros relativos às diversas posições da rede sensora com a função Fit Multi-Peaks do ORIGIN. Por este motivo, o gráfico mostrado na figura 27.a é válido para os dois tipos de simulações gaussianas realizadas. Por este mesmo motivo a figura 28 não exibe três gráficos, sendo aquele apresentado na parte (a) também válido para os dois modelos de simulação gaussiana realizadas.

5.5.1 Simulação Computacional

A simulação computacional foi realizada construindo-se no ORIGIN vinte e duas planilhas, correspondendo às posições angulares do parafuso tensor. Os dados foram colhidos com a utilização da montagem mostrada na figura 12. Cada uma destas planilhas gera três gráficos de interesse para análise. O primeiro mostra a posição da rede sensora em relação à rede Hi-Bi. Os outros dois mostram o produto do sinal da rede sensora com cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi. A figura 29 mostra, como exemplo, a posição da rede sensora com o parafuso a cinco voltas e três quartos. Os gráficos obtidos referem-se à simulação com os ajustes lorentziano e gaussiano respectivamente.

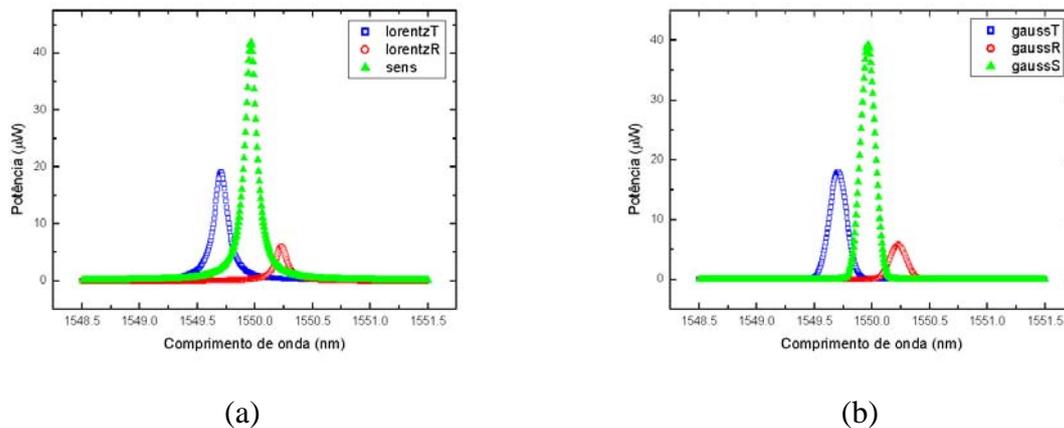


Figura 29 – Posição da rede sensora após $5 \frac{3}{4}$ voltas (a) ajuste lorentziano, (b) ajuste gaussiano

Embora este procedimento tenha sido feito para os vinte e dois arquivos referentes à varredura com o circuito óptico mostrado na figura 12, os dados de interesse correspondem às posições angulares próximas a quatro voltas e meia do parafuso tensor, até o fim do curso do parafuso, a seis voltas e cinco oitavos. Isto corresponde a dez arquivos, de cujas planilhas são traçados os gráficos correspondentes ao produto ponto a ponto do espectro da rede sensora pelos espectros correspondentes aos lóbulos da rede Hi-Bi, que correspondem aos espectros dos feixes transmitido e refletido. Os espectros correspondentes aos produtos entre rede sensora e espectro de transmissão e reflexão para cinco voltas e três quartos, com o ajuste lorentziano são mostrados na figura 30.

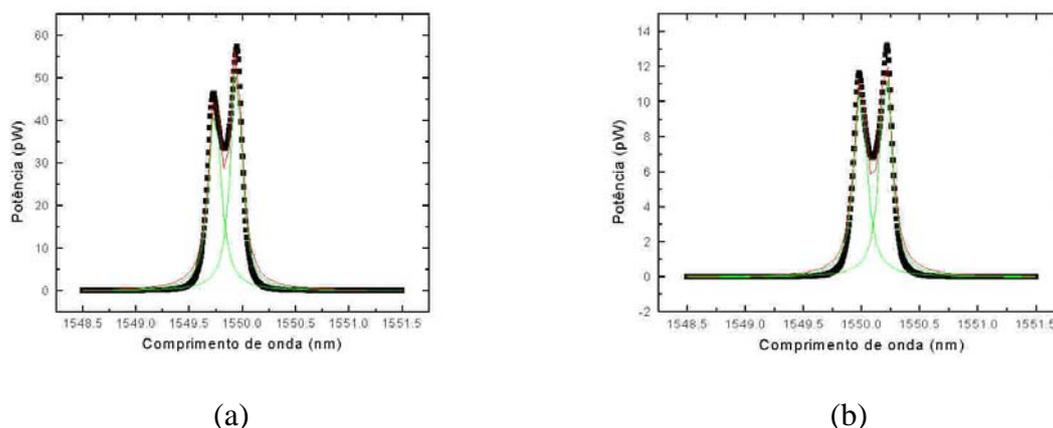


Figura 30 - (a) Produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à transmissão da rede *Hi-Bi*, (b) produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à reflexão da rede *Hi-Bi* (ajuste lorentziano)

Em virtude da forma dos espectros resultantes do ajuste lorentziano, as áreas foram coletadas utilizando-se a função *Fit Multi-Peaks* do ORIGIN. Para a aquisição da área referente ao produto entre a rede sensora e o espectro de transmissão da rede *Hi-Bi*, na figura 30a considerou-se o valor relativo à posição de menor comprimento de onda central. Analogamente, para a aquisição da área relativa ao produto entre a rede sensora e o espectro de reflexão na figura 30b, considerou-se o valor correspondente ao maior comprimento de onda central, pois estes valores correspondem à posição da rede sensora para esta dada posição do parafuso tensor. Os gráficos apresentados na figura 31 mostram os espectros dos produtos com o ajuste gaussiano.

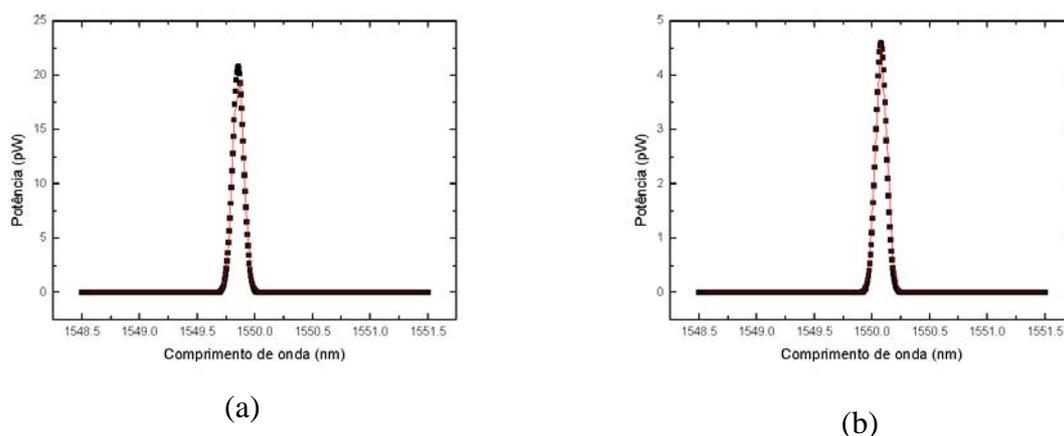


Figura 31 - (a) Produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à transmissão da rede *Hi-Bi*, (b) produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à reflexão da rede *Hi-Bi* (ajuste gaussiano)

O anexo C mostra os gráficos correspondentes ao produto entre a gaussiana que representa a rede sensora e as gaussianas que representam cada um dos lóbulos da rede *Hi-Bi*

para cada posição angular do parafuso tensor. O anexo mostra ainda a posição da rede sensora em relação aos lóbulos da rede Hi-Bi. As curvas foram obtidas a partir de dados colhidos com a configuração experimental mostrada na figura 12.

Destes gráficos é que efetivamente se coletam as áreas relativas aos feixes transmitido e refletido na simulação computacional. As áreas são então divididas para cada posição angular do parafuso tensor, possibilitando a obtenção de um novo gráfico, que finalmente mostrará a razão entre as áreas em função da posição do parafuso.

Uma vez coletadas as áreas correspondentes aos espectros representativos do produto entre rede sensora e cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi, pode-se traçar os gráficos da razão entre os sinais relacionados à transmissão e reflexão contra a posição angular do parafuso. Estes gráficos são mostrados na figura 32.

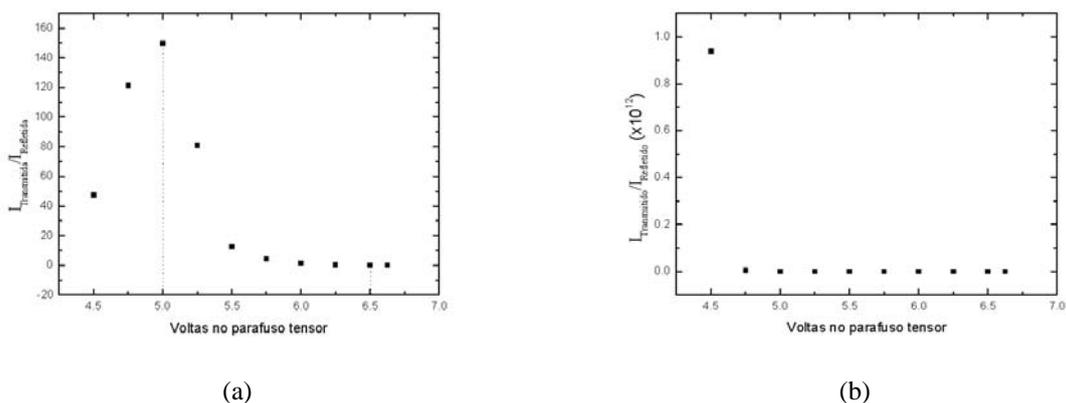


Figura 32 – Razão simulada entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido – (a) ajuste lorentziano, (b) ajuste gaussiano

Tendo em vista a não concordância do gráfico relativo ao ajuste gaussiano da simulação computacional, mostrado na figura 32.b, com os gráficos relativos aos dados experimentais, mostrados nas figuras 24, 25 e 26, procedeu-se à construção do gráfico com as áreas coletadas da simulação computacional de acordo com o ajuste promovido pelo modelo de produto entre duas curvas gaussianas. Isto foi feito para possibilitar uma gama maior de parâmetros de ajuste, comparado com os parâmetros de ajuste para uma única gaussiana. Este modelo de ajuste é utilizado nos gráficos que representam o produto ponto a ponto da rede sensora com o lóbulo esquerdo da rede *Hi-Bi* e da rede sensora com o lóbulo direito da rede *Hi-bi*, que representam respectivamente o feixe transmitido e refletido. O gráfico de razão entre as áreas para este modelo é mostrado na figura 33.

