

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

LUIZ FELIPE RIBEIRO BARROZO TOLEDO

**SINTONIZADOR E DEMODULADOR RÁPIDO DE REDES DE
BRAGG**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CURITIBA

2010

LUIZ FELIPE RIBEIRO BARROZO TOLEDO

**SINTONIZADOR E DEMODULADOR RÁPIDO DE REDES DE
BRAGG**

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

Orientador: Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl

CURITIBA

2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

T649s Toledo, Luiz Felipe Ribeiro Barrozo
Sintonizador e demodulador rápido de redes de Bragg / Luiz Felipe
Ribeiro Barrozo Toledo. — 2010.
70 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Alexandre de Almeida Prado Pohl
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.
Área de concentração: Telemática, Curitiba, 2010.
Bibliografia: f. 68-70

1. Grades de Bragg. 2. Filtros ópticos. 3. Sintonizadores ópticos.
4. Demodulação (Eletrônica). 5. Filtros elétricos de cristal. 6. Engenharia
elétrica – Dissertações. I. Pohl, Alexandre de Almeida Prado, orient.
II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

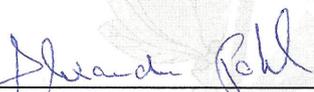
Título da Dissertação Nº 537:

“Sintonizador e Demodulador Rápido de Redes de Bragg”

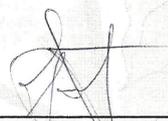
por

Luiz Felipe Ribeiro Barrozo Toledo

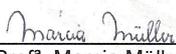
Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telemática, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba às 9h do dia 27 de agosto de 2010. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:



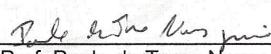
Prof. Alexandre de Almeida Prado Pohl, Dr.
(Presidente – UTFPR Campus Curitiba)



Prof. Aleksander S. Paterno, Dr.
(UDESC)



Profª. Marcia Müller, Dr.
(UTFPR)



Prof. Paulo de Tarso Neves Junior, Dr.
(UTFPR – Campus Toledo)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por cada momento de apoio e motivação, ao meu irmão pelo companheirismo, à Maria Cristina por todo seu amor e compreensão, ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre de Almeida Prado Pohl, ao Carlos Eduardo Neves Mayer, ao Régis Saito, ao Felipe Netto, aos meus amigos e familiares.

Agradeço ao CnPq pelos recursos disponibilizados através do projeto "Desenvolvimento de Técnica de Sintonização Rápida em Grades de Bragg a Fibra Óptica"(CNPQ 473690/2007-1)

RESUMO

TOLEDO, Luiz F.R.B.. Sintonizador e Demodulador Rápido de Redes de Bragg. 70 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

Este trabalho descreve o desenvolvimento de um dispositivo sintonizador de redes de Bragg em fibra óptica que pode ser utilizado como um filtro óptico ou como um sintonizador de canais de comunicação óptica de redes WDM. O dispositivo faz uso de uma peça mecânica que altera o comprimento de onda de Bragg através da compressão da fibra. A peça mecânica é tracionada por um atuador piezoelétrico multicamadas. O dispositivo ainda é composto por um interrogador de redes de Bragg utilizando uma técnica passiva com a utilização de filtro fixo. O filtro fixo utilizado é um cristal com uma camada de filmes finos.

O dispositivo é caracterizado utilizando-se duas redes de Bragg e são avaliados os parâmetros dinâmicos do sistema como a resolução em comprimento de onda e velocidade de sintonização. O sistema de interrogação é ainda descrito através do emprego de simulações computacionais e o sistema desenvolvido é comparado com dados obtidos através de simulações.

Palavras-chave: Redes de Bragg, Filtros Ópticos, Demoduladores Ópticos, Sintonizadores Ópticos

ABSTRACT

TOLEDO, Luiz F.R.B.. Fast Optical Tunnable Filter Based on Fiber Bragg Grating. 70 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

This work describes the development of a device that can be used as a tunable filter based on a Fiber Bragg Grating or as an optical network switch. The device is made of a mechanical system used to compress the fiber optic in witchi the FBG is inscribed. The mechanical device uses a piezoelectrical multilayer actuator. The device also contains a passive Fiber Bragg Grating interrogation system using a fixed filter based on a thin film.

The device is studied with two FBG and the dynamical characteristics of the systems analyzed, especially the wavelength resolution and the tuning velocity. The device is also investigated using digital simulations and the results are compared with these simulations.

Keywords: Fiber Bragg Grating, Optical Filters, Demodulation, Tunable Filter

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Escrita de uma FBG com máscara de fase	17
FIGURA 2	– Perfil de uma FBG	18
FIGURA 3	– Diagrama de uma junção PN	20
FIGURA 4	– Estrutura eletrônica do semiconductor	21
FIGURA 5	– Curva de responsividade de fotodetectores	23
FIGURA 6	– Modelo do fotodetector	23
FIGURA 7	– Efeito Piezoelétrico - (a) livre de forças (b) Sob carregamento mecânico (c) Sob campo elétrico aplicado	25
FIGURA 8	– Diagrama de um PZT multicamadas	27
FIGURA 9	– Histere de um atuador piezoelétrico	27
FIGURA 10	– Filtro seletor baseado em FBG no modo tração	30
FIGURA 11	– FBG sob compressão	30
FIGURA 12	– FBG sob tração e flexão	31
FIGURA 13	– Modulação acusto-óptica	31
FIGURA 14	– Modulação acusto-óptica - (a) Sem sinal aplicado (b) Sinal de baixa frequência (c) Sinal de alta frequência	31
FIGURA 15	– Filtro seletor de canais miniaturizado	32
FIGURA 16	– Esquema de detecção passiva	34
FIGURA 17	– Função de transferência do filtro óptico	34
FIGURA 18	– Técnica Interferométrica	35
FIGURA 19	– Outra técnica interferométrica	36
FIGURA 20	– Técnica de Matched Filter	36
FIGURA 21	– Diagrama de blocos do dispositivo	38
FIGURA 22	– Diagrama do dispositivo - Parte óptica	39
FIGURA 23	– Dispositivo mecânico	40
FIGURA 24	– Circuito de fotodetecção	41
FIGURA 25	– Tensão de saída do circuito de fotodetecção e fotocorrente	41
FIGURA 26	– Função de transferência do sistema com filtro RC	42
FIGURA 27	– FBG simulada	44
FIGURA 28	– Fonte simulada	44
FIGURA 29	– FBG filtrada	44
FIGURA 30	– Relações de potência	45
FIGURA 31	– Espectro do filtro linear do fabricante com inclinação positiva	46
FIGURA 32	– Espectro do filtro linear do fabricante com inclinação negativa	46
FIGURA 33	– Suporte do filtro óptico	47
FIGURA 34	– Espectro do filtro linear com inclinação positiva	47
FIGURA 35	– Espectro do filtro linear com inclinação negativa	47
FIGURA 36	– Comparação dos espectros dos filtros com inclinação positiva	48
FIGURA 37	– Comparação dos espectros dos filtros com inclinação negativa	48
FIGURA 38	– Projeto do suporte do filtro	49
FIGURA 39	– Resposta espectral do filtro linear com novo suporte	49
FIGURA 40	– Comparação das respostas espectrais do filtro linear	50

FIGURA 41 – Esquema elétrico da fonte Buck	50
FIGURA 42 – Resposta da fonte CC-CC	51
FIGURA 43 – Diagrama de blocos do dispositivo	51
FIGURA 44 – Fonte ASE	52
FIGURA 45 – Espectro de reflexão da FBG comprimida	52
FIGURA 46 – Espectro de reflexão da FBG enviada ao fotodetector	53
FIGURA 47 – Espectro de reflexão da FBG enviada pelo filtro	53
FIGURA 48 – Relação entre as potências P2 e P1	54
FIGURA 49 – Sintonização empregado FBG com 3mm de comprimento	54
FIGURA 50 – Reflexão da FBG sem passar pelo filtro óptico	55
FIGURA 51 – Reflexão da FBG passando pelo filtro óptico	55
FIGURA 52 – Curva da relação entre potência do sinal filtrado e não filtrado	56
FIGURA 53 – Curva da relação entre potência do sinal filtrado e não filtrado entre 0V e 35V	57
FIGURA 54 – Esquema do ensaio de velocidade de sintonização	58
FIGURA 55 – Banco de canais WDM	58
FIGURA 56 – Sintonização de canal	59
FIGURA 57 – Sintonização de canal - C7 para C8	59
FIGURA 58 – Sintonização de canal - C8 para C7	60
FIGURA 59 – Sinal de controle	61
FIGURA 60 – Sinal de sintonização. De 1550nm para 1547nm	62
FIGURA 61 – Sinal de sintonização. De 1547nm para 1550nm	62
FIGURA 62 – Esquema do ensaio de calibração	62
FIGURA 63 – Espectro do laser sintonizável	63
FIGURA 64 – Ensaio de interrogação	63
FIGURA 65 – Relação entre potências	64

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– Energia de banda proibida	22
TABELA 2	– Aplicações de dispositivo piezoelétrico	26
TABELA 3	– Potências medidas	53
TABELA 4	– Potências medidas	56

LISTA DE SIGLAS

FBG	Fiber Bragg Grating
WDM	Wavelength Division Multiplexing
UV	Ultra Violeta
APD	Avalanche Photodiode
CCD	Charge-Coupled Device
PZT	Lead Zirconate Titanate
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
FWHM	Full Width Half Maximum
OSA	Optical Spectrum Analyser
OPD	Optical Path Difference
MOEMS	Micro Opto Electro Mechanical Systems
CA/CC	Corrente Alternada/Corrente Contínua
USB	Universal Serial Bus
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light Emitting Diode
PWM	Pulse Width Modulation

LISTA DE SÍMBOLOS

λ_b	Comprimento de onda de Bragg
η_e	Índice efetivo
Λ	Período da FBG
E	Energia
h	Constante de Plank
f	Frequência
η	Eficiência Quântica
R	Responsividade

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Motivação	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo Geral	13
1.2.2	Objetivos Específicos	14
1.2.3	Estrutura do Trabalho	14
2	Fundamentação Teórica	15
2.1	Redes de Bragg em Fibras Ópticas	15
2.2	Fotodeteção	19
2.3	Dispositivo Piezoelétrico	24
2.4	Sistemas de sintonização	28
2.5	Sistemas de interrogação	32
3	Descrição do Sistema	37
3.1	Dispositivo desenvolvido	37
3.2	Ajuste do circuito de fotodeteção	40
4	Resultados	43
4.1	Simulação do sistema de interrogação de FBG	43
4.2	Caracterização do filtro óptico linear	45
4.3	<i>Driver</i> do atuador piezoelétrico	50
4.4	Ensaio de sintonização	51
4.5	Ensaio de velocidade de sintonização	57
4.6	Ensaio do sistema de interrogação	62
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	66
5.1	Conclusão	66
5.2	Trabalhos futuros	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

A demanda por capacidade de transmissão de informação tem crescido drasticamente nas últimas décadas. Esse crescimento é facilitado pela diminuição do custo de transmissão, devido principalmente à estabilização de tecnologias, ao surgimento de novas tecnologias e ao surgimento de novas metodologias de gestão de informação. Esse aumento da demanda vem tanto de necessidades econômicas quanto de necessidades sociais.

As comunicações ópticas têm um papel fundamental nesse cenário para se obter as grandes taxas de transmissão necessárias pelas demandas atuais. Mesmo com o crescimento enorme das comunicações sem fio nas últimas décadas, a comunicação óptica é fundamental para interligar grandes blocos de consumidores aos grandes nós, bem como para interligar diversos nós. Atualmente não há outra tecnologia que possa substituir os avanços alcançados pelas comunicações ópticas nas últimas décadas e em especial, que garantam altas taxas de transmissão, alta confiabilidade na transmissão, imunidade eletromagnética e, ainda, alta capacidade de gerenciamento.

As redes de comunicação óptica com multiplexação no domínio do comprimento de onda (WDM - Wavelength Division Multiplexing) são de extrema importância para viabilizar a grande capacidade de transmissão de dados. Dentre os diversos componentes existentes em tais redes, os dispositivos responsáveis pelo gerenciamento e processamento dos canais ópticos são de grande importância.

Um dispositivo capaz de inserir, remover e rotear uma portadora óptica de uma rede de comunicação WDM deve apresentar duas importantes características: velocidade de chaveamento e grande faixa espectral de operação. Portanto, há um enorme interesse em desenvolver dispositivos com tais características. Um dispositivo que possa manipular e processar o sinal no domínio óptico, sem a necessidade de conversões eletro-ópticas, torna-se um elemento de extrema valia. Nesse contexto as redes de Bragg em fibra óptica adquirem enorme importância.

A FBG - Fiber Bragg Grating, como será descrito no capítulo a seguir é uma estrutura inscrita em uma fibra óptica e que funciona basicamente como um filtro rejeita-faixa. Sua resposta espectral pode ser modificada por temperatura, tração e compressão, mecanismos estes que permitem torná-la um processador controlável de sinais no domínio óptico e de grande utilidade na área de sensoriamento.

Há uma série de estudos relacionados à confecção e manipulação de FBGs com fins de processamento de sinais, muitos deles dedicados ao controle de sinais em redes WDM. Deve-se salientar ainda que o emprego da FBG, tanto na área de processamento como na área de sensoriamento faz uso de equipamentos de interrogação. A técnica de interrogação da FBG é um fator de extrema importância para viabilizar o emprego comercial da FBG tanto na área de sensoriamento como na área de processamento.

Apesar da existência de trabalhos relacionados ao processamento de sinais empregando FBG, estes dispositivos ainda não satisfizeram todos os requisitos de um sintonizador de canais WDM, quais sejam: velocidade de chaveamento e grande faixa espectral de operação.

Assim, com o intuito de buscar uma melhora dessas características, este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo capaz de sintonizar o comprimento de onda de Bragg da FBG, acionada por um atuador piezoelétrico multicamadas. A sintonização é obtida através da compressão da fibra óptica, usando-se uma estrutura mecânica especialmente projetada para este fim. O protótipo desenvolvido pode ser empregado em sistemas de multiplexação/demultiplexação de comprimento de onda ou como um filtro óptico.

O dispositivo ainda é composto por um sistema passivo de interrogação que emprega filtros fixos e que foi concebido de forma a ser de baixo custo e ainda apresentar uma resposta rápida de interrogação do comprimento de onda de Bragg.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um dispositivo capaz de sintonizar de forma rápida uma rede de Bragg inscrita em fibra óptica, utilizando um atuador piezo-elétrico multicamadas. Para atingir este objetivo foi necessário o estudo dos seguintes tópicos:

- Redes de Bragg escritas em fibra óptica,
- Atuadores piezoelétricos,

- Controle de atuadores piezoelétricos,
- Sistemas de interrogação de redes de Bragg.

Após o estudo desses itens foi possível a elaboração do projeto, o desenvolvimento e validação de um dispositivo eletrônico que pode ser empregado como seletor de canais em redes de comunicação óptica de multiplexação em comprimento de onda - WDM ou como um filtro óptico.

1.2.2 Objetivos Específicos

Desenvolver um dispositivo sintonizador e interrogador de redes de Bragg em fibra.

1.2.3 Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em 5 capítulos conforme descrição a seguir.

No capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica, no qual são apresentadas as principais características das redes de Bragg em fibra. Nesse capítulo será também apresentado o princípio de funcionamento de dispositivos piezoelétricos, as principais características dos elementos fotodetectores bem como as topologias de sistemas de sintonização e interrogação de redes de Bragg já desenvolvidas.

O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do dispositivo bem como as características específicas de cada um dos módulos constituintes. Os principais resultados com o sistema desenvolvido são mostrados no Capítulo 4. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões sobre os resultados obtidos bem como propostas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um dispositivo sintonizador de canais em sistemas WDM pode ser produzido utilizando-se uma rede de Bragg, que será responsável pela sintonização do canal desejado. Para tanto é necessário alterar o comprimento de onda de Bragg em que a rede está sintonizada, e para essa tarefa pode-se utilizar um dispositivo piezoelétrico capaz de tracionar ou comprimir a fibra óptica em que a FBG está inscrita. Adicionalmente, esse dispositivo deve possuir um mecanismo de realimentação com o intuito de verificar o comprimento de onda em que o dispositivo está efetivamente sintonizado. Essa função de verificação do comprimento de onda no qual a FBG está sintonizada chama-se demodulação ou interrogação. Nas sessões seguintes serão apresentados e discutidos todos os fundamentos utilizados para a confecção de um dispositivo sintonizador e demodulador de redes de Bragg em fibras ópticas.

2.1 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓPTICAS

O avanço no desenvolvimento de fibras ópticas nas últimas décadas tem sido imenso. Essa evolução viabiliza o emprego das comunicações ópticas entre grandes distâncias e a altas taxas de transmissão, possibilitando o uso cada vez maior de conteúdo digitalizado e on-line em diversas situações, tanto nas áreas industriais, comerciais ou mesmo residenciais. Tanto o volume de dados trafegados por segundo terá um grande incremento nos próximos anos, como também os requisitos de segurança de informação. Outro aspecto de extrema importância para viabilizar a construção de uma rede avançada de comunicação óptica é o custo dos dispositivos envolvidos, pois é necessário que cada usuário possua um dispositivo de transmissão e recepção de luz. Segundo Chanclou (CHANCLOU et al., 2006) e Green (GREEN, 2004) essa rede do futuro deverá ser passiva, ou seja, deverá operar somente no domínio óptico.

Para tanto, a pesquisa e desenvolvimento em dispositivos que viabilizem o processamento de luz no domínio óptico se faz necessário. Um desses dispositivos é a FBG, que é uma estrutura formada por uma variação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica no sentido longitudinal. Essa estrutura tem a propriedade de refletir alguns comprimentos de onda,

enquanto permite que outros sejam transmitidos, ou seja, essa estrutura apresenta a característica de um filtro rejeita-faixa, porém no domínio óptico.

A variação da característica espectral da FBG é dependente de fatores externos como temperatura e forças aplicadas sobre ela. Portanto, após sua fabricação, qualquer variação na sua forma física, ou qualquer efeito que propicie mudanças físicas na fibra modificará a característica espectral da FBG.

Evidentemente essa característica da FBG, bem como a possibilidade de modificação de sua propriedade espectral ao longo do tempo, tem uma infinidade de aplicações em comunicações ópticas. Pode-se, por exemplo, fazer seleção de canais em sistemas WDM, viabilizando a construção de roteadores de sinais e no domínio óptico como mostrado em (IOCCO et al., 1999). Além do emprego em comunicações ópticas, a forte dependência de suas características físicas, seu uso na área de sensoriamento é muito importante (JERSEY et al., 1997). Assim, pode-se utilizá-la como sensores de temperatura, sensores de tração e compressão, entre outros.

Portanto, a FBG representa um importante elemento de processamento de sinal no domínio óptico e ainda um importante elemento de sensoriamento em diversas áreas de engenharia. A fim de empregá-las efetivamente como elementos de sensoriamento ou processamento, deve-se atentar para diversas técnicas construtivas a fim de selecionar, por exemplo, a faixa espectral de operação.

A variação periódica do índice de refração da fibra é obtida fazendo-se uso do fenômeno da fotossensibilidade existente ou produzida na própria fibra óptica. Fotossensibilidade refere-se a mudança permanente do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica quando a fibra é exposta a luz com características específicas de intensidade e comprimento de onda (OTHONOS; KALLI, 1999). Portanto, quando em uma fibra óptica fotossensível é incidido um feixe de radiação UV - Ultra Violeta, a radiação interage com os defeitos existentes na estrutura molecular da fibra de modo a alterar o índice de refração no local de incidência. Através do controle dos locais de incidência é possível construir uma estrutura que possua um perfil modulado de índice de refração. Esse perfil modulado funciona como uma Rede de Difração. Uma discussão mais completa sobre os fenômenos da fotossensibilidade pode ser encontrada em (KASHYAP, 2006).

Existem diversas formas de FBGs. As técnicas de fabricação de FBGs, segundo (KASHYAP, 2006), são divididas em dois grupos, a saber:

- Redes do tipo Hill
- Redes do tipo não-Hill, comumente chamadas de FBG - Fiber Bragg Grating

As redes do tipo Hill são fabricadas através da interação entre as moléculas de sílica que constituem a fibra com a radiação enviada pelo núcleo da mesma, como descrito por Hill et al (HILL et al., 1978), enquanto que as redes do tipo não-Hill são produzidas através da interação entre as moléculas de sílica e a radiação proveniente do exterior da fibra. Tipicamente, o comprimento de onda utilizado para fabricação das FBGs do tipo Hill é próximo do comprimento de onda de utilização da FBG, diferentemente do que ocorre com as redes do tipo não-Hill. Atualmente as técnicas de fabricação de redes do tipo não-Hill são mais utilizadas.

Existem dois métodos de escrita de FBGs do tipo não-Hill. O método holográfico, descrito por Morey (MOREY; MELTZ; GLENN, 1990) e o método descrito por Hill (HILL et al., 1990). O método holográfico consiste em se dividir um feixe de luz UV em dois, e estes, em seguida, são recombinados e provocam interferência sobre a fibra óptica. O método descrito por Hill faz uso de uma máscara de fase a fim de gerar um padrão de interferência que é focalizado por meio de lentes no núcleo da fibra óptica. O esquema de escrita da FBG utilizando uma máscara de fase é mostrado na Figura 1.

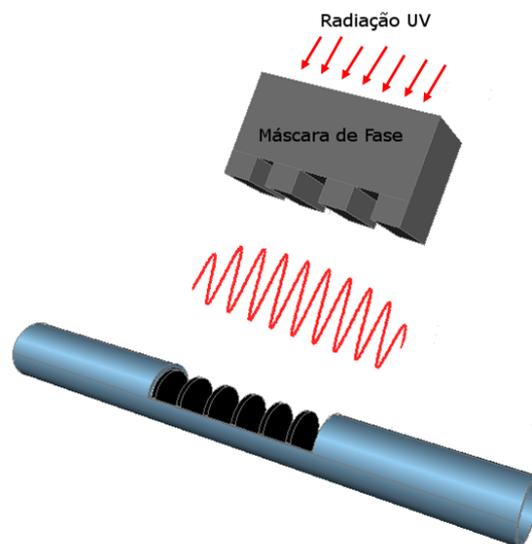


Figura 1: Escrita de uma FBG com máscara de fase

Pelo controle da distância da máscara de fase, bem como do ângulo de incidência do feixe UV em relação à fibra é possível determinar o período da estrutura formada. Além da possibilidade de fabricação de redes periódicas existe uma série de outros tipos de redes, como as redes de perfil apodizados e redes com perfil em gorjeio. Cada perfil de modulação do índice de refração resulta em um perfil espectral característico para o filtro óptico. O funcionamento da FBG pode ser explicada pela teoria dos modos acoplados, cuja descrição pode ser encontrada em (KASHYAP, 2006) e (OKAMOTO, 2006).

A figura 2 mostra o funcionamento da FBG como um filtro rejeita faixa. O sinal óptico de

grande largura espectral incidente na fibra é filtrado pela FBG, uma parcela é refletida e a outra transmitida. O espectro refletido pela FBG é centrado no comprimento de onda conhecido como comprimento de onda de Bragg, λ_b . Esse valor está relacionado com o período e magnitude da modulação periódica do índice de refração da FBG resultante do processo de fabricação. A Figura 2 mostra esquematicamente o período da FBG e a expressão 1 descreve como esse período afeta o comprimento de onda de Bragg.

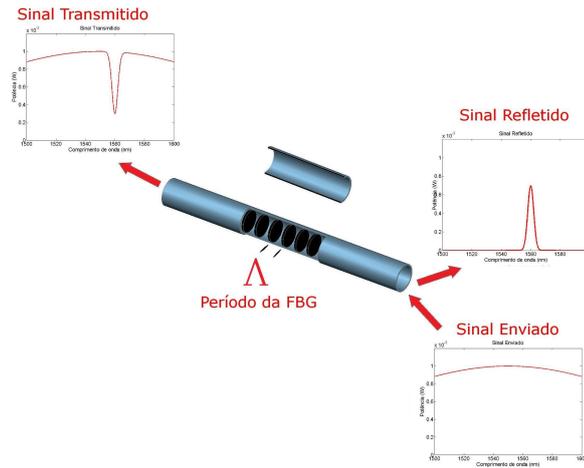


Figura 2: Perfil de uma FBG

$$\lambda_b = 2\eta_e\Lambda \quad (1)$$

Nessa expressão, η_e é o índice de reflexão efetivo do modo fundamental propagante na fibra e Λ é o período da rede fabricada. Devido ao fato do período estar inscrito na fibra, qualquer variação na estrutura mecânica desta pode modificá-lo. Ou seja, o período da fibra e, portanto, o comprimento de onda de Bragg pode ser modificado por compressão ou tração da fibra. Variações de temperatura também podem provocar variação no comprimento de onda de Bragg. Adicionalmente o efeito foto-elástico também modifica o comprimento de onda de Bragg. A equação que governa tais mudanças seja devido à tração, compressão e temperatura é descrita por (2).

$$\Delta\lambda_b = 2 \left[\Lambda \frac{\delta\eta_e}{\delta L} + \eta_e \frac{\delta\Lambda}{\delta L} \right] \Delta L + 2 \left[\Lambda \frac{\delta\eta_e}{\delta T} + \eta_e \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \right] \Delta T \quad (2)$$

A expressão (2) relaciona a variação do comprimento de onda de Bragg, com a variação do comprimento axial da fibra (ΔL) bem como com a variação de temperatura (ΔT). O primeiro termo da equação (2) está relacionado com a variação do espaçamento da grade e da variação do índice de refração em relação ao comprimento. O segundo termo está relacionado ao coeficiente

de expansão térmica e ao coeficiente termo-óptico da fibra óptica.

Pela análise da equação (2) fica evidente, portanto, a viabilidade do emprego da FBG tanto na área de sensoriamento, quanto na área de comunicações ópticas. Nesse trabalho considera-se o regime de operação à temperatura constante, ($\Delta T = 0$).

Adicionalmente à análise da variação do comprimento de onda de Bragg, em relação a variação do comprimento axial da fibra óptica e da variação da temperatura, a análise da refletividade da FBG deve ser corretamente entendida para que seu pleno uso seja possível. Em (OTHONOS; KALLI, 1999) são descritas as características que afetam o perfil de refletividade. Em especial, deve-se notar que o comprimento físico da FBG e a amplitude de modulação do índice de refração estão diretamente relacionadas com sua refletividade.

2.2 FOTODETECÇÃO

Uma das áreas de suma importância no estudo e aplicação da fotônica é a fotodeteccção. A deteccção e a medição de ondas eletromagnéticas podem ser divididas em dois grupos, de acordo com o comprimento de onda da radiação em estudo:

- Radiometria
- Fotometria

O comprimento de onda da radiação óptica no espectro eletromagnético vai de $1nm$ até $1mm$. A faixa conhecida como ultravioleta refere-se ao comprimento de onda de $1nm$ até $0,38\mu m$, a faixa do espectro visível está na região de $0,38\mu m$ até $0,78\mu m$ e a faixa do espectro eletromagnético de $0,78\mu m$ até $1mm$ refere-se a região do infravermelho. O estudo da energia transferida pela radiação eletromagnética é conhecido como Radiometria, porém quando a radiação eletromagnética está na faixa do visível, esse estudo é chamado de Fotometria (SHARUPICH; TUGOV, 1987). Esse trabalho tratará das ondas eletromagnéticas na faixa do Infra Vermelho Próximo ($0,78$ até $3\mu m$).

A deteccção de potência óptica é compreendida através de dois princípios básicos: deteccção térmica e deteccção fotoelétrica. A deteccção térmica é baseada na conversão da energia de um fluxo de fótons incidente em calor. Por se tratar de um dispositivo tipicamente ineficiente e ter uma resposta lenta seu uso não é comum em aplicações de fotônica. O outro método, conhecido como deteccção fotoelétrica consiste na conversão da energia de um fluxo de fótons incidente em uma transição eletrônica passível de ser identificada por meio de medida de corrente ou tensão.

A fotoeletricidade pode ser expressa através de dois modos. O primeiro, conhecido como efeito fotoelétrico externo, trata da emissão de elétrons por uma superfície após a absorção de fótons pela mesma. Esses dispositivos são comumente empregados em detecção de imagem. O segundo é conhecido como efeito fotoelétrico interno, que é baseado também em uma transição eletrônica, porém sem haver nenhum tipo de emissão de elétrons pelo material.

Os fotodetectores baseados no efeito fotoelétrico interno são comumente formados por uma junção composta de uma camada semicondutora extrínseca do tipo P com uma camada semicondutora extrínseca do tipo N. Essa junção, conhecida como junção P-N, forma um perfil de concentração de portadores de carga (buracos e elétrons). Esse dispositivo, chamado de fotodi-odo, é mostrado na Figura 3.

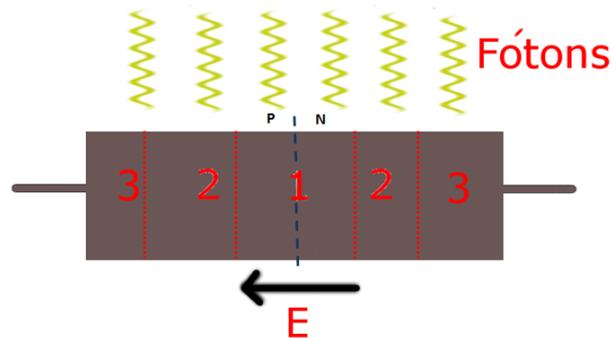


Figura 3: Diagrama de uma junção PN

A incidência de fótons pode ocorrer ao longo de todo elemento, porém caso ela ocorra na camada conhecida como faixa de depleção, representado pelo número 1 na figura 3, os portadores de carga criados pela incidência do fóton são rapidamente separados pela existência de um campo elétrico nesse local, de modo a criar um corrente elétrica. Caso a incidência do fóton ocorra nas regiões próximas da faixa de depleção, representado pelo número 2 na Figura 3, alguns elétrons podem penetrar na faixa de depleção e os portadores de carga recém criados são assim separados. Entretanto, caso a incidência do fóton ocorra longe da faixa de depleção, representado pelo número 3 na Figura 3, a probabilidade de separação dos portadores de carga é muito baixa, de modo que esses são rapidamente recombinados. A velocidade de separação dessas cargas no interior do elemento são de extrema importância para a caracterização e operação do dispositivo.

Uma maneira de tornar mais eficiente o processo de separação dos portadores de cargas criados pela incidência do fóton é a inserção de uma camada semicondutora intrínseca ou levemente dopada entre as camadas P e N. Essa inserção faz com que o campo elétrico no interior da estrutura seja levemente superior ao encontrado na junção formada apenas pelas camadas PN, e esse alongamento possibilita uma maior probabilidade de separação dos portadores de

carga. O nome do dispositivo com a inserção da camada semicondutora intrínseca, ou camada I, é conhecido como fotodetector PIN.

O efeito de criação dos portadores de cargas nos semicondutores através da interação com fótons pode ser melhor entendido pela análise da Figura 4.

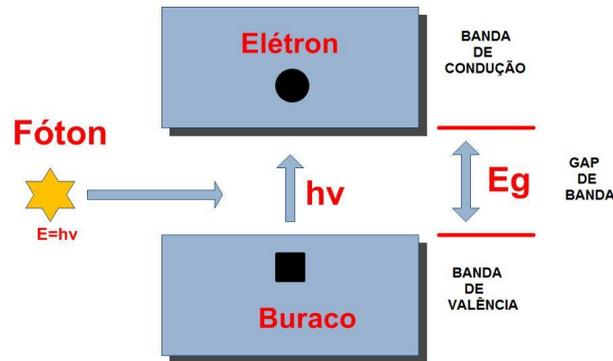


Figura 4: Estrutura eletrônica do semicondutor

Um semicondutor tem sua banda de valência completa, e nenhum elétron livre na banda de condução, diferentemente dos materiais condutores. Porém diferentemente dos materiais dielétricos, a energia necessária para levar um elétron da banda de valência para a banda de condução está entre $0,1eV$ e $3eV$. De modo que, através de elevação de temperatura ou mesmo através da incidência de um fóton, cuja energia é dada por $E = hf$, sendo E a energia do fóton, h a constante de Plank e f a frequência do fóton incidente, esse elétron pode facilmente saltar para a camada de condução. Ou seja, através do aumento da energia do sistema é possível alterar a condutividade do material. A energia necessária para fazer esse salto é conhecida como energia da banda proibida (*bandgap energy*).

A Tabela 1 mostra o valor dessa energia, bem como o comprimento de onda equivalente, necessário para causar o salto entre a banda de valência e a banda de condução para diversos materiais semicondutores à temperatura de $300K$.

Além do fotodiodo PN e PIN, existe um outro fotodiodo conhecido como *Avalanche*, cuja sigla em inglês é APD - (*Avalanche Photodiode*). Esse fotodiodo tem a propriedade de provocar a geração de portadores de cargas em cascata após a incidência de um fóton. Esse dispositivo é comumente empregado para detecção de luz com baixa intensidade.

Além do emprego dos fotodetectores, pode-se utilizar fotocondutores para detecção de potência óptica. Esses elementos podem ser utilizados para detecção de radiação de comprimentos de ondas elevados, chegando até $40\mu m$. Adicionalmente utiliza-se como elemento detector de radiação óptica em células de CCD. Esses elementos são fundamentalmente fotodetectores convencionais do tipo PN ou PIN, justapostos em linhas e colunas, de modo a formar uma

Semicondutor	Energia de Gap eV	Comprimento de onda μm
Ge	0,66	1,88
Si	1,11	1,15
AlP	2,45	0,52
AlAs	2,16	0,57
AlSb	1,58	0,75
GaP	2,26	0,55
GaAs	1,42	0,87
GaSb	0,73	1,70
InP	1,35	0,92
InAs	0,36	3,5
InSb	0,17	7,3

**Tabela 1: Energia de banda proibida
(SALEH; TEICH, 1991)**

grande matriz onde cada um de seus elementos pode ser considerado um pixel de luz. Devido a essa construção esse dispositivo é comumente empregado em equipamentos de captura de imagens, tanto na faixa do visível como também em termo-visores (captura de radiação na faixa do infravermelho). Os dispositivos de fotodeteção podem ainda ser encontrados na forma de fototransistores.

O desempenho de fotodetectores é descrita basicamente, a saber, por meio da:

- Eficiência quântica
- Responsividade
- Tempo de resposta

A eficiência quântica η de um fotodetector é dada pela razão entre o fluxo de pares de cargas gerados no material semicondutor pelo fluxo dos fótons incidentes. Seu valor varia entre 0 e 1 e depende da geometria do material e de outras características construtivas como por exemplo, a pureza do semicondutor. Esse parâmetro também é função do comprimento de onda dos fótons incidentes.

Outro parâmetro importante na caracterização dos fotodetectores é a responsividade \mathbf{R} , que é a razão entre a corrente elétrica gerada para uma determinada potência óptica incidente. Sua unidade é dada em (Ámpere/Watt) e seu comportamento é dado pela Expressão (3). Sendo λ_0 dado em μm .

$$\mathbf{R} = \eta \frac{\lambda_0}{1.24} \quad (3)$$

A Figura 5 mostra a curva de responsividade fornecida na especificação do fotodetector FGA04 que é utilizado nesse trabalho e para os demais elementos da família FGA.