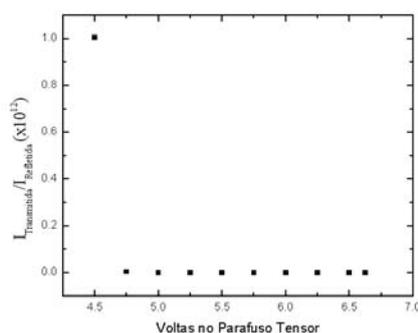
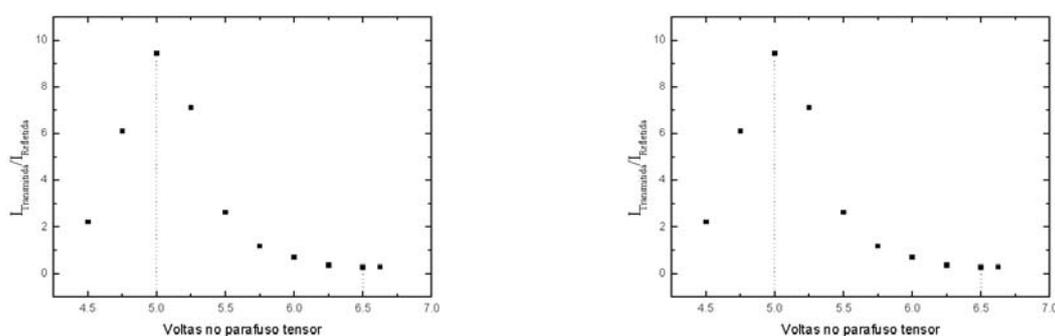


Figura 33 - Razão simulada entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido, com ajuste pelo produto gaussiana x gaussiana

Como o gráfico da razão entre as áreas construído utilizando o modelo gaussiana x gaussiana também não concordou com os demais gráficos, optou-se pela adição de um *offset* na simulação. Este procedimento é utilizado para levar em consideração possíveis valores de *offset* dos detectores, bem como para evitar divisões com um denominador muito próximo de zero. Isto é feito definindo-se na planilha do gráfico da razão entre as áreas a adição de um pequeno valor, da ordem de grandeza do maior valor encontrado entre o produto da coluna representativa da rede sensora com o lóbulo da rede Hi-Bi que representa o espectro da luz refletida. Desta forma, a razão entre as colunas apresentará valores diferentes determinados por estes valores adicionados. A figura 34 mostra o resultado da adição destes valores nas duas simulações utilizando modelos gaussianos.



(a)

(b)

Figura 34 – Razão simulada utilizando modelos gaussianos com adição de *offset* (a) modelo gaussiano, (b) modelo gaussiana x gaussiana

5.5.2 Variações na Largura de Banda

Um gráfico característico de razão entre as intensidades que exhibe o ajuste das retas nas regiões de alta e baixa sensibilidade é mostrado na figura 35. A figura mostra o gráfico obtido para a simulação com uma rede com largura de banda de 0.12 nm, com a área correspondente de $5,92 \times 10^{-6}$.

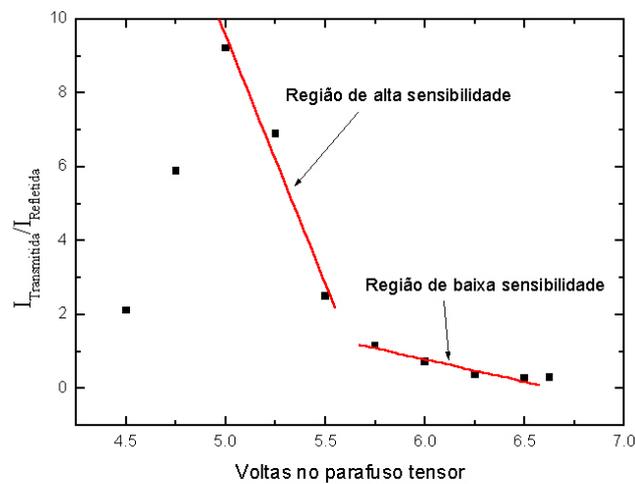


Figura 35 – Razão simulada, exibindo retas ajustadas nas regiões da alta e baixa sensibilidade

A tabela 5 apresenta os valores de coeficiente angular coletados em todos os gráficos de razão, com as respectivas variações em função da largura de banda. Os valores de coeficiente angular registrados são expressos em unidades de razão entre intensidade de feixe transmitido e refletido por voltas no parafuso tensor.

Tabela 5 – Variações de coeficiente angular em função da largura da rede sensora

Largura de Banda (nm)	Coefficiente angular (Alta sensibilidade)	Coefficiente angular (Baixa sensibilidade)
0,06	- 9,10	- 0,91
0,08	- 11,00	- 1,01
0,10	- 12,51	- 1,10
0,12	- 13,43	- 1,20
0,14	- 13,92	- 1,33
0,16	- 14,05	- 1,50
0,18	- 13,97	- 1,68

Com os valores da tabela 5 foram traçados os gráficos que mostram a sensibilidade do sistema de leitura em função da largura de banda. A figura 36 mostra as variações para a região de alta sensibilidade e de baixa sensibilidade para cada largura de banda.

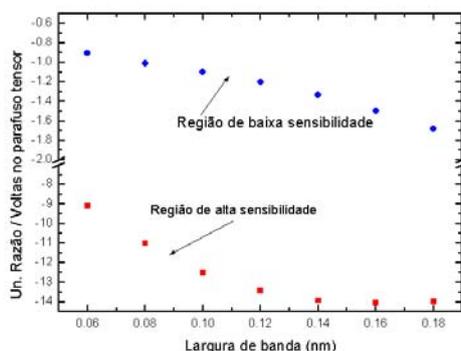


Figura 36 – Variação de sensibilidade em função da largura de banda nas regiões de baixa e alta sensibilidade

5.6 Medidas com Fotodetectores

Uma medida típica de tensão elétrica registrada com o uso de fotodetectores coletando a luz transmitida e refletida logo na saída do polarizador separador de feixes, é apresentada na tabela 6, resultado da medição direta no mostrador do amplificador diferencial *Lock-In*. Estes dados referem-se à primeira rede ensaiada com o sistema de fotodetecção. O arranjo experimental utilizado é aquele mostrado na figura 16.

Tabela 6 – Valores de tensão medidos com fotodetectores e amplificador diferencial *Lock-In*

Posição Angular do Parafuso (Volts)	Tensão no Fotodetector para o Feixe Transmitido (μV)	Tensão no Fotodetector para o Feixe Refletido (μV)	Posição Angular do Parafuso (Volts)	Tensão no Fotodetector para o Feixe Transmitido (μV)	Tensão no Fotodetector para o Feixe Refletido (μV)
0,125	1,2	2,3	1,125	4,0	8,4
0,250	1,5	2,6	1,250	2,3	11,5
0,375	2,3	3,2	1,375	1,6	37,3
0,500	5,0	3,5	1,500	1,2	55,6
0,625	14,2	3,3	1,625	0,90	53,4
0,750	18,6	3,5	1,750	0,75	29,2
0,875	13,3	5,1	1,875	0,60	19,4
1,000	6,0	5,7			

O espectro desta rede, com o parafuso tensor totalmente relaxado é mostrado na figura 37. O comprimento de onda central desta rede era 1548,9 nm e sua largura de banda era 0,11 nm. Esta rede foi gravada em fibra fotossensível. Na figura podemos notar os pequenos lóbulos laterais resultantes do processo de gravação, os quais são resultado de múltiplas reflexões provocadas pelas duas extremidades opostas da rede [2].

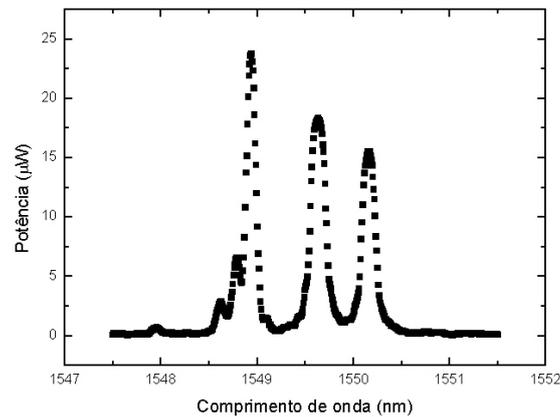


Figura 37 – Espectro da primeira rede sensora (lóculo de menor comprimento de onda) ensaiada com o sistema de fotodeteccção mostrado junto ao espectro da rede Hi-Bi

Com os valores de tensão coletados com a utilização da rede mostrada na figura 37, a razão entre os valores medidos no feixe transmitido divididos pelos valores medidos no feixe refletido, traçados contra a posição angular do parafuso tensor gera o gráfico mostrado na figura 38.

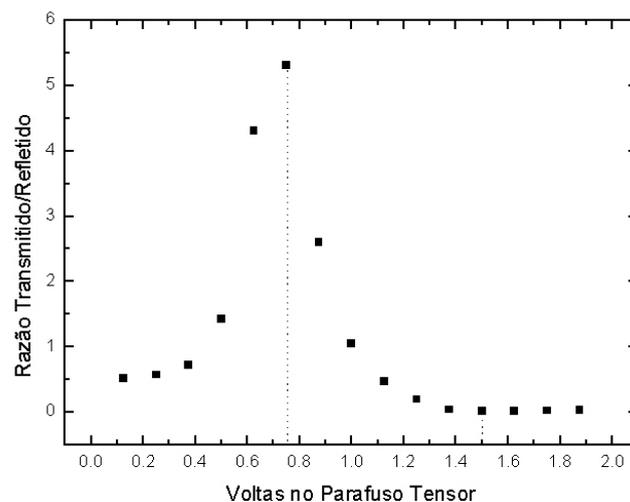


Figura 38 – Razão experimental entre as tensões relativas aos feixes transmitido e refletido medidas com fotodetectores

A figura 39 mostra o espectro da segunda rede ensaiada com o sistema de fotodeteção mostrado na figura 16. O comprimento de onda central desta rede era 1549,24 nm e sua largura de banda era 0,15 nm. Esta rede também foi gravada em fibra fotossensível.

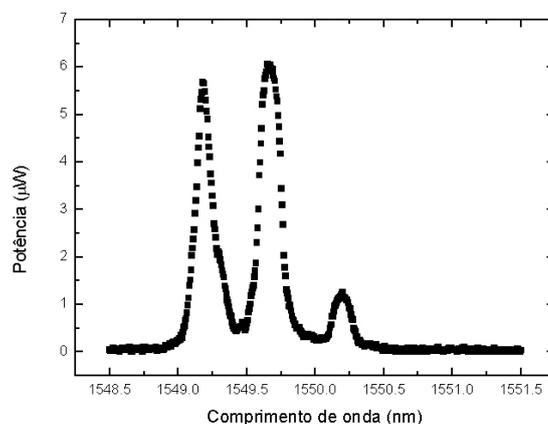


Figura 39 - Espectro da segunda rede sensora (lóbulo de menor comprimento de onda) ensaiada com o sistema de fotodeteção mostrado junto ao espectro da rede Hi-Bi

A figura 40 mostra o resultado da razão entre feixes transmitido e refletido contra posição do parafuso tensor. Podemos notar que as medidas realizadas com esta rede conduzem a resultados diferentes do esperado.

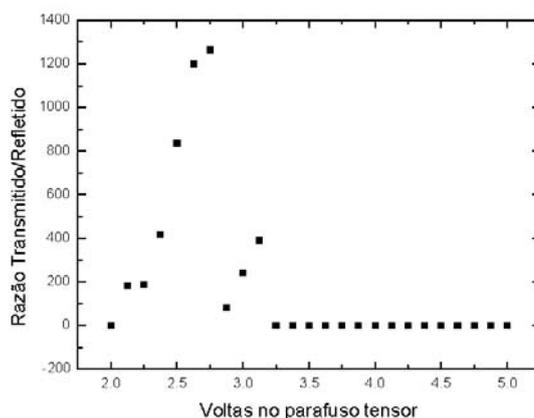


Figura 40 – Gráfico de uma medida onde alguns dos sinais medidos se aproximam de zero

Neste caso, a adição de um *offset* também determina uma curva com o comportamento esperado. Isto é mostrado na figura 41, onde se adicionou um pequeno valor de tensão constante às medidas realizadas com o amplificador diferencial *Lock-In* antes de se proceder à razão entre as medidas. O gráfico mostrado na figura 40 não apresenta o

comportamento esperado devido ao fato de que alguns dos sinais medidos com o fotodetector conduzem a um valor muito próximo de zero quando se procede à razão entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido. Desta forma, utilizou-se a adição de um *offset* de 1×10^{-6} nas intensidades, resultando na curva mostrada na figura 41.

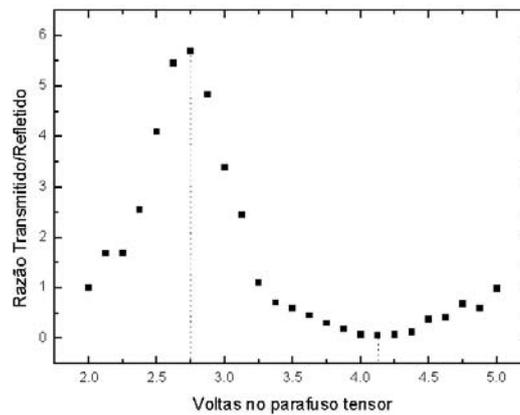


Figura 41 – Gráfico de medida com fotodetectores, utilizando-se adição de *offset*

Porém, este valor só foi adicionado após a verificação de que o estado de polarização da montagem favorecia a iluminação adequada das duas bandas de rede Hi-Bi. Para isto, devemos obter um gráfico que mostre individualmente a variação de intensidade dos dois feixes em função da variação angular do parafuso tensor. Um gráfico deste tipo é mostrado na figura 42.

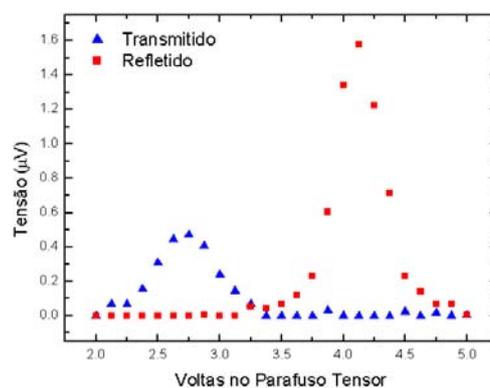


Figura 42 – Variação de intensidades dos feixes transmitido e refletido em função da posição do parafuso

Uma vez confirmada a adequada razão de extinção, tem-se a certeza de que a adição do *offset* corresponde a um valor médio de sinal.

CAPÍTULO 6

Discussões

6.1 Dados Experimentais

As medidas iniciais realizadas, referentes ao acoplamento de potência mostraram que existe a necessidade de um rigoroso alinhamento entre as Lentes Grin e o polarizador separador de feixes. O sistema de alinhamento montado mostrado na figura 10 mostrou-se eficiente a partir do momento em que foram conferidos graus de liberdade adicionais às lentes, que possibilitaram a inserção de luz na fibra mesmo com o limitado ângulo de aceitação destas lentes. Para melhoria do sistema de alinhamento, a adição de um grau de liberdade translacional à lente lateral pode resultar num acoplamento de potência mais eficiente, pois dessa forma será possível ajustar a distância de trabalho da lente Grin, a qual é fornecida pelo fabricante. Uma possível solução para a eliminação do complexo sistema de alinhamento seria a utilização de um determinado tipo de acoplador, o qual é dotado de duas lentes Grin que são solidárias a um espelho semitransparente [58]. Estes acopladores se valem da variação do índice de refração das lentes Grin e trabalham conjugados a lâminas de atraso de um quarto de onda.

A tabela 2 mostra que a luminosidade ambiente não influencia a coleta de dados, pois o pequeno valor de intensidade registrado na lente lateral tem uma magnitude muito pequena frente ao valor de intensidade registrado na lente coaxial. Pode-se notar também que a utilização do medidor de potência (*Power Meter*) deve ser restrita a leituras que não exijam um tempo de resposta pequeno, dada a lentidão de resposta deste instrumento. Desde os testes iniciais para acoplamento de potência e alinhamento, observou-se que a posição dos cabos e componentes óticos do circuito é um fator crítico quando se trabalha com sistemas que sejam suscetíveis à polarização. Desta forma, a fim de tornar este sistema

de leitura eficiente em condições operacionais, é recomendável o encapsulamento dos componentes em um bloco em que estes fiquem solidários entre si e não se movimentem. O encapsulamento, porém, deverá permitir o acesso ao controlador de polarização para o ajuste do sistema. Para minimizar as perdas por inserção nos diversos componentes, recomenda-se também evitar a utilização de conectores entre os mesmos, sendo preferível a emenda direta entre as fibras por fusão.

Ainda quanto às montagens parciais, as figuras 20 e 21, que mostram os espectros obtidos com a montagem experimental mostrada na figura 11, sugerem que a rede Hi-Bi deve ser iluminada com um estado de polarização tal que otimize a razão de extinção, pois a figura mostra que a amplitude dos espectros de transmissão e reflexão são muito diferentes. Desta forma, quando da montagem da configuração completa, mostrada na figura 16, pode-se obter gráficos individuais de leituras em intensidade para os feixes transmitido e refletido cujas curvas apresentem o comportamento adequado, ilustrado na figura 42. Além disso, a adequada condição de polarização vai favorecer uma iluminação da rede Hi-Bi que permita uma razão de extinção otimizada, possibilitando a exclusão do pequeno lóbulo restante associado ao feixe transmitido, mostrado na figura 21, que pode ser responsável pelas discrepâncias observadas nos gráficos de razão entre as intensidades contra posição angular do parafuso tensor.

A montagem experimental completa mostrada na figura 14 mostrou-se inadequada em função da perda de potência ocasionada pela posição do acoplador no circuito, porém possibilitou a coleta de dados experimentais úteis à comparação com a montagem final mostrada na figura 16, principalmente por mostrar o comportamento esperado para as curvas de razão entre feixes transmitido e refletido. As diferenças entre os valores máximos de razão entre as intensidades de feixe transmitido e refletido pelo polarizador separador de feixe, mostrados nas figuras 24 e 25 deve-se às diferenças das formas das curvas gaussianas e lorentzianas utilizadas para o ajuste. Os ajustes gaussianos feitos sobre os diversos espectros obtidos para as várias posições angulares do parafuso tensor resultam em curvas que se adaptam melhor ao formato dos espectros, contribuindo para uma computação mais adequada da área abaixo da curva. Porém, como a equação gaussiana decai mais rapidamente do que a equação lorentziana, a segunda engloba parte dos pequenos lóbulos

laterais fora da região de ressonância da rede, como pode ser visto na figura 29. Isto evidencia que uma FBG pode ser melhor modelada por uma gaussiana do que por uma lorentziana, porém na análise dos resultados os fatores mencionados devem ser considerados. O ajuste de qualquer dos modelos de curva utilizados conduz a uma integração sobre uma curva ajustada. Assim, a área resultante é aquela abaixo da curva ajustada. A figura 26, obtida por integração direta no ORIGIN, resulta em uma menor amplitude entre as razões devido ao fato de que com a utilização da função *Integrate* do programa, as flutuações dos pontos experimentais são consideradas, resultando em menores áreas coletadas. A figura 21 mostra que mesmo com a melhor razão de extinção obtida, um pequeno lóbulo correspondente ao feixe transmitido ainda se pronuncia quando se coleta o espectro do feixe refletido. Este fato, inevitavelmente contribui para que quando se procede finalmente a razão entre os dois valores, a curva resultante possa não ter exatamente o comportamento esperado.

Quando se passou para o sistema de fotodetecção, o alinhamento tornou-se mais fácil, pois foi possível eliminar o Suporte em U para Fibra e o sistema de alinhamento complexo mostrado na figura 10 e que foi utilizado para medições com o OSA. Desta forma, com o fotodetector posicionado próximo ao polarizador separador de feixe, como mostrado na figura 17, torna-se mais fácil a aquisição de dados, devido ao maior ângulo de aceitação do fotodetector. Para a montagem do conjunto em um sistema encapsulado, sugere-se também o uso de fotodetectores com saída em fibra, os quais otimizam a coleta de dados devido ao perfeito alinhamento da superfície da fibra com o elemento fotodetector. Além disso, o uso de dois fotodetectores para aquisição de dados simultaneamente conduz a melhores resultados, pois minimiza erros de leitura devido a possíveis flutuações de intensidade no interior da fonte de luz. Estes efeitos podem ter ocasionado flutuações nas medidas realizadas com a técnica de duas varreduras individuais, uma para o feixe transmitido e outra para o feixe refletido.

A partir das medidas com fotodetecção é que se determinou a necessidade de se adicionar um *offset* às medidas, os quais representam um valor médio de sinal, resultando em uma curva de razão entre tensões com o comportamento esperado e previsto pelas simulações computacionais. De acordo com o trabalho de Nunes et al [27], o *offset* é

adicionado para representar o ruído de escuro dos fotodetectores.

As diversas posições em que as redes sensoras foram coladas mostram que é possível a colagem em uma posição tal que o raio de curvatura proporcione uma faixa de deslocamento angular, ou, número de voltas, que levem a uma sensibilidade otimizada para uma determinada rede. Assim, ao excursionar sobre a rede Hi-Bi, uma grande variação angular corresponderá a um pequeno deslocamento do comprimento de onda central da rede sensora. Desta forma, pode ser obtido um sensor de rotação capaz de detectar variações angulares muito superiores a aquele proposto por MacPherson et al [29].

Essa grande variação angular do parafuso do mecanismo tensor, se combinada com o conseqüente deslocamento de uma rede sensora mais estreita, proporciona uma ampla faixa de resposta sobre a qual se verifica a convolução entre os sinais da rede sensora e da rede Hi-Bi. Também é possível a colagem de modo a permitir que pequenas variações angulares do parafuso proporcionem rápidas respostas em termos de convolução. Para a otimização de resultados, deve-se utilizar redes sensoras com alta refletividade, a fim de se tirar máximo proveito da fonte ótica utilizada. Isto é possível porque neste caso a relação sinal/ruído será maior. Tal fato pode ser demonstrado pela série de medidas feita com a configuração experimental mostrada na figura 14, na qual inadvertidamente se utilizou o acoplador numa posição errada, resultando em uma coleta de espectros cuja amplitude era pequena e o ruído causava grande interferência nas medidas. Uma outra sugestão para montagem de um sistema encapsulado seria a utilização de dois circuladores em vez de um circulador e um acoplador, para minimizar perdas de potência. Isto seria aconselhável devido ao fato de os circuladores serem circuitos direcionais e não divisores. Ou, ainda, a utilização de apenas um circulador de quatro portas, que apresentaria ainda a vantagem de tornar o sistema mais compacto e portanto mais propício a operar em condições reais.