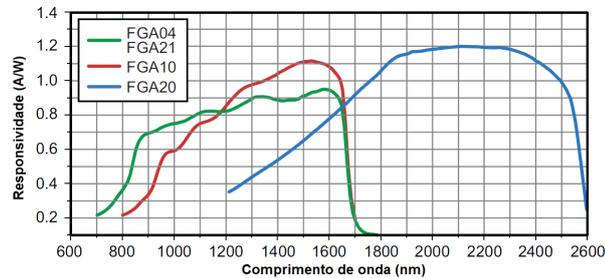


Figura 5: Curva de responsividade de fotodetectores

O fotodiodo pode ser utilizado em basicamente dois modos. O modo fotocondutivo e o modo fotovoltaico. No modo fotocondutivo, o fotodiodo opera em polarização reversa e ainda com uma carga em série. Na presença de radiação óptica é gerado uma corrente que provoca uma queda de potencial na resistência em série, e a partir da medição dessa tensão é possível determinar a potência óptica. No modo fotovoltaico entretanto, o fotodiodo não é polarizado e não há presença de nenhuma carga, nem em série nem em paralelo. A medição da potência incidente é feita pela medição da tensão gerada entre seus terminais. Nesse projeto utiliza-se o fotodiodo em modo fotovoltaico.

A Figura 6 mostra o modelo elétrico do fotodiodo. Na Figura está destacada a corrente I_f , referente a corrente gerada pela absorção de luz. A corrente I_d é a corrente que flui através do diodo ideal, a resistência e a capacitância *shunt* são referentes à região de depleção.

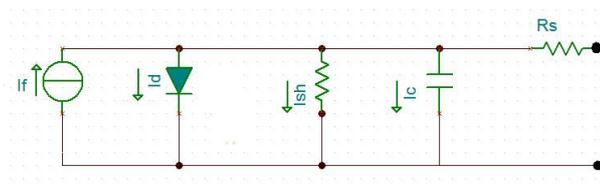


Figura 6: Modelo do fotodetector

No modo fotovoltaico, a tensão nos terminais do fotodiodo é dada pela expressão (4), onde A é a área do fotodiodo, i_0 é a corrente reversa da junção, q é a carga do elétron, T é a temperatura absoluta do fotodiodo, h é a constante de Planck, K é a constante de Boltzmann e c a velocidade da luz no vácuo.

$$V_{terminal} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{\eta I_0 q \lambda A}{h c i_0}\right) \quad (4)$$

O tempo de resposta do fotodetector é de grande importância em aplicações onde a conversão do sinal do domínio óptico para o domínio elétrico necessita ser rápida, como no caso de receptores de comunicação, ou mesmo em aplicações de sensoriamento que envolvam mensurandos que variam rapidamente. O tempo de resposta é um parâmetro relacionado às características construtivas do semicondutor e pode ser interpretado como sendo o tempo de trânsito dos portadores de carga dentro da estrutura semicondutora.

2.3 DISPOSITIVO PIEZOELÉTRICO

A piezoelectricidade é um efeito descoberto por Pierre Curie e seu irmão mais velho Jacques Curie no ano de 1880. Esse efeito pode ser observado em cristais e cerâmicas ferroelétricas. Basicamente, o efeito piezoelétrico se caracteriza pelo surgimento de uma polarização elétrica no material após este sofrer carregamento mecânico. Adicionalmente, o efeito piezoelétrico inverso é caracterizado pela deformação mecânica aparente em um elemento quando sobre este é aplicado um campo elétrico externo.

A natureza física do fenômeno pode ser explicada pela análise da cristalografia do material que apresenta o fenômeno da piezoelectricidade. Apesar desse modelo ser alvo ainda de muita pesquisa no meio acadêmico, como mostra (LEWIS, 2005) e (BOGDANOV, 2002), ele explica de forma adequada o efeito para a aplicação da piezoelectricidade em atuadores e sensores.

Pode-se considerar que um material piezoelétrico seja formado por cristais que apresentam algum tipo de polaridade. Quando este elemento não está sob a ação de nenhuma força externa, seja um campo elétrico ou uma carga mecânica, os dipolos formados pelos cristais apresentam uma orientação aleatória. Quando o material sofre deformação em algum de seus eixos, os dipolos tendem a se orientar de modo a manter o equilíbrio presente na condição inicial. Na busca desse equilíbrio os dipolos se orientam ao longo do eixo de compressão, de modo que uma polarização residual fica presente no material. A essa polarização dá-se o nome de polarização piezoelétrica. Vale ressaltar que o campo elétrico induzido dentro do material é proporcional à carga mecânica sobre ele aplicada.

Alternativamente, quando um material, que se encontra livre de forças externas, fica sujeito à aplicação de um campo elétrico, os dipolos existentes tendem a se orientar no sentido do campo aplicado. Essa movimentação elétrica faz com que o material sofra uma deformação proporcional ao campo aplicado. Essa deformação, assim como no caso anterior, é proporcional ao campo aplicado. A Figura 7 mostra qualitativamente esses efeitos em ação.

Essas propriedades têm vasta utilidade em diversos campos de aplicação. A Tabela 2

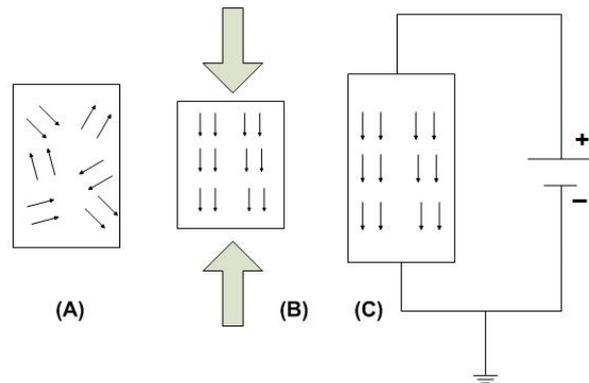


Figura 7: Efeito Piezoelétrico - (a) livre de forças (b) Sob carregamento mecânico (c) Sob campo elétrico aplicado

descreve as principais áreas de utilização.

Os materiais piezoelétricos são caracterizados por dois parâmetros: o coeficiente piezo-elétrico d_{ijk} e pelo fator de acoplamento k^2 . O coeficiente piezo-elétrico d_{ijk} relaciona a carga mecânica aplicada nas direções i, j, k com a polarização resultante, como mostra a expressão (5).

$$P_i = d_{ijk} \sigma_{jk} \quad (5)$$

Onde, $i, j, k = 1, 2, 3$, respectivamente e σ_{jk} é a tensão aplicada.

O segundo parâmetro é o fator de acoplamento k^2 . Esse fator relaciona a eficiência da conversão de energia elétrica em energia mecânica, e vice-versa. Ele é dado pela expressão (6).

$$k^2 = \frac{E_{in}}{E_{out}} \quad (6)$$

Onde, E_{in} a energia de entrada e E_{out} a energia de saída do sistema, sejam elas elétricas ou mecânicas.

Apesar de existirem diversos materiais que apresentam o efeito piezoelétrico, o material responsável pela disseminação do emprego desses dispositivos é o composto conhecido como $PbZrO_3 - PbTiO_3$, cuja sigla em inglês é PZT - *Lead Zirconate Titanate*. Esse composto tem algumas vantagens em relação a outros materiais piezoelétricos, como mostra a lista a seguir:

1. A temperatura do ponto de Curie elevada (350°C) aumenta sua possibilidade de utilização.

Classificação	Aplicação
Gerador de Alta Tensão	Manipulação de gases, Acendedores, Ignitores e Lâmpadas <i>de Flash</i>
Gerador Ultra Sônico de Alta Potência	Limpadores ultrassônicos, Sonares, Ecografias, Motores ultrassônicos, Atomizadores e Pulverizadores
Transdutor de Som e Ultra-som no Ar	Microfones, Caixas acústicas, Cornetas e Equipamentos médicos
Sensores	Fonografias, Acelerômetros, Hidrofones, Sistemas de detecção de maquinário e Instrumentos musicais
Ressonador e Filtros	Radio, TV e instrumentação eletrônica
Dispositivos de <i>Delay</i>	TVs, Computadores e Eletrônica
Teclados	Computadores, Calculadoras e Telefones
Outros	Transformadores de tensão, motores, memória analógica, micro e nano posicionadores e medidores de fluxo

**Tabela 2: Aplicações de dispositivo piezoelétrico
(SWARTZ, 1990)**

2. Elevado coeficiente piezoelétrico (d_{ijk}).
3. Elevado fator de acoplamento (k^2).
4. Elevada versatilidade no processo produtivo.

A temperatura do ponto de Curie de um material piezoelétrico é aquela em que, após o material atingir esse valor de temperatura, ele perde a polarização espontânea e também o momento de dipolo. Os dispositivos piezoelétricos podem ainda ser fornecidos no formato de pilhas de células piezoelétricas, comumente chamados de piezoelétrico multicamada. Como mostra a Figura 8. Na Figura, as setas indicam o sentido de polarização dos dipolos elétricos e ΔL indica o deslocamento que a peça sofre na presença de um campo elétrico entre os terminais do dispositivo.

Como mostrado por Suzuki (SUZUKI; ESASHI, 2000), essa forma multicamada apresenta diversas vantagens em relação à forma convencional. Pode-se citar principalmente: baixa tensão de controle, elevada força gerada e baixo tempo de resposta.

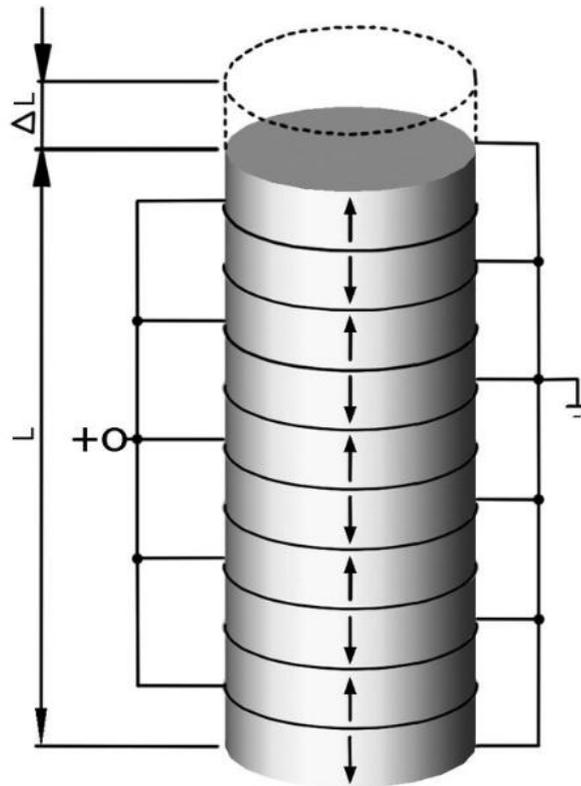


Figura 8: Diagrama de um PZT multicamadas

Entretanto, uma desvantagem do emprego de piezoelétricos é a existência de histerese, como mostrado na Figura 9. Na Figura, E representa o campo elétrico e P representa a polarização elétrica.

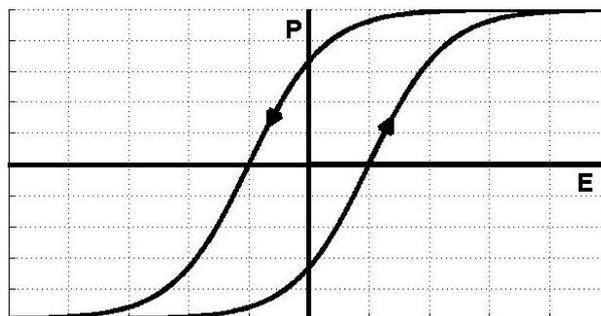


Figura 9: Histerese de um atuador piezoelétrico

A histerese pode ser interpretada como uma memória presente nos dipolos do dielétrico. Ou seja, após a aplicação de um campo elétrico capaz de orientar os dipolos existentes no material, estes não voltam ao seu estado inicial na ausência do campo elétrico. Essa despolarização incompleta é minimizada quanto maior for o grau de agitação das moléculas do elemento. Quando se utilizam dispositivos piezoelétricos como atuadores, por exemplo, a histerese faz com que, para um mesmo sinal de tensão aplicada no dispositivo, este tenha um deslocamento diferente

conforme seu estado no início da aplicação da tensão.

Apesar de existirem técnicas para minimizar esse efeito não linear, a histerese pode dificultar a construção de dispositivos atuadores ou mesmo dispositivos sensores. O emprego de técnicas de controle levando-se em consideração a histerese do material é extensamente reportado na literatura. Algumas técnicas baseadas na teoria de controle convencional são detalhadas em (CHUANG; MA, 2009). Alternativamente, pode-se empregar técnicas de controle utilizando redes neurais ou controle adaptativo como, por exemplo em (RU et al., 2006a), (RU et al., 2006b), (RU; CHEN; SUN, 2007), (CHIH-HSIANG; CHANG, 2006) ou (LIZHI et al., 2009).

O efeito negativo da histerese pode também ser contornado através do emprego de atuadores que utilizem o efeito eletrostrictivo como mostrado em (SWARTZ, 1990). Eletrostricção é um efeito presente em alguns materiais dielétricos. Quando colocados entre eletrodos formados por placas paralelas, com uma diferença de potencial aplicado entre elas, o material sofrerá expansão, devido as forças elétricas acumuladas nos eletrodos.

Comercialmente os dispositivos piezoelétricos conhecidos como PZT são vendidos encapsulados, podendo apresentar dois terminais, um responsável pela aplicação do sinal de controle e outro responsável por fornecer um sinal de realimentação que pode ser utilizado na malha de controle empregada no dispositivo. Normalmente este sinal é oriundo de um sensor *strain gauge* colocado em uma ponte de *Wheatstone*. Desta maneira, é possível facilmente obter um sinal de realimentação para a malha de um atuador utilizando um elemento piezoelétrico. Outras possibilidades de realimentação fazem uso de sensores capacitivos ou até mesmo de sensores ópticos utilizando FBGs.

2.4 SISTEMAS DE SINTONIZAÇÃO

Com o crescimento da demanda por transmissão de dados, as redes de comunicação óptica que empregam técnicas de multiplexação por comprimento de onda (WDM) necessitam de dispositivos mais sofisticados a fim de garantir maior gerenciabilidade dos dados trafegados e possibilitar ainda, o emprego de técnicas sofisticadas de roteamento de sinais. Essas técnicas objetivam melhorar o gerenciamento da capacidade de transmissão de dados.

Para isto são necessários filtros sintonizáveis capazes de selecionar canais de um sistema WDM. Esses filtros sintonizáveis devem atender os seguintes requisitos:

- Sintonização em uma grande faixa espectral,
- Elevada seletividade de canal,

- Rápidas velocidades de sintonização entre canais,
- Elevada repetibilidade,
- Baixa sensibilidade a fatores externos (como por exemplo: variação de temperatura),
- Baixo custo.

A faixa espectral de sintonização pode ser entendida como os comprimentos de onda passíveis de serem sintonizados. Caso a faixa espectral de sintonização seja restrita, pode-se pensar na associação em cascata de filtros. Essa alternativa, apesar de ser eficiente, é mais custosa e de difícil gerenciamento. Por exemplo, em um sistema DWDM DWDM , segundo recomendação do ITU, a faixa de canais pode variar de 1519.48nm e ir até 1577.03nm com espaçamento de 100GHz entre canais, totalizando 73 canais.

O filtro seletor de canais deve ter a capacidade de seleção entre canais, ou seja, para o caso do exemplo citado, esse valor deve ser de 0.77nm. Além disso, o dispositivo deve ser imune a interferências externas como variação de temperatura, ou, ao menos, essa influência deve ser minimizada através de técnicas de controle adequadas. Adicionalmente, o dispositivo deve ter elevada repetibilidade para evitar flutuações na seleção do comprimento de onda desejado. Outra característica importante do filtro é a velocidade de sintonização entre canais, que para redes SONET/SDH deve ser inferior a 50ms.

FBGs são fortes candidatas a filtros seletores de canais. Como a sensibilidade da FBG à variação de temperatura é de aproximadamente $10pm/^{\circ}C$, é necessário cerca de $100^{\circ}C$ de variação de modo a gerar um deslocamento de comprimento de onda de 1nm, muito aquém do desejado frente às recomendações do ITU. Além disso, o método que emprega variações de temperatura é muito lento para seleção de canais. Portanto, a FBG normalmente é utilizada sendo tracionada, comprimida ou flexionada.

Um método que emprega FBG no modo de tração é mostrado em (NEVES, 2008). Com esse método foi possível obter $12nm$ de deslocamento com uma velocidade de $0,3nm/ms$. A figura 10 mostra o dispositivo desenvolvido. O dispositivo é composto por um atuador piezoelétrico multicamadas, o que permite sua utilização com baixos valores de tensão, duas peças mecânicas, sendo uma a base do dispositivo e a outra o braço responsável por aplicar tração na fibra óptica. A fibra óptica é fixada nas peças mecânicas através de cola a base de éster de cianoacrilato.

Alternativamente, pode-se utilizar a compressão da FBG de modo a promover um deslocamento maior de comprimento de onda. Esse método é utilizado, por exemplo, em Moham-

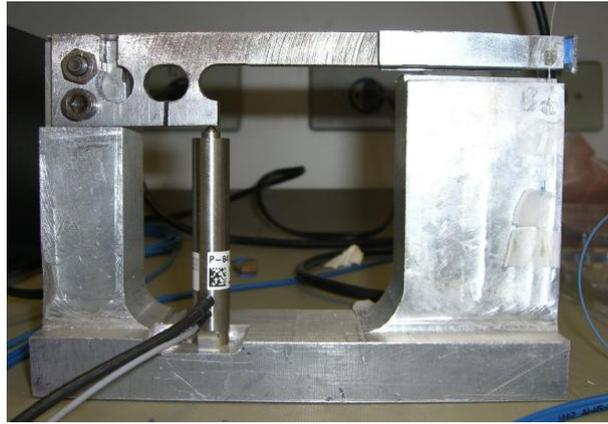


Figura 10: Filtro seletor baseado em FBG no modo tração

mad (MOHAMMAD et al., 2004), que obteve um deslocamento de 46nm. Iocco (IOCCO et al., 1999) utilizando o mesmo método obteve 45nm porém com uma velocidade de 21nm/ms. Entretanto, o atuador utilizado é um piezoelétrico que necessita de tensões elevadas para seu controle, valor este em torno de 1kV. Também utilizando o método da compressão, Zu e Gu (ZU; GU, 2006) obtiveram um deslocamento de 13.7nm com tempo de chaveamento de 17.3ms e com resolução de comprimento de onda de 7pm. A Figura 11 mostra esquematicamente a compressão de uma fibra óptica com uma FBG inscrita.

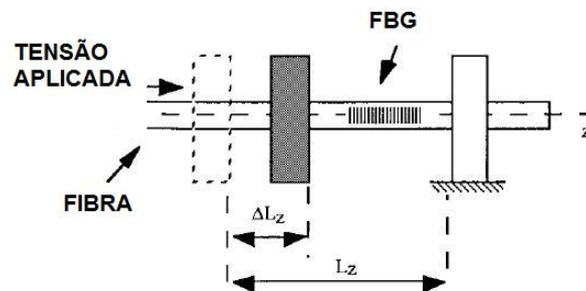


Figura 11: FBG sob compressão

Além do emprego da tração e compressão da fibra óptica, pode-se optar pela sua flexão. Essa técnica mista promove a compressão ou tração axial na fibra óptica através da flexão de uma peça em que a fibra óptica com a FBG inscrita está colada, como mostrado na Figura 12. Essa técnica apresenta a vantagem de não haver restrição quanto ao comprimento da FBG inscrita na fibra óptica. Vale ressaltar que o comprimento da FBG tem uma relação direta com sua largura espectral. Quanto menor for seu comprimento, maior será a FWHM da rede. Como mostra Goh et al (GOH; SET; KIKUCHI, 2002), utilizando a técnica da flexão, obteve-se 50nm de faixa de sintonização e segundo Sun et al (SUN; CHAN; DONG, 2006), utilizando um dispositivo similar, obteve-se 20,5nm.

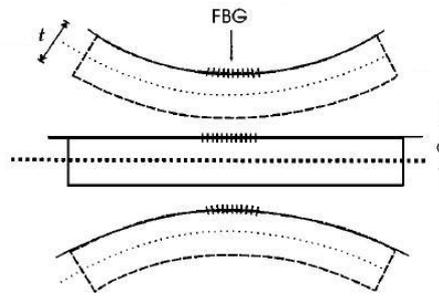


Figura 12: FBG sob tração e flexão

Alternativamente à aplicação de compressão e tração na FBG, há a possibilidade de modulação do comprimento de onda de Bragg através da excitação acusto-óptica como mostra Oliveira et al (OLIVEIRA et al., 2010). Essa modulação consiste em submeter a fibra óptica com a FBG inscrita a uma onda acústica de modo a criar zonas de compressão e tração localizadas como mostrado na Figura 13.

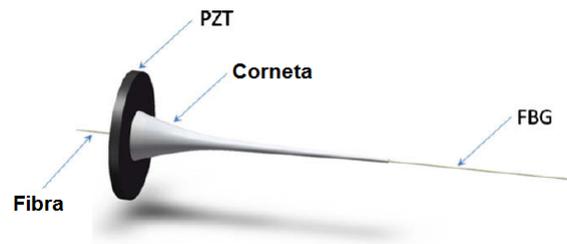


Figura 13: Modulação acusto-óptica

A onda acústica de alta frequência ($>1\text{MHz}$) faz surgir lóbulos laterais no espectro de frequência da FBG e os lóbulos laterais são criados conforme a frequência da onda acústica. Além da sintonização do comprimento de onda, é possível a determinação da amplitude desses lóbulos. Uma limitação dessa técnica é a estreita faixa de sintonização. Em (YEOM; PARK; KIM, 2004), através da modulação acusto-óptica da FBG obteve-se uma faixa espectral de sintonia de $1,3\text{nm}$. A Figura 14 mostra as características de controle da modulação acústica obtida por Oliveira et al (OLIVEIRA et al., 2010).

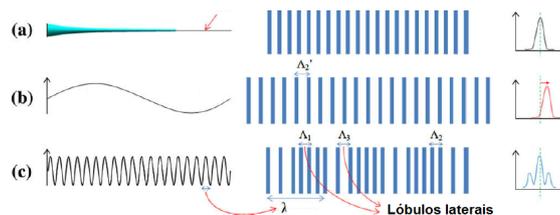


Figura 14: Modulação acusto-óptica - (a) Sem sinal aplicado (b) Sinal de baixa frequência (c) Sinal de alta frequência

Devido a grande importância que um filtro sintonizador de canais DWDM têm em uma rede de comunicação óptica, o desenvolvimento deve propiciar a melhora dos parâmetros do filtro, as perdas ópticas envolvidas e o tamanho do dispositivo. Com essa filosofia em mente, alguns trabalhos empregam técnicas de miniaturização, como mostrado por Wu (WU et al., 2008), que apresenta um filtro selecionador de canais DWDM miniaturizado, formado por uma FBG e um interferômetro de Michelson. Os resultados obtidos com esse monolito foi de 17nm para faixa espectral de sintonia, com tempo de chaveamento da ordem de 1ms. A Figura 15 mostra o dispositivo.

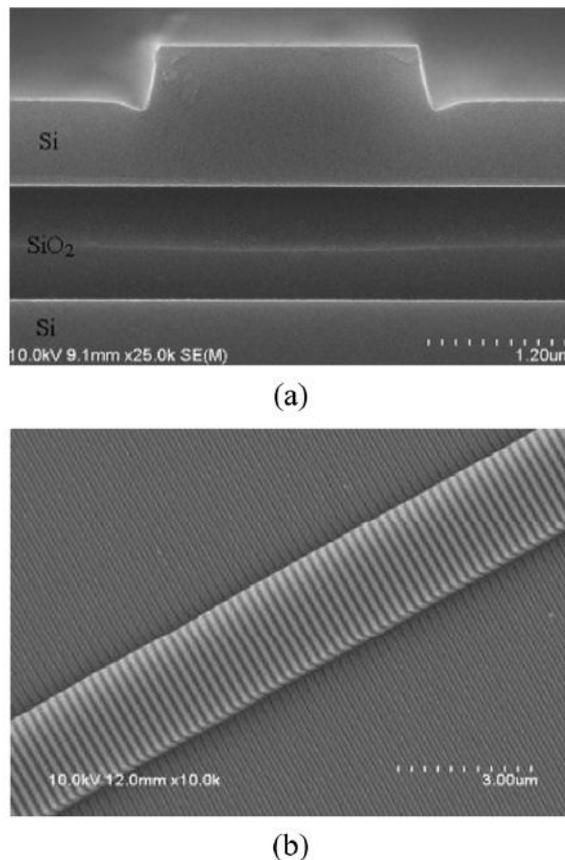


Figura 15: Filtro seletor de canais miniaturizado

2.5 SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO

Sistemas que empregam FBG, tanto como elementos sensores ou como elementos seletores de canais ópticos, necessitam de mecanismos de interrogação do comprimento de onda de Bragg. Ou seja, é necessário desenvolver mecanismos que possibilitem aferir, com precisão qual o comprimento de onda no qual a FBG está centrada. Nos casos dos sensores, essa informação é transformada em uma grandeza de temperatura ou deslocamento, por exemplo. Nos

casos de filtros ópticos essa informação pode ser utilizada em um sistema de controle em malha fechada. Independente da maneira como a fibra óptica com a FBG é fixada no elemento atuador, a interrogação pode sempre ser feita no domínio óptico através da derivação de uma fração de potência do sinal para o sistema de interrogação, ou, no caso dos sensores, todo sinal óptico é empregado no sistema de interrogação.

Em alguns casos, a interrogação do comprimento de onda de Bragg de um filtro sintonizador pode ser feita com o auxílio de outros elementos. Pode-se, por exemplo, utilizar os sinais de tensão de uma ponte de Wheatstone formada por sensores *Strain Gauge*, esse valor de tensão determina o deslocamento de um dispositivo piezoelétrico, que, a partir do conhecimento da dinâmica do dispositivo mecânico que sofre ação do piezoelétrico aliado ao conhecimento das propriedades elasto-ópticas da fibra determina o comprimento de onda de Bragg em cada momento do sistema. Para garantir maior exatidão da medição é necessário ainda corrigir os valores em relação à variação de temperatura do ambiente.

Um método simples, porém custoso, é a utilização de um analisador de espectros ópticos, em inglês OSA - Optical Spectrum Analyser. Devido ao custo associado ao dispositivo, seu uso se restringe aos ambientes laboratoriais. Assim, de modo a viabilizar o emprego das FBGs em diversas aplicações, tanto como elementos sensores ou como elementos seletores de comprimento de onda, é necessário o desenvolvimento de técnicas robustas, precisas e menos custosas. Atualmente o emprego de sistemas que utilizam FBGs é viável somente em aplicações para medir grandezas em equipamentos e estruturas relativamente caras.

De modo a contornar esse problema, diversas técnicas de interrogação do comprimento de onda de Bragg estão em desenvolvimento. Vários parâmetros são essenciais para escolha do sistema de interrogação, como, por exemplo, quantas FBGs podem ser interrogadas com o mesmo sistema. Outro parâmetro importante é a taxa de interrogação. Essa característica se torna mais importante quando a dinâmica do sistema sendo interrogado é rápida. Deve-se avaliar ainda se o sistema de interrogação é passivo ou ativo, e se o sistema é constituído por partes móveis.

Em suma, os sistemas de interrogação podem ser divididos em três grupos:

1. Sistemas de detecção passiva utilizando filtros fixos,
2. Sistemas de detecção ativa utilizando filtros sintonizáveis e técnicas interferométricas,
3. Sistemas de detecção utilizando fontes de luz sintonizáveis.

Os sistemas de detecção pertencentes ao primeiro grupo são basicamente constituídos de

uma fonte de luz banda larga, um circulador, a FBG a ser interrogada, um divisor de potência, um filtro óptico e dois fotodetectores. Um esquema dessa montagem, desenvolvido por Miao *et al* (MIAO et al., 2008) é mostrada na Figura 16.

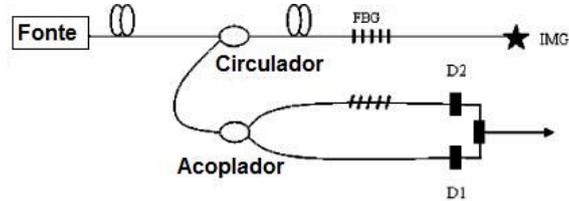


Figura 16: Esquema de detecção passiva

O sinal enviado pela fonte de luz banda larga é refletido pela FBG e, através do circulador, é enviado ao divisor de potência óptica. Uma parcela desse sinal é enviada ao primeiro fotodetec- tor, enquanto a segunda parcela antes de ser enviada ao segundo fotodetec- tor é convolucionada com um filtro óptico. O filtro óptico empregado deve ter uma função de transferência tão linear quanto possível dentro da faixa espectral de interesse. Portanto, uma parcela do sinal refletido pela FBG é modulada, e sua intensidade é variada conforme o comprimento de onda do sinal refletido. Essa parcela filtrada pode ser comparada com a parcela não filtrada e pela análise da relação entre as duas potências pode-se determinar o comprimento de onda de Bragg da FBG a ser interrogada. A Figura 17 mostra um exemplo de função de transferência de um filtro óptico.

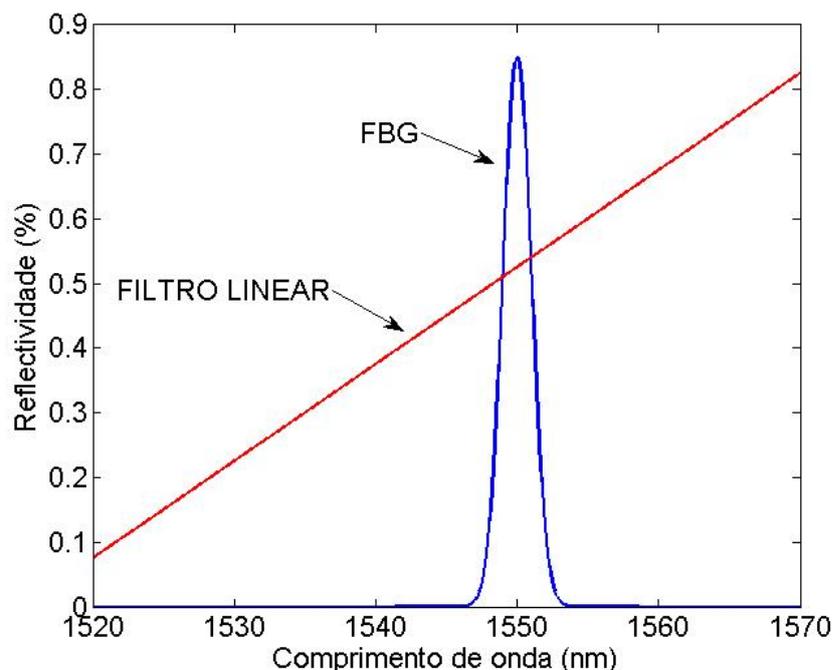


Figura 17: Função de transferência do filtro óptico

O filtro óptico pode ser implementado com uma outra FBG, como mostrado por Jiang et

al (JIANG; SUI; WANG, 2007). Alternativamente, pode-se empregar um filtro feito a partir de uma FBG de período longo, como mostrado por Spillman et al (SPILLMAN W.B. et al., 2002). Segundo Miao (MIAO et al., 2008) é mostrado um esquema utilizando uma FBG com perfil inclinado como filtro linear. A principal desvantagem da utilização de uma FBG como filtro linear é que seu espectro está intimamente ligado a variações de temperatura. Em (MIAO et al., 2008) o filtro FBG é colocado próximo a FBG a ser interrogada de modo que as variações de temperatura no local afetem simultaneamente ambas as redes. Alternativamente ao emprego de FBG como filtro óptico, pode-se empregar outros materiais para efetuarem a filtragem, porém há a necessidade de utilização de lentes colimadoras e focalizadoras. Em (MELLE; LIU; MEASURES, 1992) é utilizado um filtro comercial RG830 para esse fim. Em alguns casos, o sinal refletido pela FBG pode ter uma potência muito reduzida. Para solucionar o problema, Cooper e Smith (COOPER; SMITH, 2003) mostram uma metodologia utilizando amplificadores de sinal, caso o sinal refletido pela FBG a ser demodulada seja de baixa intensidade.

O segundo e terceiro grupo são compostos por sistemas de interrogação que são construídos com filtros sintonizáveis, interferômetros ou fontes sintonizáveis. Esses sistemas são compostos por uma fonte de luz onde uma fração dessa energia é modulada por um filtro. Esse sinal é então enviado à FBG a ser interrogada. Portanto, a partir da varredura de uma faixa espectral por um filtro óptico é possível obter o espectro de reflexão da FBG. Alternativamente, pode-se modular diretamente a fonte de luz, obtendo-se o mesmo efeito.

Pode-se ainda variar a diferença de caminho óptico, cuja sigla em inglês é OPD - Optical Path Difference, de um interferômetro, de modo a varrer uma faixa espectral em que o espectro da FBG exista. Um esquema utilizando um interferômetro é mostrado na Figura 18. Essa técnica foi implementada por Murphy et al (MURPHY et al., 2001) e faz uso de uma fonte de luz como referência.

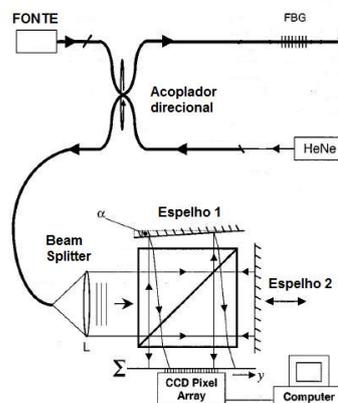


Figura 18: Técnica Interferométrica

Na Figura 19 é mostrado outro dispositivo implementado por Yu e Zhao (YU; ZHAO, 2005) que fazem uso de interferômetro, porém sem a necessidade do emprego de uma fonte de luz como referência.

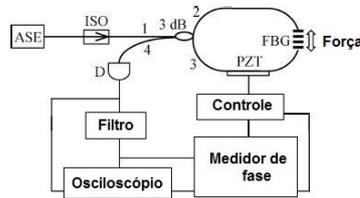


Figura 19: Outra técnica interferométrica

Outra possibilidade de técnica ativa é a utilização de Filtros Casados - *Matched Filter*. Essa técnica consiste em sintonizar uma rede de Bragg de modo a casar o comprimento de onda de Bragg com o de outra FBG. Como exemplo, é mostrado a implementação de Ferreira et al (FERREIRA; SANTOS; FARAHI, 1997) na Figura 20.