6.2 Simulações Computacionais

A rede utilizada nas simulações computacionais, que é a mesma rede que foi utilizada para a aquisição de dados com o OSA, foi colada em uma posição tal que não

permitiu a completa varredura do lóbulo da rede Hi-Bi de maior comprimento de onda. Este fato, em princípio não representa nenhum tipo de problema para a aquisição dos dados necessários à construção dos gráficos de razão entre as áreas para a verificação da relação unívoca entre estas razões e as posições angulares do parafuso tensor. Pode-se afirmar isso porque a região de interesse desses gráficos é a faixa de posições angulares ou voltas do parafuso tensor que correspondem às posições da rede sensora entre os dois picos da rede Hi-Bi.

Embora a inicial discordância dos gráficos de razão contra posições angulares, obtidos para o ajuste gaussiano, mostrados nas figuras 32b e 33, estes resultados foram válidos por demonstrar que mesmo com uma maior gama de parâmetros de ajuste, a simulação com curvas gaussianas pode ser utilizada para modelagem de FBG. Quando se trabalha com o produto de duas gaussianas, pode-se ajustar parâmetros extras porque a função gaussiana x gaussiana definida no programa permite então o ajuste de seis parâmetros no total. Estes parâmetros são as áreas, as larguras de banda e a posição do comprimento de onda central de duas redes, os quais são variados em função das sucessivas iterações. Com a utilização de *offset*, resultando nos gráficos mostrados na figura 34, fica evidente que uma FBG pode ser adequadamente modelada por uma gaussiana. Para o modelo de ajuste lorentziano, cuja curva de razão contra posição angular é mostrada na figura 32a, pode-se supor que este tipo de ajuste é válido para modelagem, porém, os gráficos exibidos na figura 30 mostram a invalidade de sua utilização, devido à forma das curvas obtidas que diferem muito da forma dos espectros mostrados nas figuras 22 e 23. Além disso, a técnica utilizada para a determinação das áreas abaixo das curvas desconsidera uma parte da área do espectro. Dessa forma, o ajuste de curvas gaussianas se presta a modelagens de redes estreitas e de alta refletividade, pois nesse caso a relação sinal/ruído é bastante alta e a curva ajustada coincidirá com os dados experimentais mesmo nas porções do espectro distantes da região de ressonância.

No estudo de variação de largura de banda, a figura 36 mostra que quanto menor a largura de banda da rede sensora maior será a sensibilidade do sistema de leitura e conseqüentemente maior a resolução do conjunto como sensor. A figura mostra ainda a existência de regiões com sensibilidade bastante diferenciadas nos gráficos simulados de

razão entre as intensidades dos feixes transmitido e refletido.

Como foi utilizado o modelo gaussiano para simulações com variações de largura de banda, a comparação do gráfico experimental de razão entre feixes transmitido e refletido contra posição do parafuso tensor mostrado na figura 25, com o gráfico obtido pela simulação com a largura de banda igual à largura da rede sensora utilizada experimentalmente (0,12 nm) mostrado na figura 35, mostra sensibilidades diferentes em ambas as regiões (alta e baixa sensibilidade), porque na simulação utilizamos um modelo simplificado, onde a rede foi modelada por uma gaussiana, e, portanto não se consideram os pequenos lóbulos laterais existentes na rede sensora usada nas medidas experimentais utilizadas na comparação. Desta forma, porções significativas de área podem ter sido desconsideradas na simulação, resultando em coeficientes angulares diferentes para as retas ajustadas nas regiões de alta e baixa sensibilidade. Uma possível solução para o problema de modelagem da rede sensora nas simulações computacionais seria a utilização da equação da refletividade de uma rede de Bragg (equação 6), a qual descreve melhor a forma da rede, englobando as pequenas contribuições dos lóbulos laterais quando se procede a coleta das áreas.

CAPÍTULO 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Este trabalho mostrou a utilização de duas montagens experimentais principais que permitiram comprovar a validade do sistema de leitura proposto como um dispositivo que substitua os tradicionais sistemas de leitura para sensores a fibra óptica que são codificados em comprimento de onda. Foram utilizadas duas formas de detecção de intensidade dos feixes de luz. A primeira foi a coleta de áreas abaixo dos espectros com o OSA. A segunda foi a fotodetecção. Através de ambas as técnicas a razão entre os feixes transmitido e refletido conduzem a curvas experimentais que comprovam haver uma correspondência unívoca entre razão das intensidades dos feixes e as posições do parafuso do mecanismo tensor. Assim, fica comprovado que esta nova técnica de leitura codificada em intensidade pode se tornar operacional. Embora as medidas realizadas tenham sido feitas através de tensão mecânica, os resultados experimentais sugerem que medidas com variação de temperatura também conduzirão a relação unívoca necessária para a realização de medidas. Além de tensão mecânica e temperatura, o sistema de leitura pode ser aproveitado para demodulação em sensoriamento de diversos parâmetros, tais como inclinação, pressão hidrostática, vibração, torção e outros. As medidas experimentais realizadas proporcionaram uma forma alternativa de se medir deslocamento angular ou rotação.

Embora as simulações computacionais tenham utilizado redes descritas por equações simplificadas e modeladas por curvas gaussianas ou lorentzianas, ou seja, redes com largura de banda, refletividade e área bem definida, foram de vital importância para compreender o procedimento experimental. Através de uma montagem experimental mais simplificada, as simulações permitiram visualizar o efeito de superposição do espectro da rede sensora com a rede Hi-Bi, auxiliando a compreensão e interpretação dos resultados obtidos através de experimentação. Foram úteis principalmente na questão da confirmação da adição do *offset* nos valores coletados com o sistema de fotodetecção.

O estudo da influência da largura de banda da rede sensora mostrou que o sistema de leitura proposto é tão mais sensível quanto mais estreita for a rede sensora utilizada. Esta conclusão é fundamentada na análise do gráfico apresentado na figura 36, que mostra variações mais pronunciadas das curvas nas regiões das menores larguras de banda. Desta forma, quando da montagem de um sistema de leitura deste tipo, deve-se procurar gravar redes sensoras tão estreitas quanto possível, a fim de melhorar a resolução do sensor. Desta forma, o estudo com variações de largura de banda da rede sensora foi uma parte importante das simulações computacionais por conduzir a resultados que contribuirão para melhorar o conjunto experimental em trabalhos futuros.

7.2 Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros poderão incluir a montagem do conjunto experimental em uma placa única encapsulada e a realização de medidas experimentais em condições operacionais como sistema de leitura para monitoração em aplicações diversas de sensoriamento.

Além das medidas que incluam tração sobre a rede sensora, poderão ser incluídas medidas com sensoriamento de temperatura e também de compressão axial da rede, para verificar a resposta codificada em intensidade. Além disso, medições simultâneas de variação de parâmetros também são possível objeto de estudo.

Devido aos problemas relativos à variação dos estados de polarização da luz nas configurações experimentais, os trabalhos futuros podem também incluir a montagem de circuitos óticos nos quais se utilizem fibras de alta birrefringência, as quais possibilitam manter o estado de polarização. Além disso, futuras montagens experimentais deverão incluir a utilização do controlador de polarização extra para favorecer a iluminação da rede Hi-Bi de modo a tornar a reflexão dos dois picos desta rede iguais, o que evitaria o indesejável efeito de se dividir a intensidade do feixe transmitido pela intensidade do feixe refletido com este último assumindo valores muito próximos de zero, o que implica em adição de *offset*.

Quanto às simulações computacionais, estas deverão incluir variações de largura

de banda com refletividade mantida constante, o que em termos reais de funcionamento do sistema de leitura representaria uma densidade de energia constante chegando aos fotodetectores, mesmo com variações na largura de banda.

As simulações com a utilização de curvas lorentzianas modelando as redes deverão ser complementadas, sendo que a área total abaixo dos espectros que representam o produto da rede sensora com cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi deverá ser coletada com a técnica de integração direta. Outra complementação às simulações realizadas será a utilização da equação real que dá a refletividade da FBG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HILL, K. O., MELTZ, G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **Journal of Lightwave Technology**, v.15, n. 8, p. 1263-1276, august 1997
- [2] OTHONOS, A. Fiber Bragg Gratings. **Rev. Sci. Instrum.**, v.68, n. 12, p.4309-4341, december, 1997.
- [3] LAM, D.K.W., GARSIDE, B.K. Characterization of Single-mode Optical Fiber Filters. **Applied Optics**, v.20, n.3, p. 440-445, February, 1981
- [4] HILL, K. O.,FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Applied Physics Letters**, v.32, n. 10, p. 647-649, may, 1978
- [5] STONE, J., Photorefractivity in GeO₂ doped silica fibers. **Journal of Applied Physics**, v. 62, n.11, p. 4371-4374, december, 1987
- [6] CULSHAW, B., DAKIN, J. **Optical Fiber Sensors Componentes and Subsistems**. Artech House, Inc. v. III, 1996
- [7] WILLIAMS, D. L., AINSLIE, B.J., ARMITAGE, R., KASHYAP, R., CAMPBELL, R. Enhanced UV Photosensitivity in Boron Codoped Germanosilicate Fibres. **IEEE Electronics Letters**, v.29, n. 1, p. 45-47, january 1993
- [8] KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. Academic Press, 1999
- [9] MELTZ, G., MOREY, W.W., GLEN, W.H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, v.14, n. 15, p. 823-825, august, 1989
- [10] KASHYAP, R.; ARMITAGE, J.R.; WYATT, R.; DAVEY, S.T.; WILLIAMS, D.L. All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm. **IEEE Electronics Letters**, v. 26, n.11, p. 730-732, may, 1990
- [11] OTHONOS, A., LEE, X., Novel and Improved Methods of Writing Bragg Gratings with Phase Masks. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 7, n. 10, p. 1183-1185, october, 1995
- [12] WANG, Y., GRANT, J., SHARMA, A., MYERS, G. Modified Talbot Interferometer for Fabrication of Fiber-Optic Grating Filter Over a Wide Range of Bragg Wavelength and Bandwidth Using a Single Phase Mask. **Journal of Lightwave Technology**, v.19, n. 10, p. 1569-1573, october, 2001

- [13] HILL, K.O.; MALO, B.; VINEBERG, K.A.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D.C.; SKINNER, I. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings. **IEEE Electronics Letters**, v. 26, n. 16, p.1270-1272, august, 1990
- [14] KASHYAP, R.; WYATT, R.; MCKEE, P.F. Wavelength flattened saturated erbium amplifier using multiple side-tap Bragg gratings. **IEEE Electronics Letters**, v.29, n. 11, p. 1025-1026 may, 1993
- [15] WILLIAMS, J.A.R.; BENNION, I.; ZHANG, L. The compression of optical pulses using self-phase-modulation and linearly chirped Bragg-gratings in fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v.7, n. 5, p. 491-493, may, 1995
- [16] FARRIES, M.C.; RAGDALE, C.M.; REID, D.C.J. Broadband chirped fibre Bragg filters for pump rejection and recycling in erbium doped fibre amplifiers. **IEEE Electronics Letters**, V.28, n.5, p. 487-489, february, 1992
- [17] ARCHAMBAULT, J.L.; REEKIE, L.; RUSSELL, P.ST.J. 100% Reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by single excimer laser pulses. **IEEE Electronics Letters**, v. 29, n.5, p. 453-455, march, 1993
- [18] OTHONOS, A.; LEE, X.; MEASURES, R.M. Superimposed multiple Bragg gratings. **IEEE Electronics Letters**, v. 30, n.23, p. 1972-1974, november, 1994
- [19] EGGLETON, B.J.; KRUG, P.A.; POLADIAN, L.; OUELLETTE, F. Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibres. **IEEE Electronics Letters**, v. 30, n.19, p. 1620-1622 november, 1994
- [20] ALFERNESS, R.C., JOYNER, C.H., DIVINO, M.D., MARTYAKM M.J.R., BUHL, L.L. Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides. **Applied Physics Letters**, v. 49, n.3, p.125-127, july, 1986
- [21] KIM, S., KIM, S., KWON, J., LEE, B. Novel fiber Bragg grating sensor demodulator using fiber birefringence. **Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting. LEOS 2000. 13th Annual Meeting. IEEE**, v. 2, n. 13-16, p. 687-688, november, 2000
Digital Object Identifier 10.1109/LEOS.2000.894039
- [22] ZHAO, J., ZHANG, X., HUANG, Y., REN, X. Experimental analysis of birefringence effects on fiber Bragg gratings induced by lateral compression. **Optics Communications**, v. 229, n. 1-6, p. 203-207, january, 2004
- [23] CHEN, G., LIU, L., JIA, H., YU, J., XU, L., WANG, W. Simultaneous pressure and temperature measurement using Hi-Bi fiber Bragg gratings. **Optics Communications**, v. 228, n. 1-3, p. 99-105, december, 2003

- [24] CHEN, G., LIU, L., JIA, H., YU, J., XU, L., WANG, W. Simultaneous Strain and Temperature Measurements With Fiber Bragg Grating Written in Novel Hi-Bi Optical Fiber. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n.1, january, 2004
- [25] CHEHURA, E., YE, C., STAINES, S.E., JAMES, S.W., TATAM, R.P. Characterization of the response of fibre Bragg gratings fabricated in stress and geometrically induced high birefringence fibres to temperature and transverse load. **Smart Materials and Structures**, v. 13, p. 888-895, v. 13, n. 4 2004
- [26] MARTELLI, C., DA SILVA, J.C.C., NOVAES, P.J.D., KALINOWSKI, H.J. Sistema de Leitura para Medidas Estáticas e Dinâmicas. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, v. 17, n.1, p.22-29, março, 2004
- [27] NUNES, L.C.S., VALENTE, L.C.G., BRAGA, A.M.B. Analysis of a demodulation system for Fiber Bragg Grating sensors using two fixed filters. **Optics and Lasers Engineering**, v. 42, n. 5, p. 529-542, november, 2004
- [28] SANDLIN, S., HOKKANEM, A. Embedding Optical Fibers in Metal Alloys. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**, v. 6, n. 2, p.31-36, june, 2003
- [29] MacPHERSON, W.N., FLOCKHART, G.M.H., MAIER, R.R., BARTON, J.S., JONES, J.D.C., ZHAO, D., ZHANG, L., BENNION, I. Pitch and roll sensing using fibre Bragg gratings in multicore fibre. **Measurement Science and Technology**, v. 15, n. 8, p. 1642-1646, august, 2004
- [30] FUKUCHI, K., KOJIMA, S., HISHIDA, Y., ISHI, S., Optical Water-Level Sensors using Fiber Grating Grating Technology. **Hitachi Cable Review**, n. 21, p. 23-28, august, 2002
- [31] MAIER, R.R.J., BARTON, J.S., JONES, D.C., McCULLOCH, S., BURNELL, G. Dual-fibre Bragg grating sensor for barometric pressure measurement. **Measurement Science and Technology**, v. 14, n. 11, p. 2015-2020, november, 2003
- [32] SHENG, H.J., FU, M.Y., CHEN, T.C., LIU, W.F., BOR, S.S. A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, n. 4, p. 1146-1148, april, 2004
- [33] BETZ, D.C., THURSBY, G., CULSHAW, B., STASZEWSKI, W.J. Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings. **Smart Materials and Structures**, v. 12, n. 1, p. 122-128, february, 2003
- [34] FERNANDEZ, A. F., GUSAROV, A., BRICHARD, B., DECRÉTON, M., BERGHMANS, F., MÉGRET, P., DELCHAMBRE, A. Long-term radiation effects on fibre Bragg grating temperature sensors in a low flux nuclear reactor. **Measurement Science and Technology**, v. 15, n. 8, p. 1506-1511, august, 2004

- [35] GÜEMES, J.A., MENENDEZ, J.M., FRÖVEL, M., FERNANDEZ, I., PINTADO, J.M. Experimental analysis of buckling in aircraft skin panels by fibre optic sensors. **Smart Materials and Structures**, v. 10, n. 3, p. 490-496, june, 2001
- [36] KUANG, K.S.C., KENNY, R., WHELAN, M.P., CANTWELL, W.J., CHALKER, P.R. Residual strain measurement and impact response of optical fibre Bragg grating sensors in fibre metal laminates. **Smart Materials and Structures**, v. 10, n. 2, p. 338-346, april, 2001
- [37] SUÁREZ, J.C., REMARTÍNEZ, B., MENÉNDEZ, J.M., GÜEMES, A., MOLLEDA, F. Optical fibre sensors for monitoring of welding residual stresses. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143-144, n. 20, p. 316-320, december, 2003
- [38] GILLOOLY, A.M., CHISOLM, K.E., ZHANG, L., BENNION, I. Chirped fibre Bragg grating optical wear sensor. **Measurement Science and Technology**, v. 15, n. 5, p. 885-888, may, 2004
- [39] FALCIAI, R., TRONO, C., LANTERNA, G., CASTELLI, C. Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg grating sensors. **Journal of Cultural Heritage**, v. 4, n. 4, p. 285-290, october-december, 2003
- [40] MOREY, W.W., MELTZ, G., WEISS, J.M., Separation of Temperature and Strain Measurands in Fiber Bragg Grating Sensors. **Lasers and Electro-Optics Society Meeting, 1992. LEOS '92, Conference Proceedings**
- [41] FRAZÃO, O., SANTOS, J.L., Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibers. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 6, n. 6, p. 553-536, june, 2004
- [42] CAVALEIRO, P.M., ARAÚJO, F.M., FERREIRA, L.A., SANTOS, J.L., FARAH, F. Simultaneous Measurement of Strain and Temperature Using Bragg Gratings Written in Germanosilicate and Boron-Codoped Germanosilicate Fibers. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 11, n. 12, p. 1635-1637, december, 1999
- [43] FRAZÃO, O., LIMA, M.J.N., SANTOS, J.L. Simultaneous measurement of strain and temperature using type I and type IIA fibre Bragg gratings. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 5, n. 3, p. 183-185, may, 2003
- [44] KERSEY, A.D., BERKOFF, T.A., MOREY, W.W. High-Resolution Fibre-Grating Based Strain Sensor With Interferometric Wavelength-Shift Detection. **IEEE Electronics Letters**, v. 28, n.3, p. 236-238, january, 1992
- [45] DAVIS, M.A., KERSEY, A.D. Matched-Filter Interrogation Technique for Fibre Bragg Gratings Arrays. **IEEE Electronics Letters**, v. 31, n.10, p. 822-823, may, 1995

- [46] COROY, T., MEASURES, R.M. Active Wavelength Demodulation of a Bragg Grating Fibre Optic Strain Sensor using a Quantum well Electroabsorption filtering Detector. **IEEE Electronics Letters**, v. 32, n.19, p. 1811-1812, september, 1996
- [47] FALLON, R.W., ZHANG, L., GLOAG, A., BENNION, I. Multiplexed Identical Broad-Band-Chirped Grating Interrogation System for Large-Strain Sensing Applications. **IEEE Photonics Technology Letters**, v.9, n. 12, p. 1616-1618, december, 1997
- [48] GONG, J.M., MacALPINE, J.M.K., CHAN, C.C., JIN, W., ZHANG, M., LIAO, Y.B. A Novel Wavelength Detection Technique for Fiber Bragg Grating Sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14, n. 5, p. 678-680, may, 2002
- [49] MARTELLI, C. **Termômetro para Altas Temperaturas (0-400° C) com Redes de Bragg em Fibra Óptica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2003
- [50] OLIVEIRA, V. **Leitura de Redes de Bragg por Modulação Ótica**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2005
- [51] GIOZZA, W.F., CONFORTI, E. WALDMAN, H. **Fibras Ópticas: Tecnologia e Projeto de Sistemas**. São Paulo: Makron Books, 1999
- [52] HECHT, E. **Optics** 4th Edition San Francisco Addison Wesley, 2002
- [53] UDD, E. **Fiber Optic Sensors: an introduction to engineers and scientists**. New York: John Wiley & Sons, 1991
- [54] REZENDE, S.M. **Materiais e Dispositivos Eletrônicos**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004
- [55] KAMIKAWACHI, R.C. **Estudo de Redes de Período Longo como Elemento Sensor de Hidrocarbonetos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2003
- [56] CULSHAW, B., DAKIN, J. **Optical Fiber Sensors Components and Subsystems**. Artech House, Inc. v. I, 1996
- [57] JEUNHOMME, L.B. **Single Mode Fiber Optics: Principles and Applications**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1990
- [58] SENIOR, J.M. **Optical Fiber Communications: Principles and Practice**. Cornwall: Prentice Hall, 1992
- [59] KASHIMA, N. **Passive Components for Optical Fiber Transmission**. Norwood: Artech House, Inc., 1995

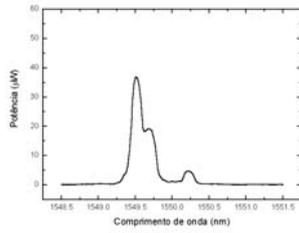
[60] GOWAR, J. **Optical Communication Systems**. 2nd Edition New York: Prentice Hall, 1993

[61] Thorlabs Inc. **Catálogo do Fabricante**. Volume 14, 2002

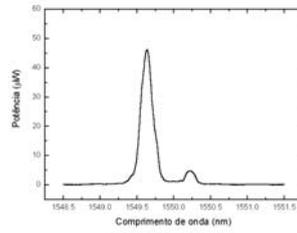
[62] DA SILVA, J.C.C. **Monitoração de Vibração de Estruturas com o Emprego de Sensores em Fibra Ótica**. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2005

[63] HELENE, O.A.M. **Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental** 2^a Edição. Editora Edgard Blücher Ltda