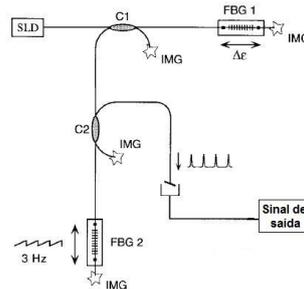


Figura 20: Técnica de Matched Filter

Outro método muito utilizado consiste no emprego de espectrômetros construídos com CCD. A luz refletida por um ou mais sensores é difratada por uma grade de difração de modo a ser projetada em uma matriz de CCD. Cada pixel da matriz de CCD representa um determinado comprimento de onda e através do monitoramento dessa variação de potência pode-se determinar o comprimento de onda de Bragg de um ou mais sensores. Essa técnica é muito eficiente para monitorar um conjunto grande de sensores simultaneamente. Pode-se encontrar o desenvolvimento dessas técnicas em (GAO et al., 2008) e (ALVES; SANTOS J.L. AND CARVALHO; LAGE, 2003).

Com a crescente tendência de miniaturização, em (UNAMUNO; LI; UTTAMCHANDANI, 2004) e (UNAMUNO; UTTAMCHANDANI, 2005) é apresentado um dispositivo MOEMS capaz de demodular comprimentos de onda de Bragg. Esses dispositivos têm a vantagem de apresentarem tamanho reduzidos e baixo consumo de energia.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido é um dispositivo sintonizador de redes de Bragg em fibra, que pode ser utilizado como um filtro óptico ou um sintonizador de canais WDM. Para tanto, foi desenvolvido um circuito específico capaz de controlar um dispositivo mecânico, acionado por um elemento piezoelétrico. O *hardware* ainda pode ser utilizado como um interrogador de FBG utilizando a técnica de interrogação passiva através de filtros fixos. O *hardware* também é munido de interfaces de comunicação a fim de propiciar um maior controle do processo de testes e calibração.

Este capítulo apresenta o projeto do hardware desenvolvido neste projeto.

3.1 DISPOSITIVO DESENVOLVIDO

O *hardware* do projeto é constituído dos seguintes módulos principais:

- Fonte CA/CC
- *Driver* para piezoelétrico
- Módulo de fotodeteção
- Interface de comunicação
- Módulo de interface homem máquina
- Módulo de processamento

A Figura 21 mostra o diagrama de blocos do sistema desenvolvido.

O sistema de sintonização faz uso da fonte CA/CC, do *driver* para piezoelétrico bem como do módulo de processamento. O sistema de interrogação, por sua vez, faz uso da fonte CA/CC, do módulo de fotodeteção e ainda do módulo de processamento. Os módulos de comunicação

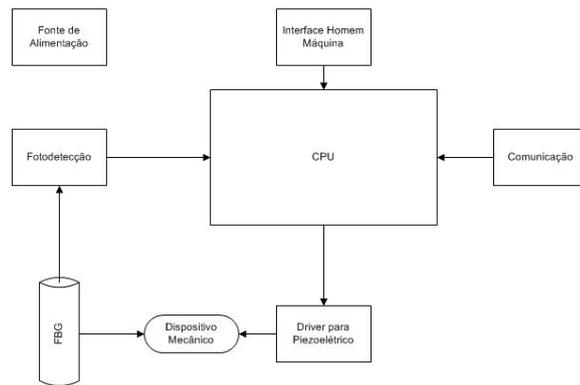


Figura 21: Diagrama de blocos do dispositivo

e a interface homem máquina podem fazer parte de ambos os sistemas. A seguir são descritos todos os módulos desenvolvidos.

O primeiro módulo, a fonte de alimentação CA/CC é responsável por converter a energia disponível através da rede elétrica, nas tensões necessárias pelo dispositivo desenvolvido. As tensões requisitadas pelo dispositivo são as usualmente necessárias em projetos eletrônicos, podendo-se citar: 3,3V, 5V, 15V, -15V. Esse módulo é todo constituído de dispositivos semicondutores e não há presença de nenhum transformador de tensão. Esse critério foi adotado a fim de diminuir o volume e peso do sistema.

O *driver* para o piezoelétrico é responsável por controlar o atuador piezo-elétrico, cuja tensão de entrada pode variar entre 0V até 180V. A alimentação do dispositivo atuador é feita através de um conversor CC-CC empregando a topologia *Buck*. O controle desse módulo é feito pelo módulo de processamento (Microcontrolador). Adicionalmente esse módulo contém um circuito de condicionamento e amplificação de sinais a fim de possibilitar a manipulação de sinais de tensão advindos de sensores *Strain Gauge*, quando estes estiverem presentes no atuador piezoelétrico. Esse módulo é o principal elemento do sistema de interrogação.

O módulo de fotodeteção é utilizado no sistema de interrogação de FBGs, e pode ser empregado como elemento de realimentação óptica para o circuito de controle do sintonizador de canais WDM. Este módulo é composto por dois fotodetectores e circuitos condicionadores de sinais. É possível escolher via *hardware* quais métodos serão empregados em cada um dos fotodetectores, podendo ser o modo fotocondutivo ou modo fotovoltaico. Este módulo é o principal elemento do interrogador de FBGs. Adicionalmente, este módulo inclui um filtro passivo do tipo passa-baixas.

A interface de comunicação é composta por uma porta serial RS232, que pode ser utilizada para as etapas de desenvolvimento do dispositivo ou mesmo para determinação dos parâmet-

ros do *hardware*. Esse módulo ainda contém uma porta de comunicação *Ethernet*, que pode ser utilizada em qualquer rede de comunicação TCP/IP, viabilizando a utilização remota do equipamento. Essa característica é de extrema importância de modo a viabilizar de modo fácil o gerenciamento de um ou mais dispositivos. Esse módulo ainda contém um conector USB que possibilita a conexão com um microcomputador.

A interface homem máquina é responsável por disponibilizar um teclado numérico e um display LCD, além de botões e diversos LED. Adicionalmente essa interface é composta de conectores I2C que possibilitam a fácil expansão desse módulo. Esse módulo ainda contém um conector USB de modo a possibilitar a conexão de dispositivos armazenadores de dados.

O módulo de processamento é constituído de um processador LPC1768 ARM Cortex-M3, com velocidade de *clock* de 100MHz, de modo a propiciar que todas as tarefas necessárias possam ser feitas. O dispositivo ainda contém memória RAM e FLASH e foi especialmente escolhido de modo a atender todos os requisitos do projeto e ainda de possibilitar a expansão do dispositivo a fim de possibilitar o controle simultâneo de outros controladores de atuadores piezoelétricos de maneira fácil.

Além dos circuitos eletrônicos desenvolvidos, o sistema de interrogação ainda é composto de alguns elementos ópticos. A figura 22 mostra esquematicamente os elementos ópticos presentes no dispositivo.

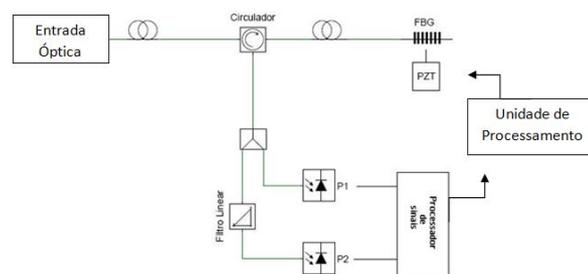


Figura 22: Diagrama do dispositivo - Parte óptica

A parte óptica do dispositivo é composta por um circulador, utilizado para permitir a transmissão do sinal óptico da entrada para a FBG, e para permitir que a reflexão do sinal oriundo da FBG possa chegar aos fotodetectores. Na saída do circulador existe um divisor de potência óptica 50/50%. Portanto, metade da intensidade do sinal é filtrada pelo filtro óptico com perfil linear, enquanto a outra metade é enviada diretamente ao fotodetector. Ambas as parcelas são detectadas pelos fotodetectores pertencentes ao módulo de fotodetecção. Neste trabalho utilizou-se um filtro óptico feito com filmes finos, ele tem a forma de um paralelepípedo e é colocado em um suporte mecânico especialmente projetado para esse fim. A interrogação passiva do

comprimento de onda de Bragg é feita através do uso do filtro óptico com perfil linear.

A FBG utilizada pelo sistema de sintonização é fixada através do uso de uma cola a base de éster de cianoacrilato em um dispositivo mecânico, este por sua vez é capaz de comprimir a rede através do emprego de um atuador piezoelétrico. O dispositivo mecânico utilizado, juntamente com a FBG é mostrado esquematicamente na Figura 23.

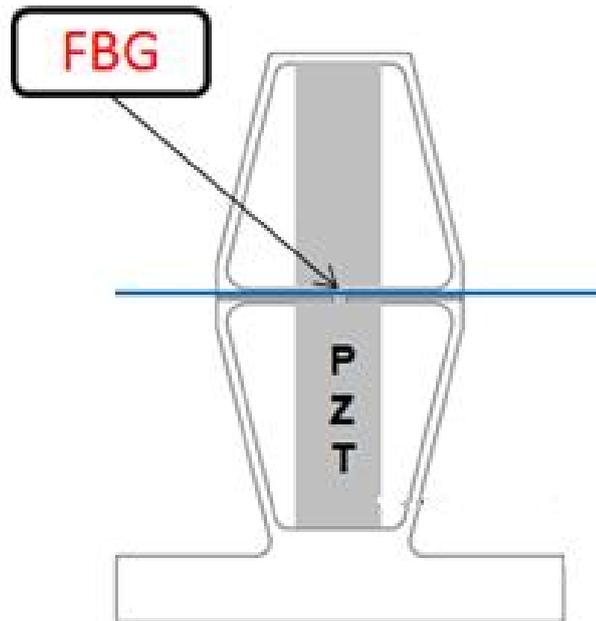


Figura 23: Dispositivo mecânico

Vale ressaltar que devido à natureza modular dos elementos constituintes do dispositivo, pode-se facilmente trocar a FBG utilizada por outra com o perfil óptico que se queira. Pode-se mudar ainda o atuador piezoelétrico e ainda a peça mecânica onde a FBG é fixada, sem ter que modificar nenhum elemento do circuito elétrico.

O dispositivo desenvolvido portanto é composto de dois sistemas: o interrogador de comprimento de onda de Bragg e o sintonizador de comprimento de onda de Bragg. Apesar dos dois sistemas compartilharem módulos do *hardware* desenvolvido, ambos podem funcionar independentemente um do outro.

3.2 AJUSTE DO CIRCUITO DE FOTODETECÇÃO

Após determinar as potências ópticas de reflexão oriundas da FBGs envolvidas pode-se ajustar o circuito de fotodeteção. Notadamente as potências envolvidas devem ser superiores às potências mínimas possíveis de serem detectadas. O fotodetector empregado é fabricado

com o composto InGaAs e tem uma responsividade de aproximadamente $0,9A/W$ na região de trabalho. Sua capacitância é de no máximo $5pF$ e sua corrente de escuro é de no máximo $1nA$.

O circuito principal de fotodeteção é composto de dois amplificadores em cascata. O primeiro é o dispositivo OPA128, empregado em uma topologia de transimpedância, enquanto o segundo é o CI INA118, um amplificador de instrumentação, em uma topologia não inversora. A Figura 24 mostra esquematicamente o circuito de fotodeteção.

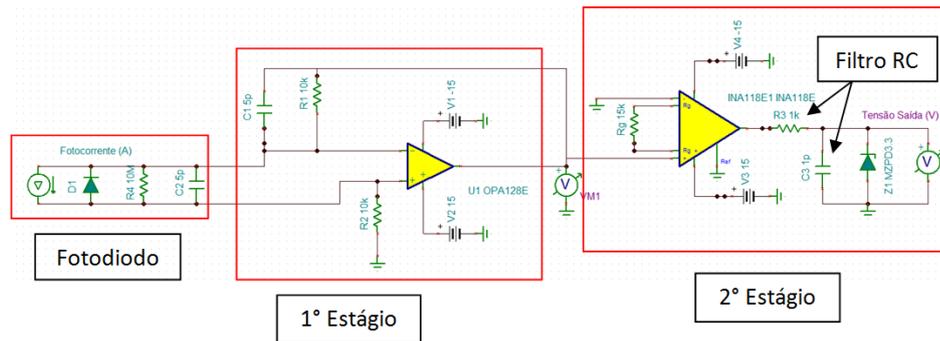


Figura 24: Circuito de fotodeteção

Na Figura 24 está destacado o modelo do fotodetector utilizado, bem como os estágios dos circuitos de amplificação. Para o fotodetector que recebe a potência óptica do sinal que não atravessa o filtro óptico, definiu-se como potência de entrada o intervalo de $0 - 25\mu W$. Como tensão de saída, escolheu-se o intervalo de $0 - 2,5V$. Portanto, o circuito de fotodeteção que lerá o sinal refletido pela FBG não filtrado, tem uma relação de aproximadamente $9\mu W/V$. A Figura 25 mostra a tensão de saída simulada do circuito de fotodeteção para uma onda triangular de fotocorrente gerada representando o sinal de entrada.

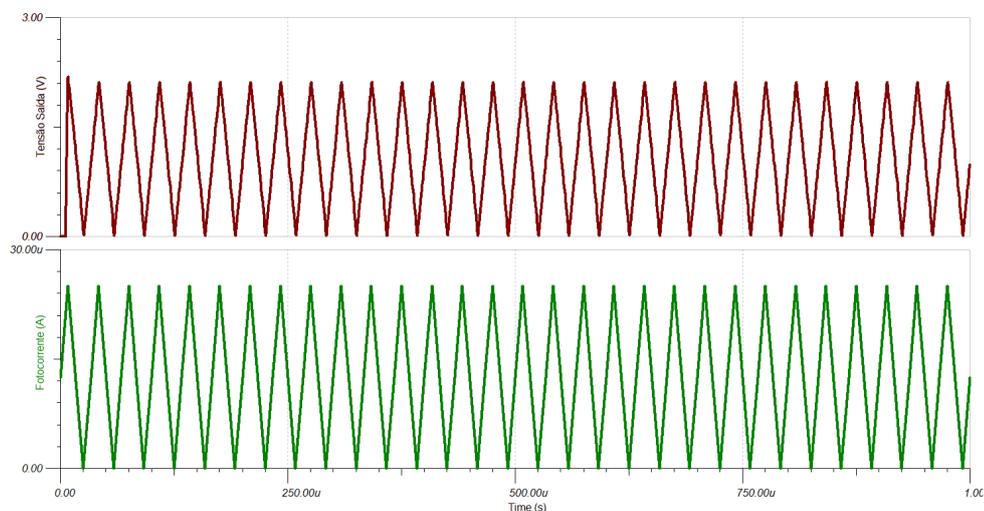


Figura 25: Tensão de saída do circuito de fotodeteção e fotocorrente

O procedimento foi repetido para a parametrização do circuito de amplificação referente ao segundo fotodetector, o que recebe o sinal refletido da FBG, porém filtrado. Definiu-se que, a potência óptica de entrada estaria entre 0-2000nW, e definiu-se aproximadamente a mesma tensão de saída do circuito anterior. Para tanto, alterou-se os dois resistores de $10K\Omega$ por dois de $120K\Omega$

Adicionalmente o circuito de fotodetecção é composto por um filtro passivo RC, com comportamento passa-baixas. A figura 26 mostra a resposta em frequência do filtro passivo utilizado de modo a limitar o ruído presente no sinal amostrado pelo microcontrolador.

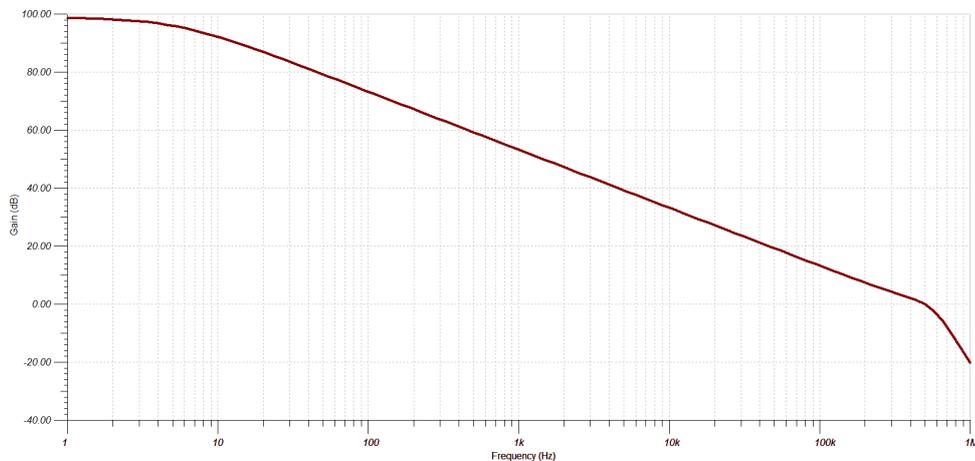


Figura 26: Função de transferência do sistema com filtro RC

Determinou-se a frequência de corte do filtro RC em 10Hz. Para os ensaios que necessitam medir o tempo de subida e descida das potências ópticas recebidas pelos fotodetectores, não deve-se utilizar um filtro RC com uma frequência de corte tão baixa, pois toda dinâmica do sinal é severamente prejudicada.

4 RESULTADOS

O sistema de sintonização de FBG pode ser testado de modo a verificar diversas características, em especial, a faixa de sintonização, a velocidade de sintonia bem como a repetibilidade do sistema. O sistema de interrogação, por sua vez, pode ser avaliado em relação à sua faixa dinâmica de operação e ainda à sua resolução de comprimento de onda.

As sessões seguintes descrevem diversos ensaios realizados e os resultados obtidos.