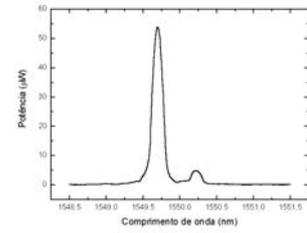
ANEXO A Espectros obtidos a partir da varredura realizada com a montagem proposta na figura 12, para cada posição do parafuso tensor



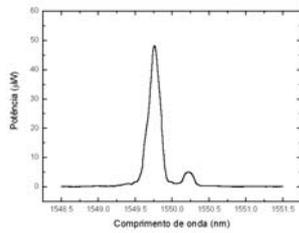
4,500



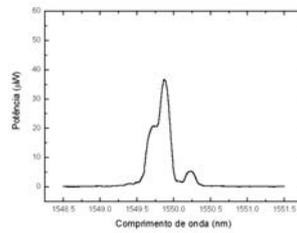
4,750



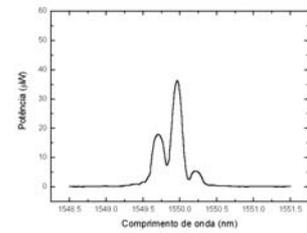
5,000



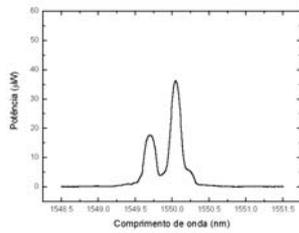
5,250



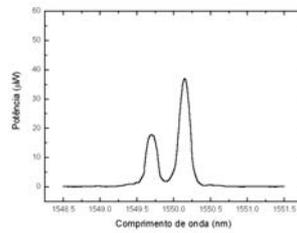
5,500



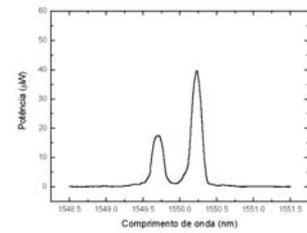
5,750



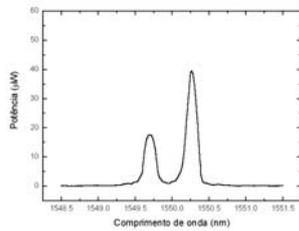
6,000



6,250

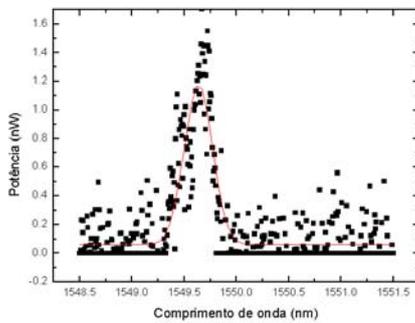


6,500

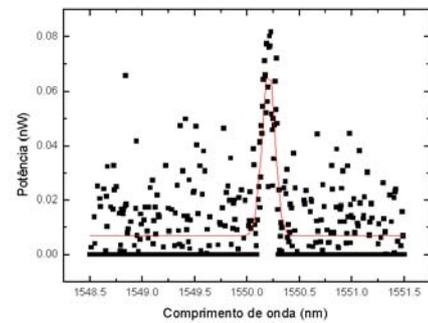


6,625

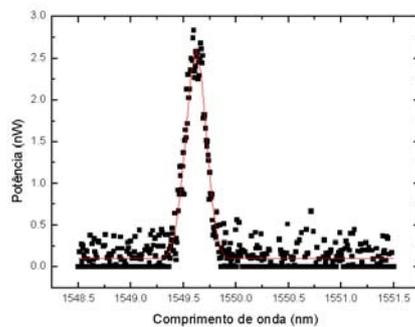
ANEXO B Espectros resultantes da varredura realizada com incremento de um oitavo de volta no parafuso tensor, com a utilização da montagem experimental mostrada na figura 14. A coluna da esquerda exibe os espectros coletados em transmissão pelo polarizador separador de feixe e a coluna da direita exibe os espectros em reflexão.



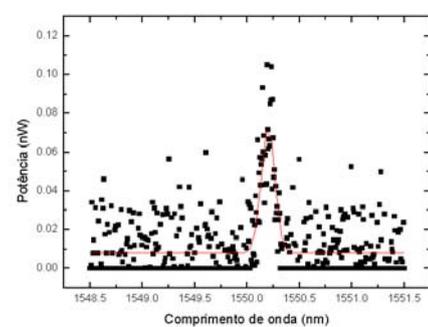
4,500



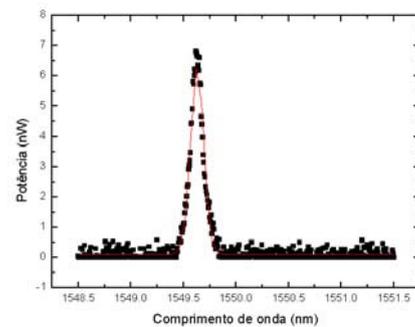
4,500



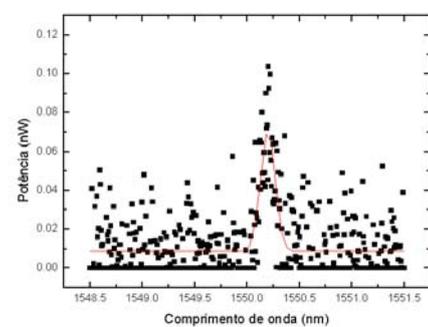
4,625



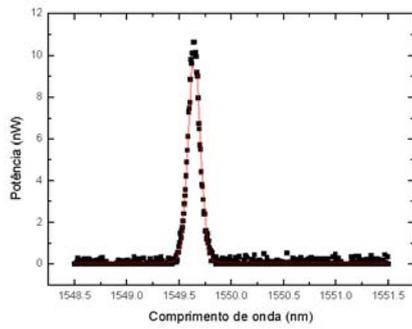
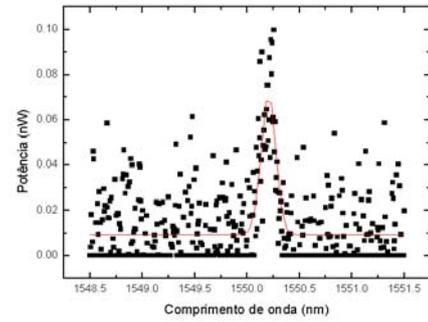
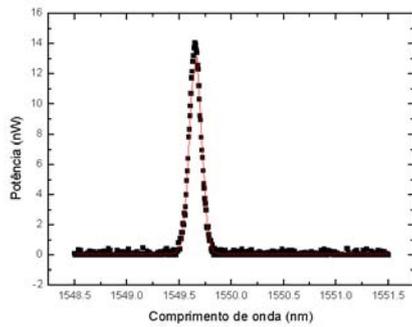
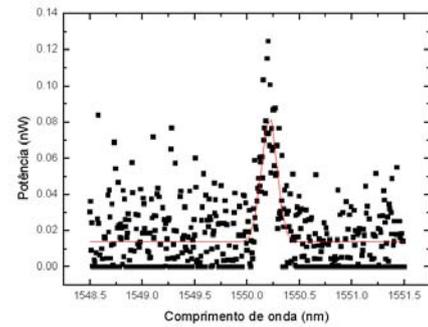
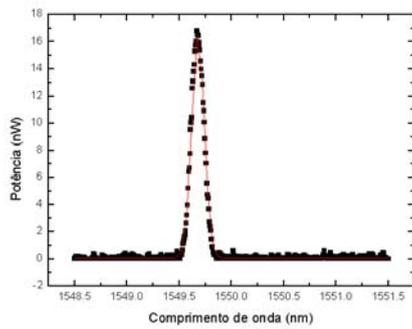
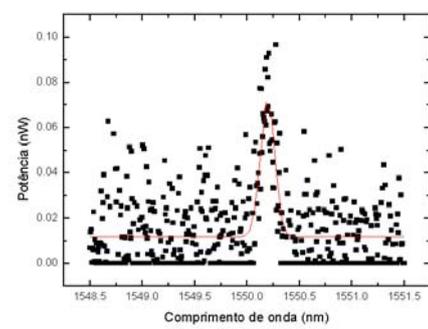
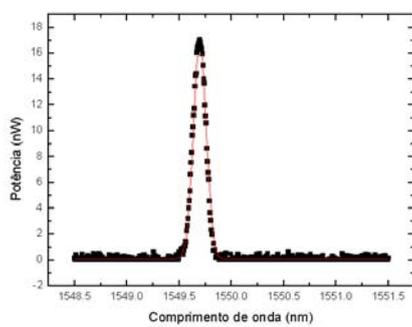
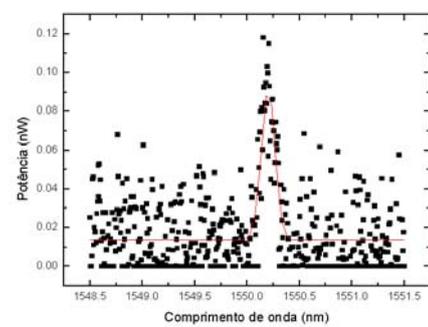
4,625

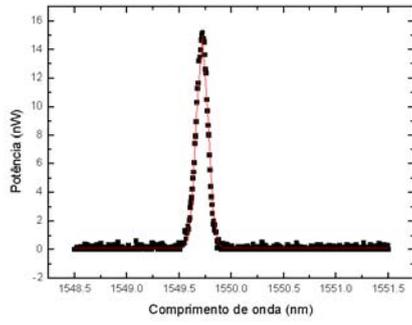


4,750

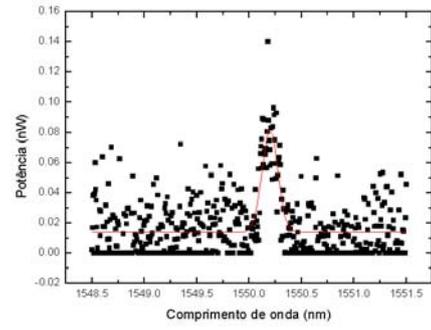


4,750

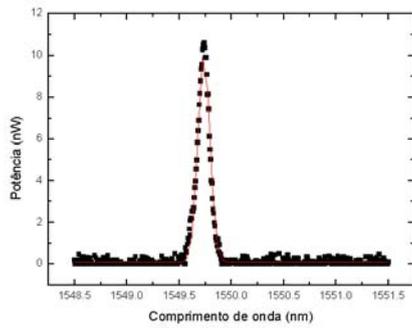
**4,875****4,875****5,000****5,000****5,125****5,125****5,250****5,250**