4.1 SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE INTERROGAÇÃO DE FBG

De modo a possibilitar um maior entendimento do sistema de interrogação do comprimento de onda de Bragg utilizando filtros fixos, o circuito óptico mostrado na Figura 22 foi simulado empregando-se o Software OptiSystem (OPTIWAVE, 2010). Inicialmente modelou-se uma FBG, com uma largura de banda de aproximadamente 2nm. Essa FBG era então sintonizada em diversos comprimentos de onda, de modo a simular a ação do atuador piezoelétrico. Ou seja, variou-se o comprimento de onda de Bragg da FBG de 1530nm até 1551nm. Esse comportamento é mostrado na Figura 27. O sinal apresentado é medido antes do fotodetector e sem passar pelo filtro óptico. Vale ressaltar que utilizou-se uma fonte de luz, cujo espectro vai de 1520nm até 1560nm. Modelou-se a fonte de luz de modo a apresentar variações de potências na faixa de trabalho. Essa característica foi escolhida de modo a enfatizar a invariância em relação a potência de entrada para o sistema de interrogação. O espectro da fonte modelada é mostrado na Figura 28.

A técnica de interrogação empregando filtros fixos é invariante às variações de potência óptica da fonte de luz utilizada no processo pois, o cálculo do comprimento de onda de Bragg é feito pela razão da potência óptica da luz filtrada pelo filtro óptico em relação a potência óptica não filtrada. Portanto, as variações da potência da luz de entrada não afetam a medição.

A reflexão da FBG mostrada na Figura 27 é então filtrada por um filtro óptico com perfil linear, que foi modelado a partir dos dados levantados em laboratório. Um exemplo do processo

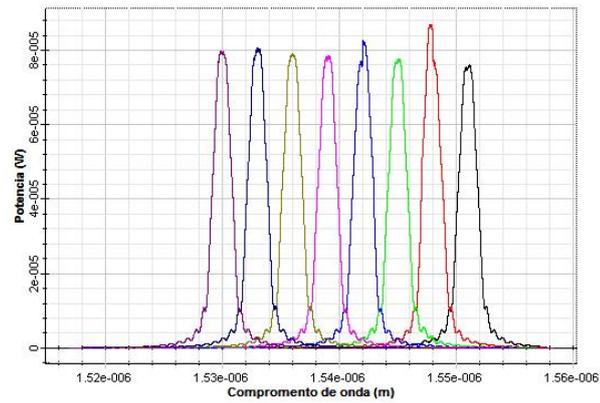


Figura 27: FBG simulada

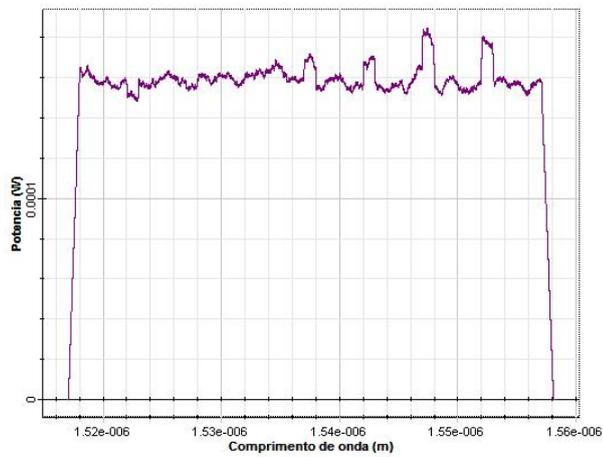


Figura 28: Fonte simulada

de filtragem é mostrado na Figura 29. Esses espectros são medidos antes do fotodetector P2 na Figura 22.

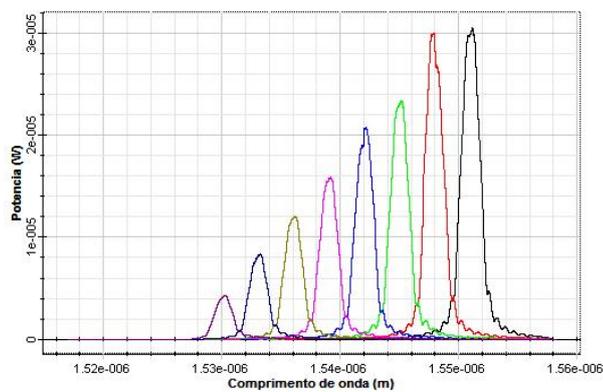


Figura 29: FBG filtrada

Como pode-se verificar, os picos de reflexão da FBG sintonizadas em diversos pontos são modificados de acordo com a inclinação da curva de ganho do filtro linear. A potência de

reflexão pode então ser integralizada por um fotodetector, de modo que para cada ponto de sintonização da FBG, a potência do sinal refletido pela FBG após passar pelo filtro linear é modificada. A partir da análise da relação entre as potências ópticas do sinal refletido pela FBG, aplicadas e não aplicadas ao filtro linear, segundo o esquema da Figura 22, pode-se determinar o comprimento de onda em que a FBG está sintonizada.

Adicionalmente, de modo a identificar qual influência a inclinação da curva do filtro linear impõe na sensibilidade do sistema de interrogação, o sistema óptico foi simulado para diversos valores de inclinação. A Figura 30 mostra a curva do sistema de interrogação utilizando 3 valores de inclinação do filtro linear. Como fica evidente pela curva, quanto maior for a inclinação do filtro maior será a sensibilidade do comprimento de onda de Bragg. Para um filtro com uma inclinação de 50%, ou seja, com 0% de refletividade em 1520nm e 50% em 1580nm, tem-se um coeficiente de inclinação de 0,008, enquanto que para um filtro com um inclinação de 10%, ou seja, cuja refletividade em 1520nm seja 0% e em 1580nm seja 10%, tem-se um coeficiente de inclinação de 0,0016. Portanto, o filtro com 10% de inclinação tem uma sensibilidade 5 vezes menor que o filtro com 50% de inclinação.

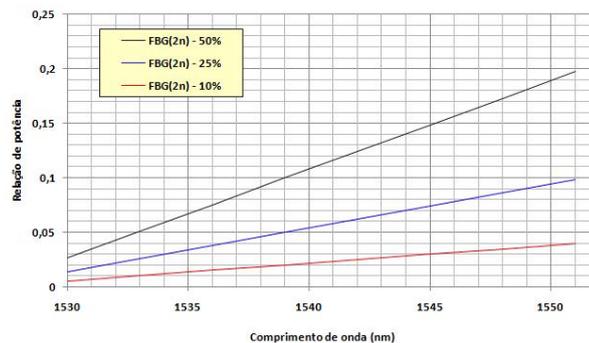


Figura 30: Relações de potência

Portanto, de modo a viabilizar a utilização de filtros fixos para interrogação do comprimento de onda de Bragg, identificou-se que a inclinação do filtro deve ser a maior possível. A faixa de trabalho do sistema de interrogação deve ser escolhida de modo a possibilitar que em todos os comprimentos de onda a potência óptica do sinal filtrado seja superior ao limite imposto pelo fotodetector. Ou seja, a faixa de trabalho do sistema depende da inclinação do filtro, da refletividade da FBG e ainda da corrente de escuro do fotodetector.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DO FILTRO ÓPTICO LINEAR

Os filtros adquiridos foram ensaiados, com o intuito de levantar suas curvas espectrais. Para tanto utilizou-se uma fonte de luz banda larga, o filtro óptico de ensaio e um analisador de es-

pectro óptico. O filtro óptico foi projetado de modo a possibilitar sua operação de 1520nm até 1580nm, cobrindo praticamente todo espectro óptico onde os canais disponíveis pela recomendação do ITU estão presentes.

Foram adquiridos dois tipos de filtros. O primeiro tipo tem um perfil espectral com formato linear, sendo a transmissividade em 1520nm de 10% e em 1570nm de 90%. A esse perfil de filtro da-se o nome de inclinação positiva. O segundo tipo tem um perfil espectral também com formato linear, porém a transmissividade em 1520nm é de 90% e em 1570nm é de 10%. O nome dado ao perfil foi inclinação negativa. O termo negativo e positivo vêm do sinal da derivada da curva, como ficará evidente a seguir.

A Figura 31 e 32 mostram o espectro óptico de duas amostras dos filtros lineares fornecidas pelo fabricante. Essas medidas foram realizadas pelo fabricante com uma resolução de 0,07nm e com ângulo de incidência entre a face do filtro e o feixe de luz oriundo da fibra óptica de 0 grau.

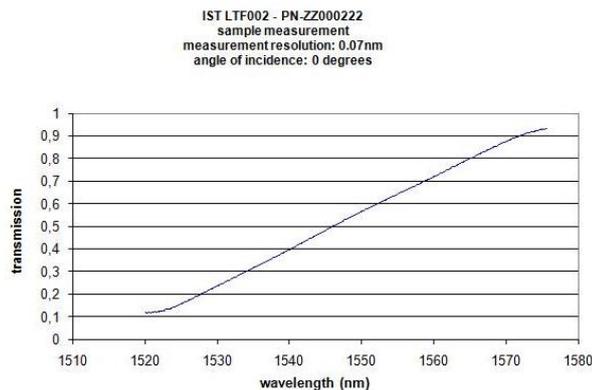


Figura 31: Espectro do filtro linear do fabricante com inclinação positiva

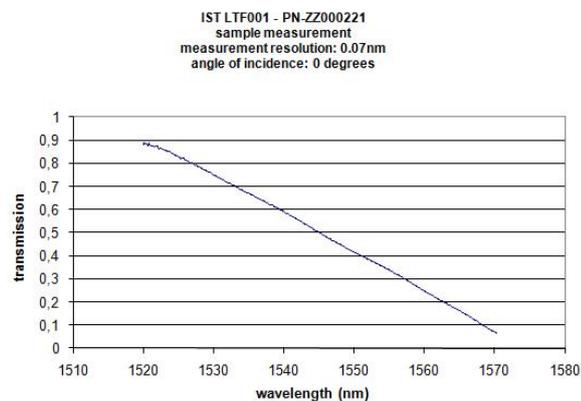


Figura 32: Espectro do filtro linear do fabricante com inclinação negativa

De modo a possibilitar a utilização desses filtros no dispositivo, foi adquirido um suporte

que acondicionasse o filtro e ainda possibilitasse o acoplamento óptico entre duas fibras. A Figura 33 mostra o suporte adquirido.



Figura 33: Suporte do filtro óptico

O suporte é composto de uma peça mecânica com conectores FC/APC cuja transmissividade levantada em laboratório foi de 100%, sem o filtro. Além do suporte, o dispositivo é composto por um porta filtros. O filtro foi fixado no suporte por uma terceira empresa, e a fixação foi feita através de uma resina, impossibilitando portanto a troca do filtro.

A resposta do filtro linear acondicionado no suporte foi então levantada no laboratório LATE do CPGEI/UTFPR e os espectros obtidos mostrados nas Figuras 34 e 35 para o tipo inclinação positiva e inclinação negativa, respectivamente.

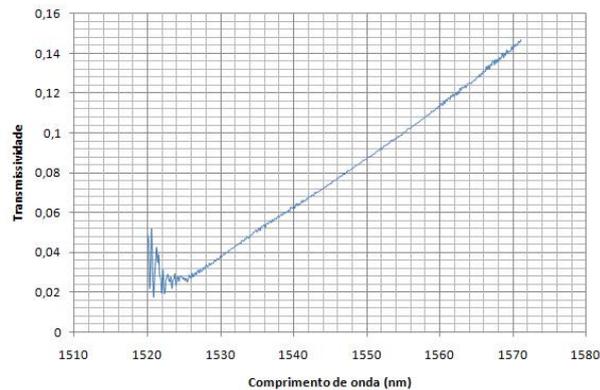


Figura 34: Espectro do filtro linear com inclinação positiva

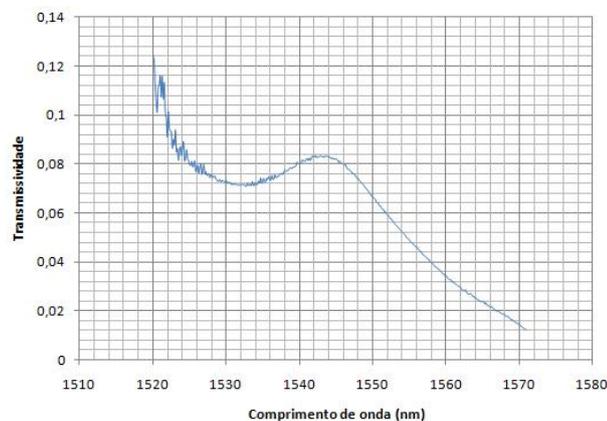


Figura 35: Espectro do filtro linear com inclinação negativa

Como é possível verificar pela análise das figuras, há uma diferença significativa entre os valores especificados pelo fabricante em relação aos resultados obtidos quanto a transmissividade. As Figura 36 e 37, mostram respectivamente, as comparações entre os resultados do fabricante e os obtidos experimentalmente.

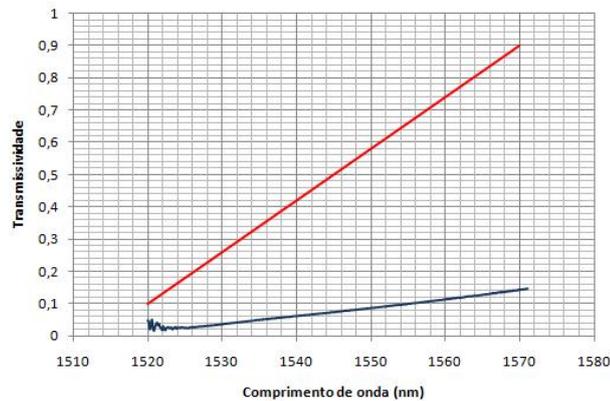


Figura 36: Comparação dos espectros dos filtros com inclinação positiva

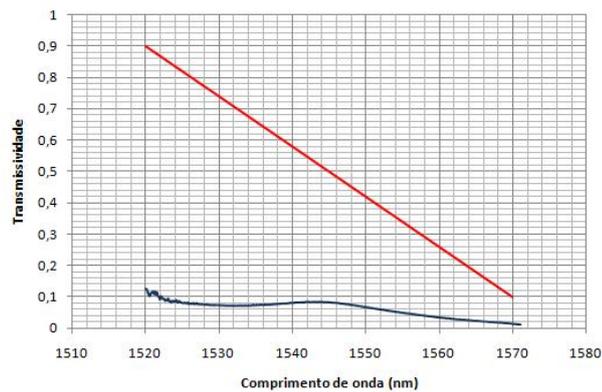


Figura 37: Comparação dos espectros dos filtros com inclinação negativa

Acredita-se que a discrepância entre os valores obtidos com os valores especificados pelo fabricante seja causado pelo desalinhamento do suporte do filtro, que é fornecido por uma terceira empresa. Devido ao fato do filtro linear ter a forma de uma lâmina fina, o alinhamento das faces dessa lâmina em relação ao feixe óptico colimado do sinal oriundo da fibra óptica é de extrema importância. Portanto, de modo a tentar melhorar a resposta do conjunto, ou seja, tentar elevar a inclinação da curva, um novo suporte de filtro foi especialmente usinado. A Figura 38 mostra o projeto da peça.

Além da motivação em relação ao problema da inclinação do filtro, a impossibilidade de troca do filtro motivou a construção de um novo suporte para filtros, nesse projeto, vale ressaltar que o filtro não é colado mas fixado mecanicamente em sua base. Essa peça foi usinada em

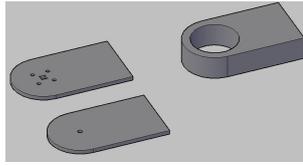


Figura 38: Projeto do suporte do filtro

alumínio com medidas de modo a propiciar o encaixe no suporte mecânico com conectores FC/APC adquirido.

Vale ressaltar que projetos mecânicos envolvendo usinagem com resolução sub-milimétrica, requisitos desse dispositivo apresentam grande dificuldade em virtude da quase inexistência de máquinas e ferramental adequados para trabalhos de precisão nessa ordem de grandeza. A resposta espectral do filtro linear foi novamente levantada, porém com a utilização do novo suporte. Essa resposta espectral é mostrada na Figura 39.

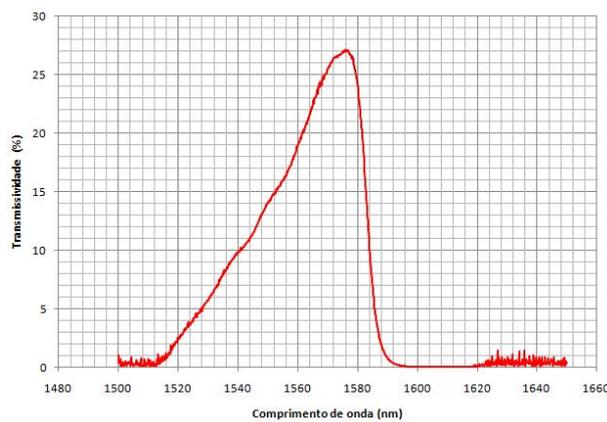


Figura 39: Resposta espectral do filtro linear com novo suporte

Como se pode ver, houve uma melhora significativa da resposta espectral do filtro utilizando o novo suporte para filtros. Obteve-se uma melhora na inclinação do filtro de 77%. Por exemplo, em 1570nm a transmissividade que era de 14,4% foi para 25,48%. O resultado confirma a hipótese de haver algum problema de alinhamento com o dispositivo inicialmente adquirido. Essa melhora, porém, ainda está aquém da curva especificada pelo fabricante e ainda há necessidade de melhoramento a fim de usar toda a inclinação do filtro óptico existente.

A Figura 40 mostra comparativamente todas as respostas obtidas de inclinação do filtro óptico.

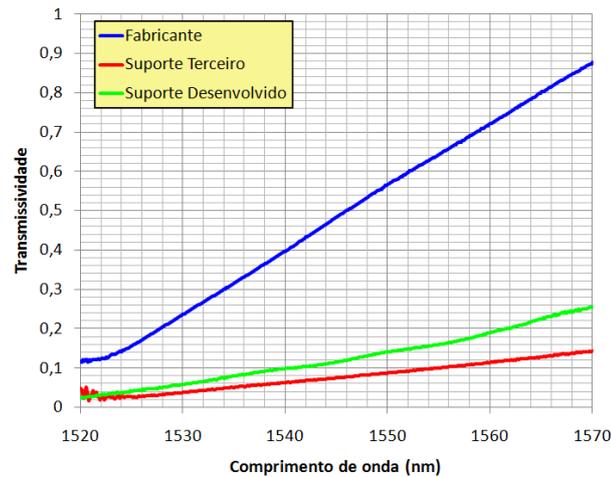


Figura 40: Comparação das respostas espectrais do filtro linear

4.3 DRIVER DO ATUADOR PIEZOELÉTRICO

O primeiro módulo a ser testado é a fonte de tensão, ela foi submetida a uma série de ensaios para verificar a linearidade da saída em relação ao sinal de controle. A Figura 41 mostra um esquema de circuito elétrico de uma fonte conversora de energia CC-CC de topologia *Buck*. O sinal de controle pode vir de um gerador de sinais ou da unidade de processamento.

O sinal de controle faz uso de um sinal do tipo PWM - (*Pulse Width Modulation*), modulação por largura de pulso. A frequência do sinal de controle é de 30kHz, e a largura de pulso pode variar de 0% até 100% e, portanto, a tensão de saída varia de 100V até 0V. Esse intervalo de tensão foi escolhido devido às limitações de tensão de entrada suportados pelo dispositivo piezoelétrico utilizado.

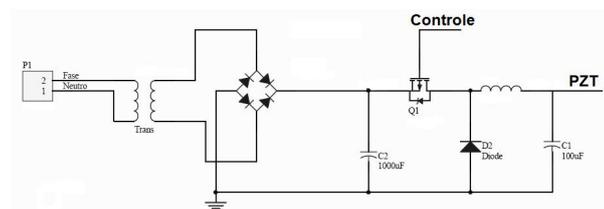


Figura 41: Esquema elétrico da fonte Buck

A Figura 42 mostra a relação entre o sinal de controle e a tensão de saída obtida em laboratório. Percebe-se pela Figura 42 que a fonte é linear em praticamente toda faixa de trabalho, o que garante ao elemento PZT sua eficácia. Devido a escolha da topologia e dos componentes empregados na fonte, ela pode ser facilmente remanejada de modo a atender uma grande variedade de atuadores piezoelétricos multicamada. Inclusive, com a utilização de um transformador elevador na entrada do circuito de retificação representado pelos 4 diodos, é possível

utilizar a mesma topologia para controlar atuadores piezoelétricos que não sejam multicamadas e que necessitam tipicamente de tensões da ordem de 1kV. Alternativamente para utilização de atuadores que não sejam multicamadas, pode-se optar pela utilização de uma fonte CC-CC de topologia Boost.

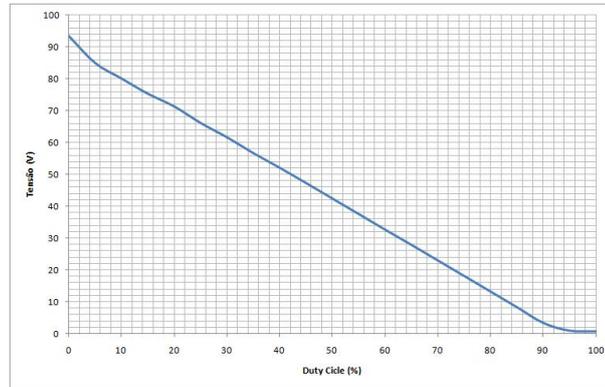


Figura 42: Resposta da fonte CC-CC

4.4 ENSAIO DE SINTONIZAÇÃO

Com o emprego do atuador piezoelétrico, juntamente com o filtro óptico, ensaiaram-se duas FBG, de modo a identificar quais as potências ópticas envolvidas no processo de sintonização e interrogação do comprimento de onda de Bragg. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 43.

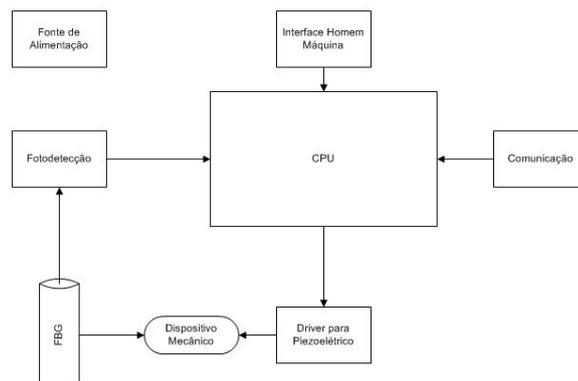


Figura 43: Diagrama de blocos do dispositivo

Esses valores são necessários para o ajuste do circuito elétrico de amplificação. Para o ensaio utilizou-se uma fonte de luz ASE cujo espectro é mostrado na figura 44.

O sinal óptico foi enviado a uma FBG inscrita em uma fibra óptica que está fixada através de cola a base de éster de cianoacrilato no dispositivo mecânico posicionado junto ao atuador

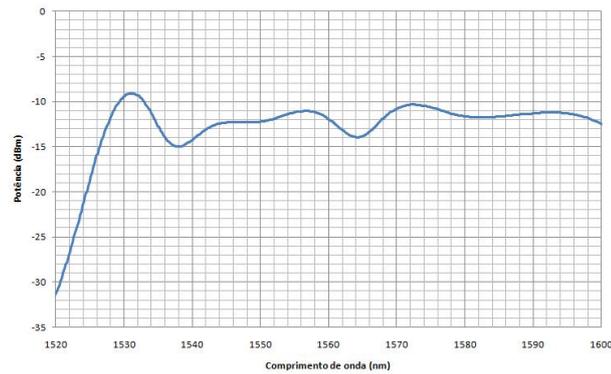


Figura 44: Fonte ASE

piezoelétrico, como mostra a figura 23. A figura 45 mostra o perfil de reflexão da FBG para diversas tensões aplicadas no atuador piezoelétrico.

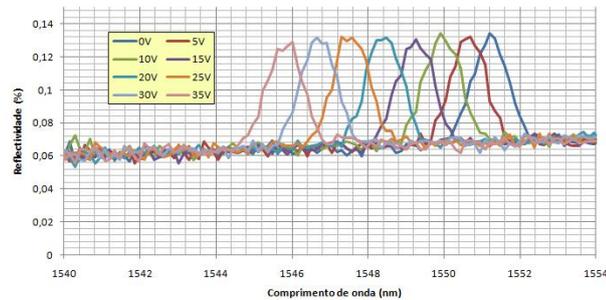


Figura 45: Espectro de reflexão da FBG comprimida

Pela análise da Figura é possível verificar que a FBG apresenta uma reflexão extremamente reduzida, o pico de refletividade foi fortemente prejudicado. Contudo, o ideal seria empregar uma FBG com a máxima reflexão possível, entretanto, estas não estavam disponíveis durante os ensaios.

O sinal refletido pela FBG foi então dividido por um acoplador de potência óptica, e uma parcela foi enviada ao fotodetector, enquanto a segunda parcela, antes de ser enviada ao fotodetector, é filtrada pelo filtro linear. A Figura 46 mostra o espectro óptico que chega a um dos fotodetectores sem passar pelo filtro linear.

A outra parcela do sinal refletido pela FBG atravessa o filtro óptico. Como o sinal refletido pela FBG têm uma potência extremamente reduzida, consequentemente, o sinal filtrado apresenta também potências ópticas reduzidas. Os espectros de reflexão da FBG para diversos valores de sintonização são mostrados na Figura 47.

Após a integração das potências ópticas do sinal que passa pelo filtro linear e que não passa pelo filtro linear, pode-se determinar a linearidade do esquema de interrogação. A Tabela 3 mostra as potências integradas para cada um dos pontos de sintonização ensaiados, utilizando a

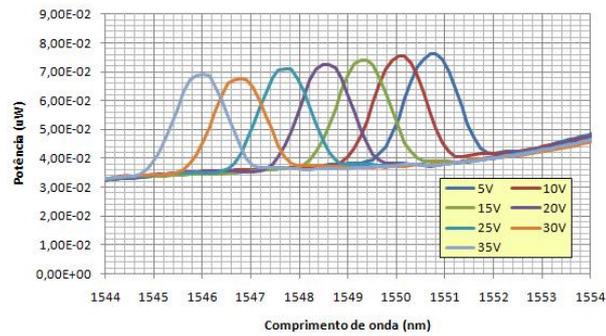


Figura 46: Espectro de reflexão da FBG enviada ao fotodetector

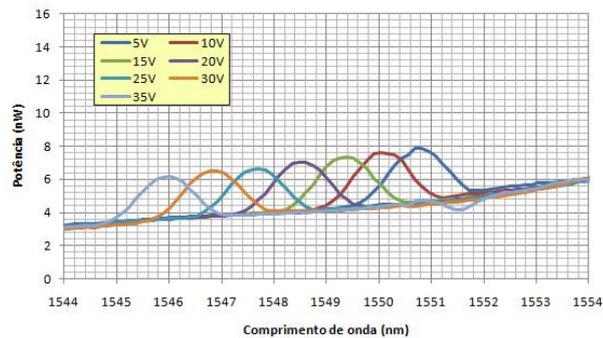


Figura 47: Espectro de reflexão da FBG enviada pelo filtro

função de integração de potência do medidor de espectro óptico.

Sintoniza	P1 (Watt)	P2 (Watt)
5V	3,86E-06	3,66E-07
10V	3,81E-06	3,65E-07
15V	3,77E-06	3,60E-07
20V	3,75E-06	3,58E-07
25V	3,74E-06	3,55E-07
30V	3,71E-06	3,53E-07
35V	3,70E-06	3,51E-07

Tabela 3: Potências medidas

Como fica evidente pela análise da tabela, as variações de potência óptica, de acordo com o sinal de sintonia, que chegam ao fotodetector P2 (relacionados ao sinal filtrado) apresentam diferenças na ordem do nano-Watt, que apesar de estarem ligeiramente acima do valor da corrente de escuro dos fotodetectores são valores muito baixos, mas ainda garantem resolução no processo de interrogação utilizando.

A Figura 48 mostra a curva de referência do sistema de interrogação ensaiado.

Na Figura 48 estão presentes os pontos que representam a relação entre as potências P1 e P2 bem como a regressão linear obtida para esses dados. Fica claro que há uma relação linear

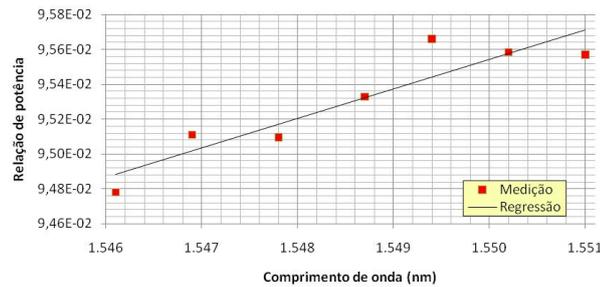


Figura 48: Relação entre as potências P2 e P1

entre as relações das potências integralizadas e o comprimento de onda de Bragg da FBG. Porém, devido ao valor baixo do pico de reflexão da FBG empregada, os ensaios tornaram-se limitados.

De modo a contornar esse problema, foi usada uma segunda FBG. Tomou-se cuidado para que o pico de reflexão da FBG não fosse tão reduzido, obteve-se aproximadamente 7% de refletividade de pico, e ainda relaxou-se o requisito do comprimento físico da FBG, permitindo que ela fosse superior a 2mm. O valor estimado foi de aproximadamente 3mm. Vale lembrar que o comprimento do espaço que a FBG deve ocupar no dispositivo mecânico é de aproximadamente 2mm. Entretanto, essa característica só é importante para o sistema de sintonização, não afetando o sistema de interrogação.

A Figura 49 mostra a localização do comprimento de onda de Bragg em relação a tensão aplicada no atuador piezoelétrico. Como é possível verificar pela análise da figura, o sistema de sintonia empregando a nova FBG permitiu um deslocamento total de aproximadamente 7nm em 65V de tensão aplicada e com um comportamento praticamente linear para todo o intervalo.

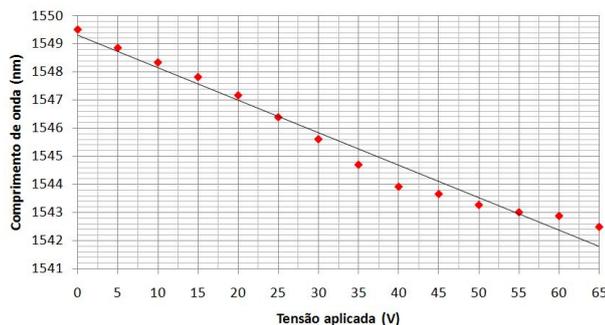


Figura 49: Sintonização empregando FBG com 3mm de comprimento

Após o teste de deslocamento da FBG, o sistema foi submetido ao mesmo teste da FBG anterior. A Figura 50 mostra a reflexão da FBG sem passar pelo filtro óptico.

Percebe-se pela análise da figura que o comportamento da FBG ao ser comprimida é diferente tanto da FBG testada anteriormente quanto dos resultados obtidos através de simulação.

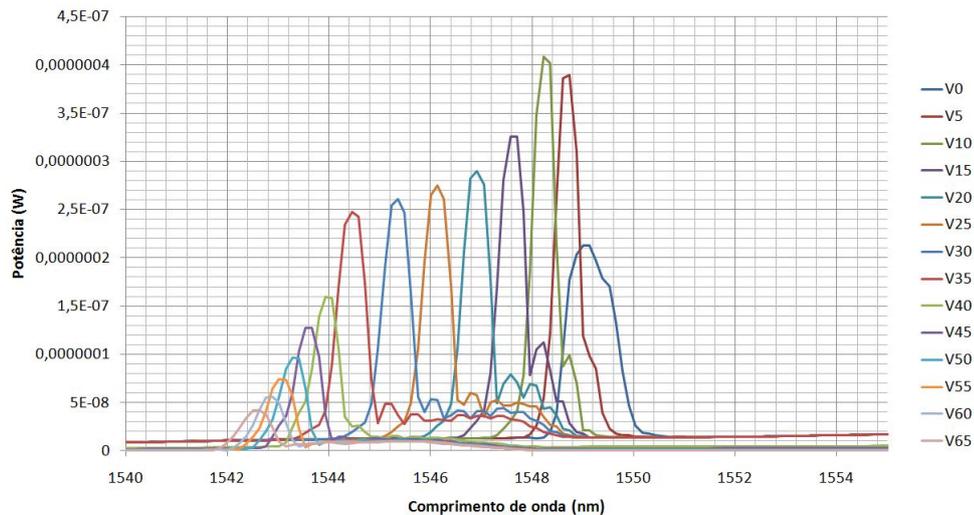


Figura 50: Reflexão da FBG sem passar pelo filtro óptico

Essa divergência está nas características físicas da rede e do dispositivo mecânicos. Como a FBG tem um comprimento superior ao da lacuna onde a FBG deve ser fixada no dispositivo mecânico, a compressão que a FBG sofre é diferente em cada região da fibra. Esse fenômeno cria um efeito de gorjeio na FBG. Nota-se também, que a partir dos 35V há uma diminuição considerável na potência óptica refletida. Esse efeito de gorjeio pode ser verificado pela análise da Figura 50. Verifica-se que após o deslocamento da FBG cria-se um lóbulo em comprimentos de onda superiores ao de pico da rede.

A Figura 51 mostra o espectro de reflexão da FBG para diversos valores de tensão aplicadas ao atuador piezoelétrico, porém passando pelo filtro linear.

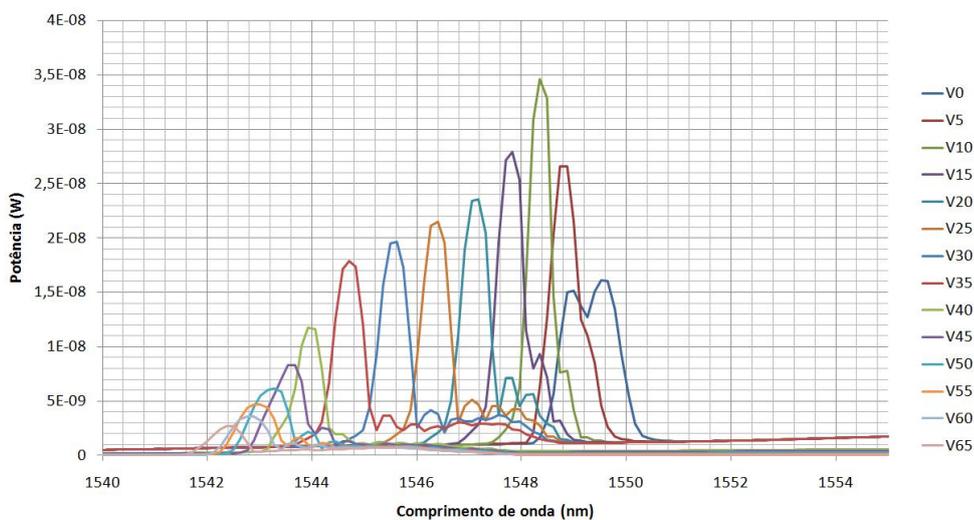


Figura 51: Reflexão da FBG passando pelo filtro óptico

Pela análise da figura, percebe-se que os valores de potência envolvidos são maiores que

os obtidos com a FBG inicialmente ensaiada. Portanto, o aumento do comprimento da FBG melhorou o perfil de reflexão, no que diz respeito ao pico de reflexão, porém tornou-o não linear. A não linearidade do sistema de interrogação pode ser melhor entendida pela análise da Figura 52, que representa a relação entre as potências integradas pelos dois fotodetectores. A Tabela 4 mostra os valores medidos. Vale notar que as potências envolvidas são superiores se comparadas ao caso anterior.