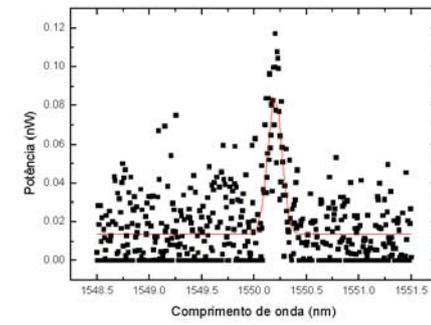
5,375



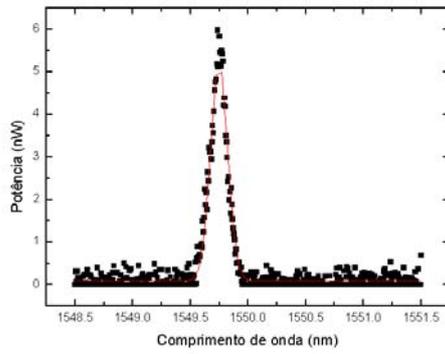
5,375



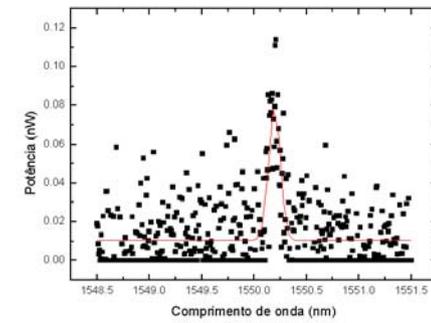
5,500



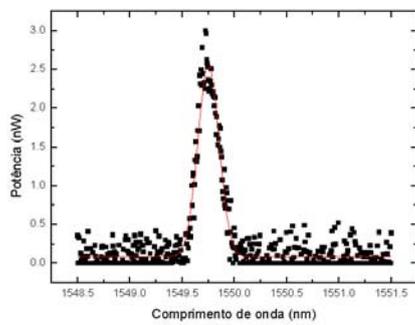
5,500



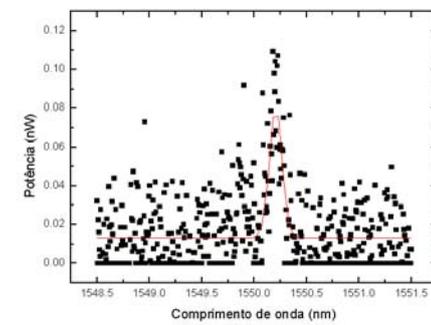
5,625



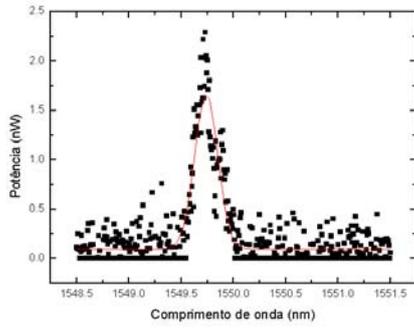
5,625



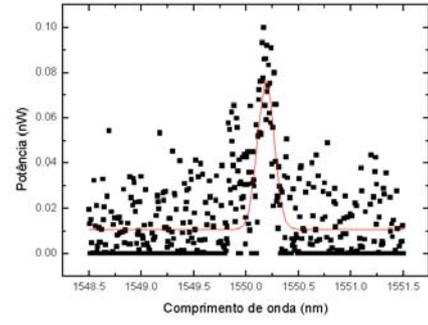
5,750



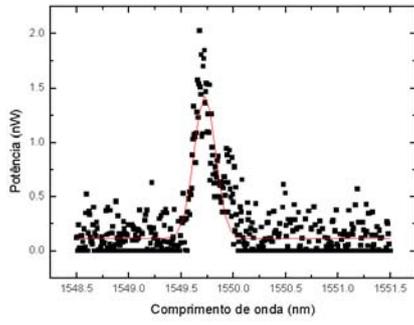
5,750



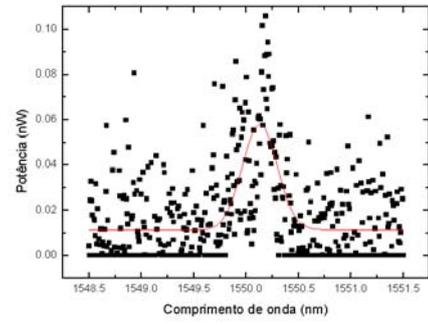
5,875



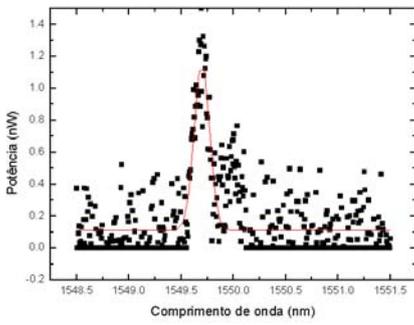
5,875



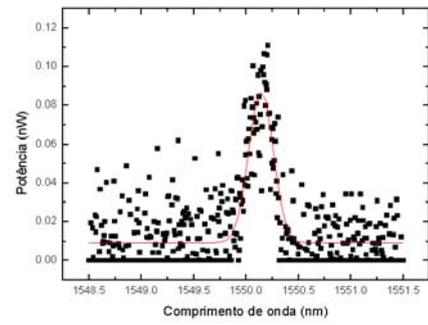
6,000



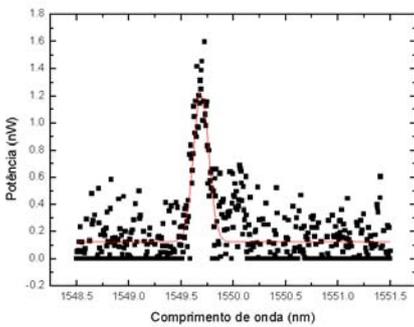
6,000



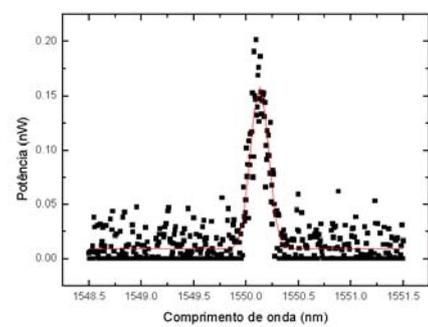
6,125



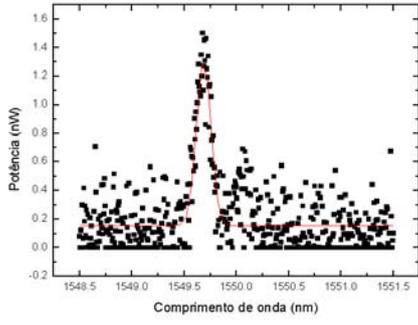
6,125



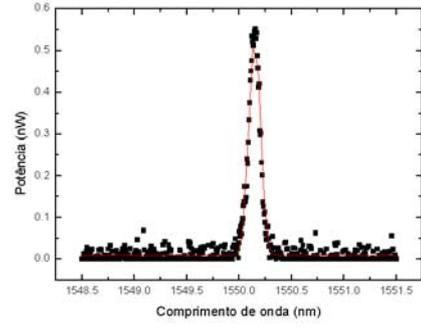
6,250



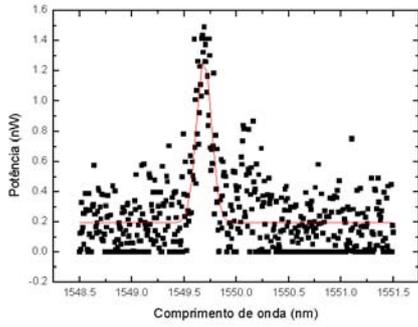
6,250



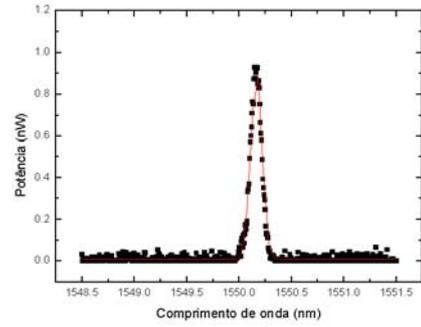
6,375



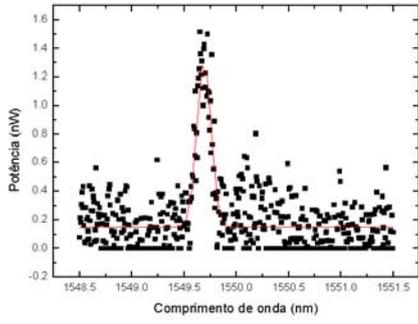
6,375



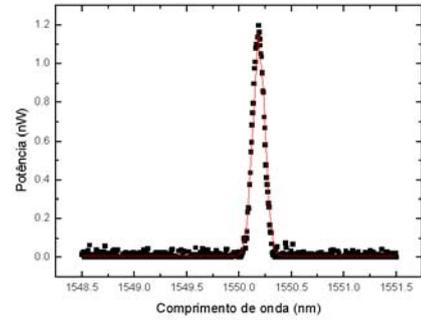
6,500



6,500



6,625

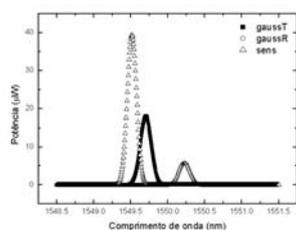


6,625

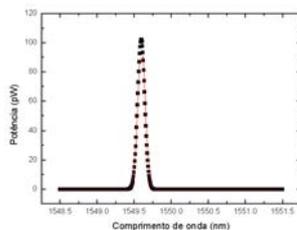
ANEXO C Gráficos resultantes da simulação utilizando o modelo gaussiano, obtidos para cada posição do parafuso tensor

ST - Produto entre rede sensora e lóbulo da rede Hi-Bi associado ao feixe transmitido

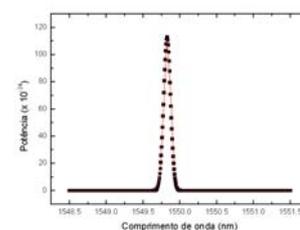
SR - Produto entre rede sensora e lóbulo da rede Hi-Bi associado ao feixe refletido



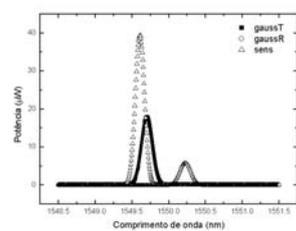
4,500



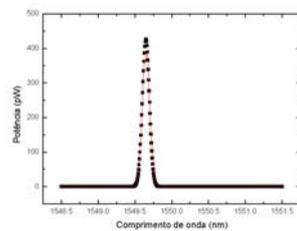
ST



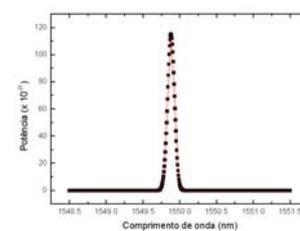
SR



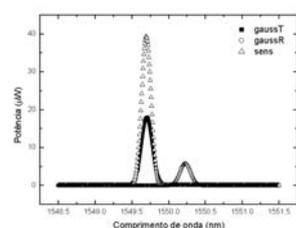
4,750



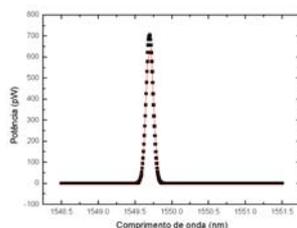
ST



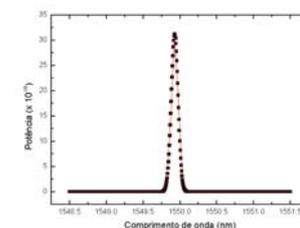
SR



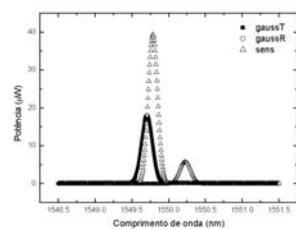
5,000



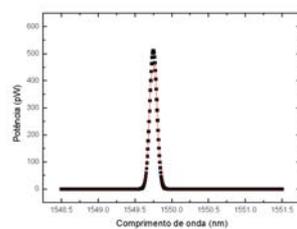
ST



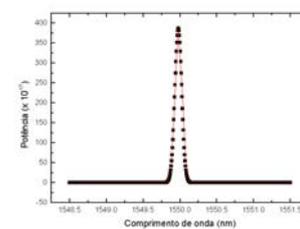
SR



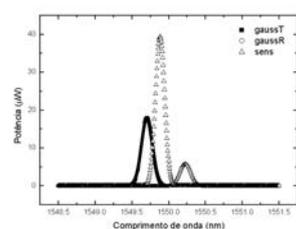
5,250



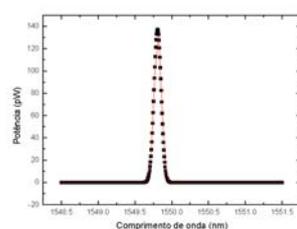
ST



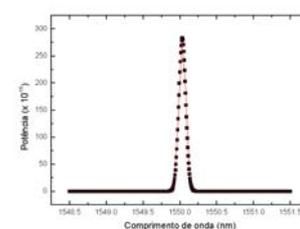
SR



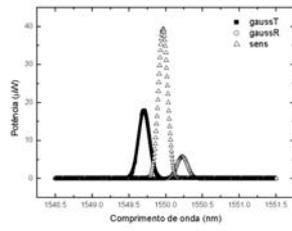
5,500



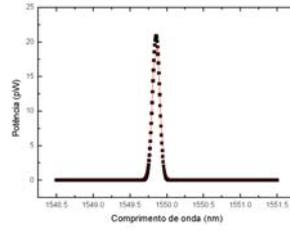
ST



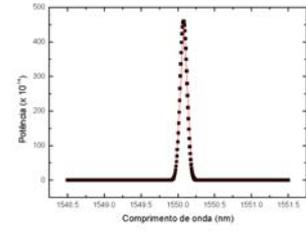
SR



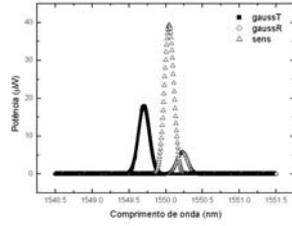
5,750



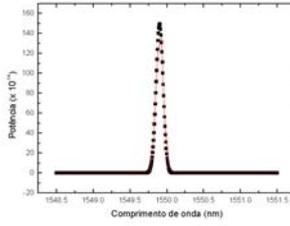
ST



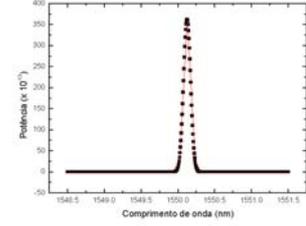
SR



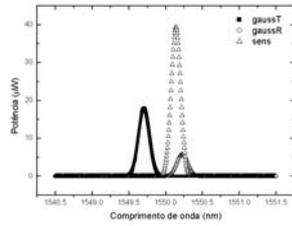
6,000



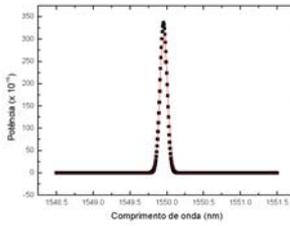
ST



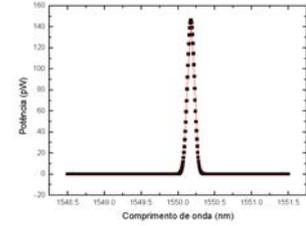
SR



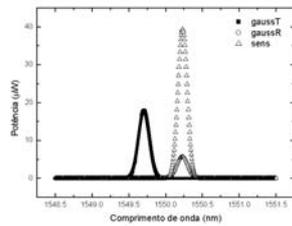
6,250



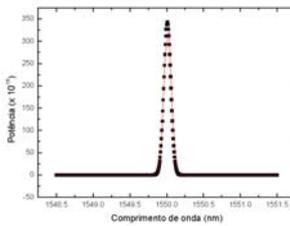
ST



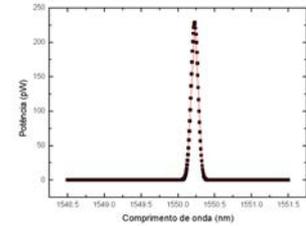
SR



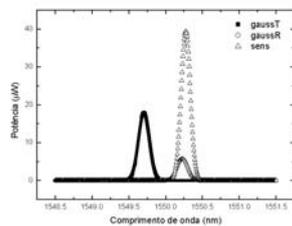
6,500



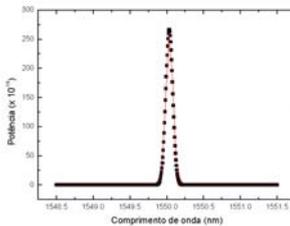
ST



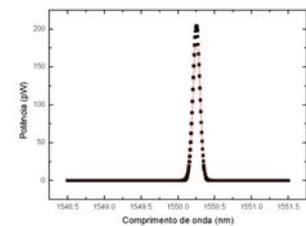
SR



6,625

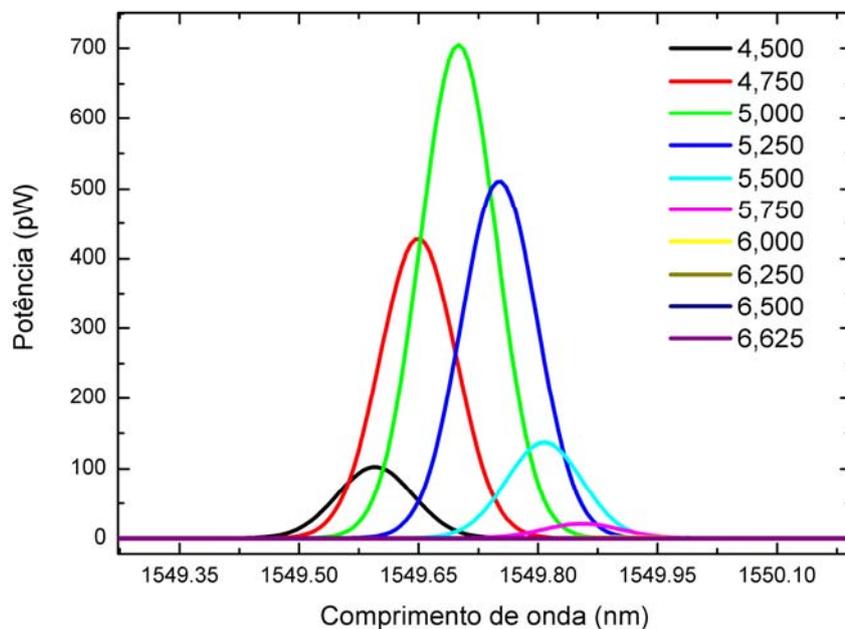


ST

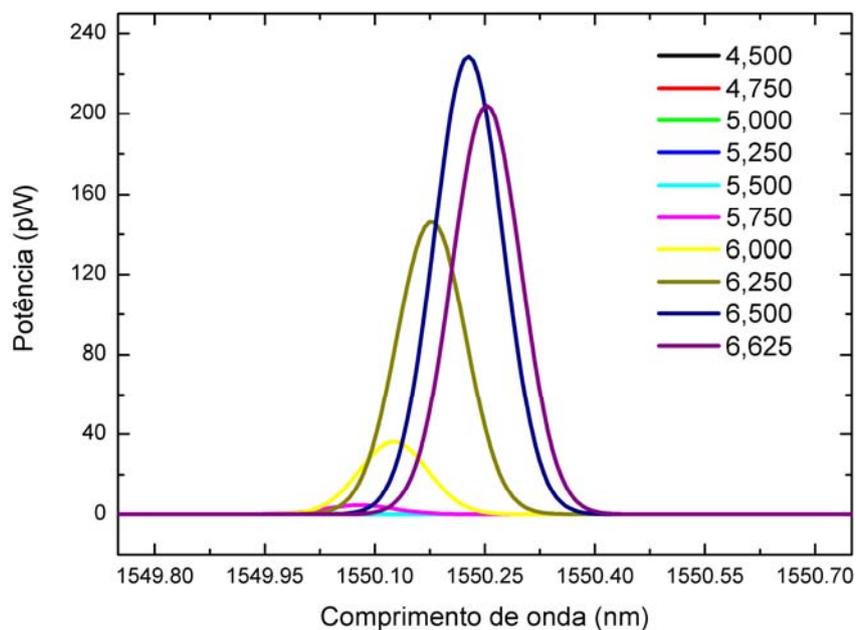


SR

ANEXO C.1 Sobreposição dos espectros de produto entre rede Sensora e cada um dos lóbulos da rede Hi-Bi, para cada uma das posições do parafuso tensor



Sobreposição dos espectros resultantes do produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à transmissão



Sobreposição dos espectros resultantes do produto entre rede sensora e o lóbulo correspondente à reflexão

RESUMO:

Este trabalho descreve a montagem de um circuito óptico que pode ser utilizado como sistema de leitura para sensores a FBG. A principal vantagem do sistema proposto é o baixo custo para a montagem do conjunto experimental, o qual permite a demodulação codificada em intensidade, sendo, portanto uma alternativa atraente para sensoriamento óptico em relação aos usuais sistemas de leitura codificados em comprimento de onda, os quais necessitam da utilização de equipamentos e componentes caros. A montagem mostra ser possível a utilização de fotodetectores para a monitoração em tempo real de variações de tensão mecânica sobre uma rede sensora. Devido ao fato de que o conjunto experimental pode fazer leitura simultânea de dois feixes de luz distintos, possíveis flutuações da fonte luminosa utilizada não interferirão nas medidas. Os resultados foram obtidos com a rede sensora sendo tensionada com um mecanismo que mostra que uma possível aplicação imediata seria a medição de deslocamentos angulares em torno de um eixo acoplado ao mecanismo tensor. Contudo, a maneira como a rede foi tensionada mostra que os resultados podem ser obtidos para quaisquer sistemas de medida que se valham das propriedades foto-elásticas e termo-ópticas das FBG. A validade da montagem proposta como sistema de leitura é comprovada através da comparação entre leituras obtidas com fotodeteccção e analisador de espectros ópticos, sendo confirmada através de simulações computacionais nas quais as FBG são modeladas por curvas gaussianas e lorentzianas. Um resultado importante obtido através das simulações é o fato de a resolução do sistema de leitura ser determinada em função da largura de banda da rede sensora utilizada.

PALAVRAS-CHAVE

Sensores, Sistemas de Leitura, Fotodetectores

ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO

3.04.00.00-7 Engenharia Elétrica

3.04.06.01-3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas,
Antenas

1.05.02.02-5 Ótica

2006

Nº: 404