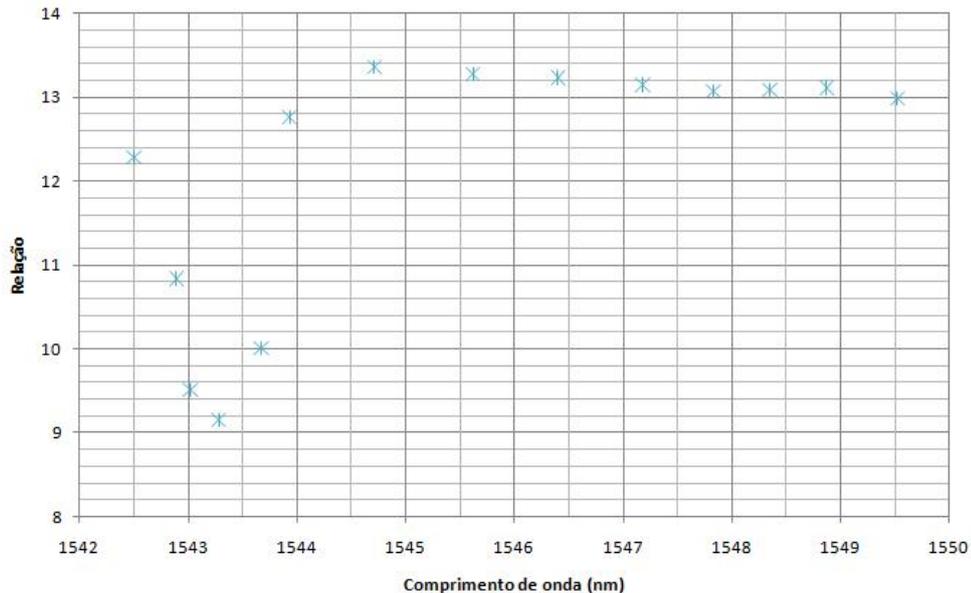


Figura 52: Curva da relação entre potência do sinal filtrado e não filtrado

Sintoniza (V)	P1 (Watt)	P2 (Watt)
0	2,4295E-05	1,87E-06
5	2,46253E-05	1,88E-06
10	2,48192E-05	1,90E-06
15	2,47651E-05	1,89E-06
20	2,47177E-05	1,88E-06
25	2,46426E-05	1,86E-06
30	2,45484E-05	1,85E-06
35	2,44038E-05	1,83E-06
40	8,76513E-06	6,87E-07
45	5,42218E-06	5,42E-07
50	3,42488E-06	3,74E-07
55	2,26941E-06	2,39E-07
60	1,64829E-06	1,52E-07
65	1,30763E-06	1,06E-07

Tabela 4: Potências medidas

Apesar do comportamento não linear da FBG para tensões aplicadas acima de 35V, ou seja, comprimentos de onda inferiores à 1544,71nm, o intervalo de 4.8nm cujas tensões vão de 0V

até 35V apresenta certa linearidade como mostra a Figura 53. Esse intervalo, portanto, pode ser utilizado para fins de interrogação e sintonização.

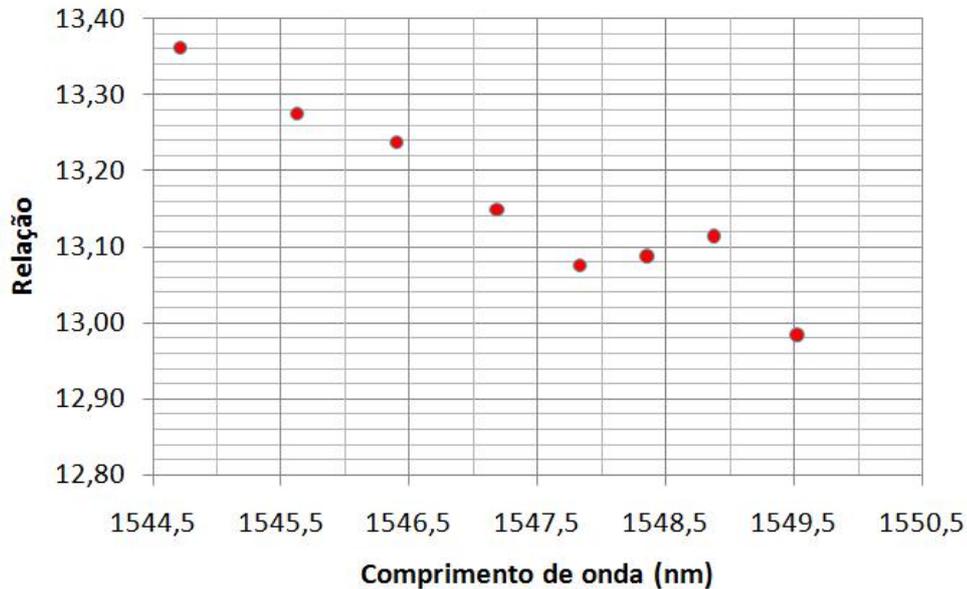


Figura 53: Curva da relação entre potência do sinal filtrado e não filtrado entre 0V e 35V

Portanto, nenhuma das FBGs utilizadas são boas para os propósitos de interrogação ou seleção de canais. Os requisitos de comprimento físico reduzidos das FBGs, devido ao dispositivo mecânico, acarretam em baixas refletividades de pico, como mostrado por Ando *etal* (ANDO et al., 2004). Adicionalmente, o processo de fixação da fibra óptica na peça desenvolvida deve ser melhorado. Entretanto, com esses ensaios, fica demonstrado a viabilidade da utilização do circuito de acionamento do atuador piezoelétrico para sintonização de comprimento de onda de Bragg e ainda a viabilidade do emprego do filtro linear para fins de interrogação.

4.5 ENSAIOS DE VELOCIDADE DE SINTONIZAÇÃO

Para efetuar o ensaio de velocidade de sintonização utiliza-se um banco com 8 canais WDM, com diferentes valores de potência óptica em cada canal de forma a possibilitar a distinção entre canais por um circuito de fotodetecção. Além do banco de canais, utiliza-se o dispositivo mecânico com uma FBG colada e um atuador piezoelétrico inserido, além de um circulador óptico. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 54.

A Figura 55 mostra as portadoras que constituem o banco de canais WDM, na qual estão destacados os canais 1 e 8.

A técnica de medição da velocidade de sintonização consiste em medir o tempo de deslocamento da FBG entre dois canais do banco WDM. Após a medição desse tempo, divide-se esse

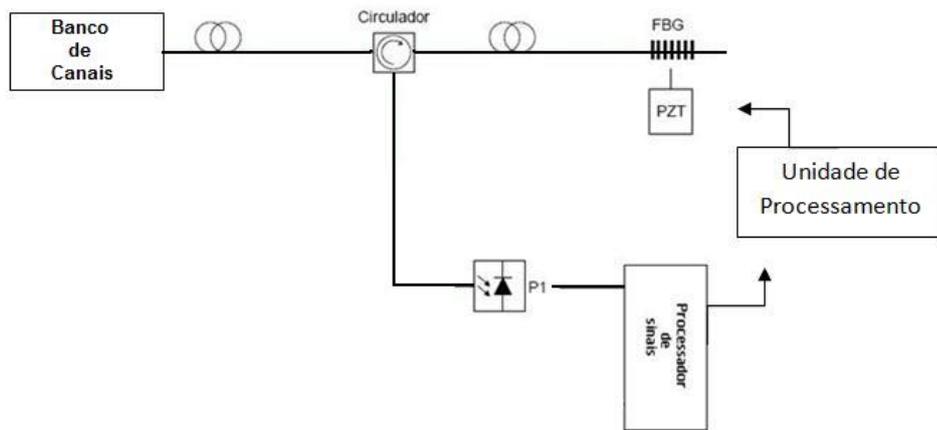


Figura 54: Esquema do ensaio de velocidade de sintonização

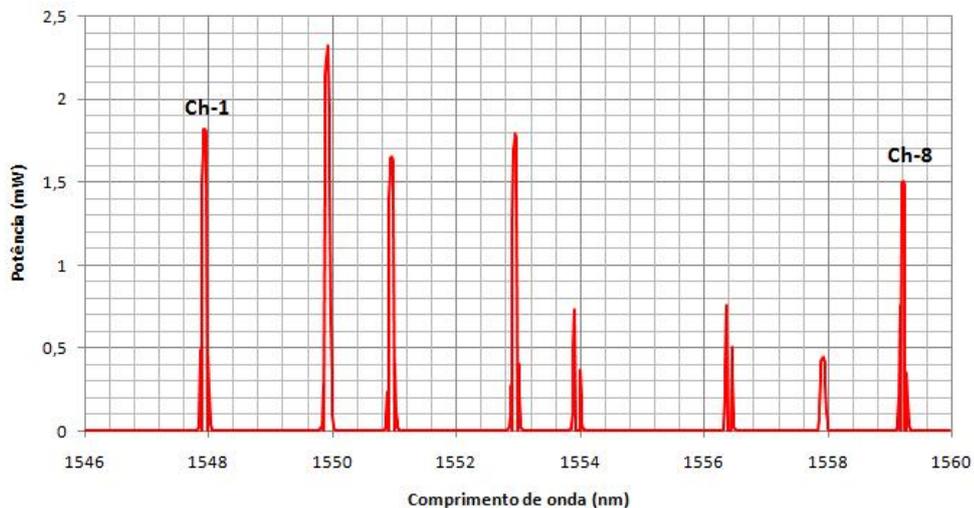


Figura 55: Banco de canais WDM

valor pela distância em comprimento de onda, entre os dois canais utilizados. Devido a diferença de potências ópticas em cada canal é possível verificar pela análise da tensão gerada no circuito de fotodetecção, com o auxílio de um osciloscópio, em qual canal a FBG encontra-se sintonizada.

Portanto, basta sintonizar a FBG utilizando o atuador piezoelétrico em um dos canais e em seguida, efetuar a variação na tensão de alimentação do atuador piezoelétrico, de modo a alterar o comprimento de onda de sintonização da FBG. A Figura 56 mostra a variação do sinal fotodetectado correspondente à troca de canais utilizando o dispositivo mecânico mostrado na Figura 10.

Pela análise da Figura 10 verifica-se que o dispositivo provoca a variação do comprimento de onda, contudo apresenta uma resposta dinâmica muito oscilatória. Isto é causado devido

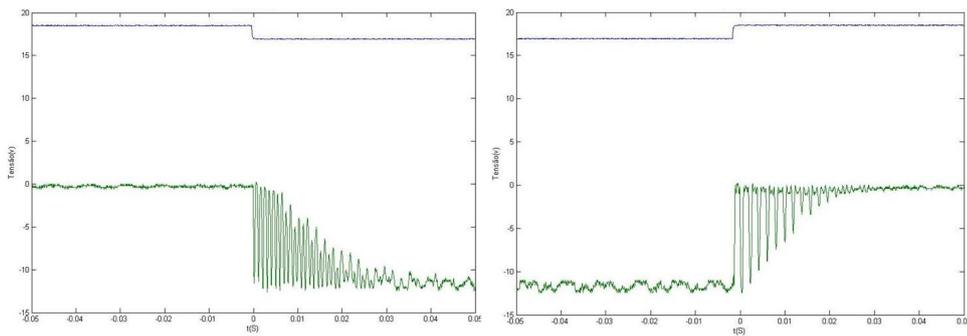


Figura 56: Sintonização de canal

às características mecânicas do dispositivo. Para possibilitar uma melhora significativa na sua resposta é necessário empregar alguma técnica de controle em malha fechada e para tanto é necessário algum sinal para realimentar a malha de controle. Vale ressaltar que não se pode utilizar o sinal óptico para efetuar o controle pois este não é contínuo, visto que se emprega um banco de canais, com canais distintos. A velocidade de sintonização empregando esse dispositivo, sem malha de controle é menor que 1nm/ms (NEVES, 2008).

Para minimizar as oscilações mecânicas e também aumentar a velocidade de sintonização, foi desenvolvido o dispositivo mostrado na Figura 23. Esse novo dispositivo foi testado e a Figura 57 e 58 mostram o sinal detectado correspondente à sintonia entre os canais 7 e 8 e entre os canais 8 e 7, respectivamente. Esses resultados foram obtidos com o sistema em malha aberta.

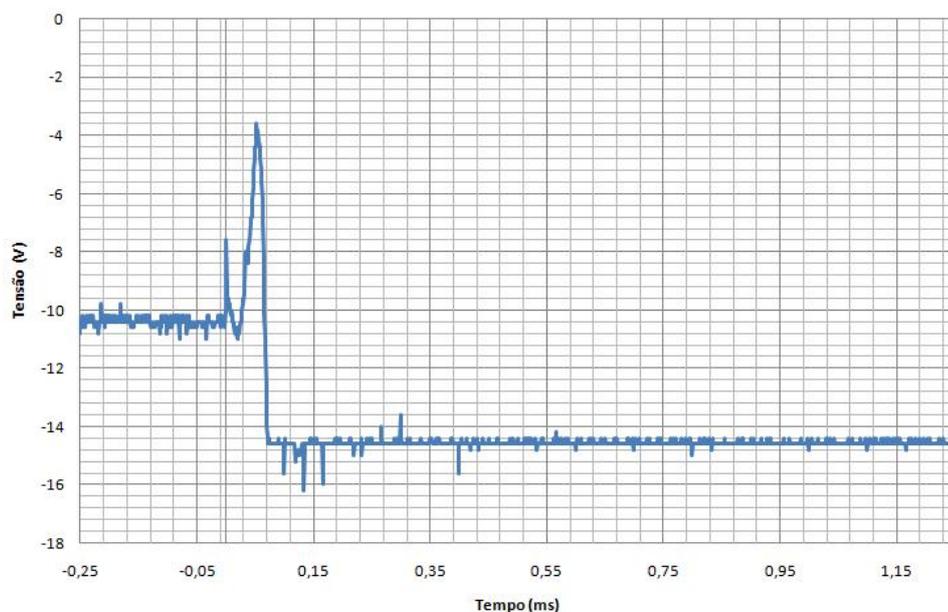


Figura 57: Sintonização de canal - C7 para C8

Ressalta-se que houve uma melhora em relação às oscilações, quando comparado aos re-

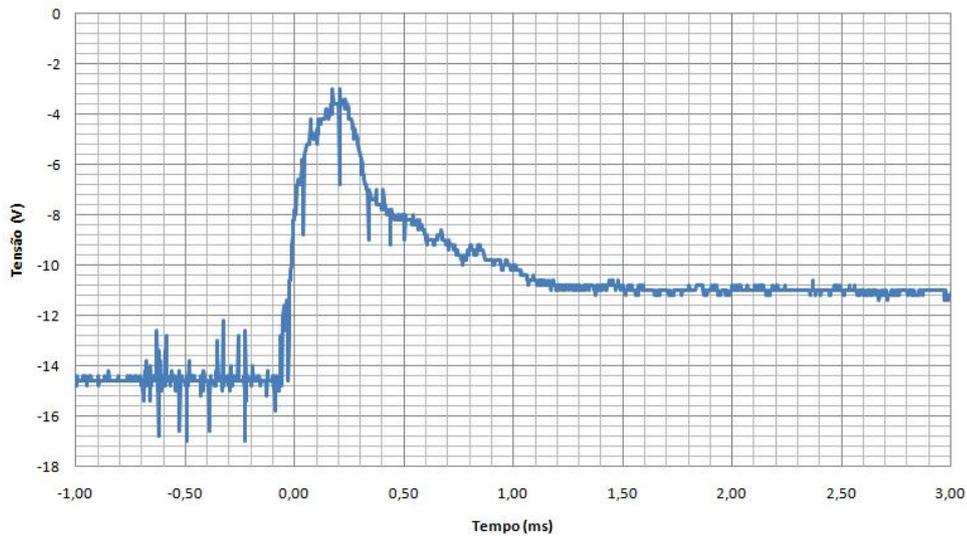


Figura 58: Sintonização de canal - C8 para C7

sultados da Figura 56. A distância em comprimento de onda entre os canais 7 e 8 é de aproximadamente 1,60nm e o tempo de sintonização entre os canais 8 e 7 foi de aproximadamente 1,2ms. Portanto com essa montagem obteve-se uma velocidade de sintonização de 1,33nm/ms. Vale ressaltar que a velocidade de sintonização entre os canais 7 e 8 são muito menores que as velocidades de sintonização entre os canais 8 e 7. Isto deve-se ao fato que durante a transição entre 7 e 8 o dispositivo mecânico sofre relaxação, e na transição de 8 para 7 o dispositivo mecânico sofre uma tração, encontrando mais resistência.

Pode-se utilizar essa característica para tentar minimizar o tempo de chaveamento entre diversos canais. Por exemplo, pode-se fazer uma transição longa de tração entre o canal 8 e o canal 1, e em seguida várias transições subseqüentes de relaxação, entre o canal 1 e 2, em seguida entre o canal 2 e 3, e assim sucessivamente, até o retorno ao canal 8. Obtêm-se assim uma melhora no tempo de uma eventual varredura de diversos canais.

O método de fixação da fibra óptica na peça mecânica aliado ao design da peça são determinantes para se obter melhoras nas velocidades obtidas. Ao longo do tempo, a cola sofre relaxação e as características de compressão e tração da fibra óptica sofrem alterações. Isso impacta não somente na faixa de trabalho do sintonizador mas também na velocidade de sintonização. Adicionalmente, o chaveamento sucessivo da fibra óptica ao longo do tempo, provoca contínuos esforços mecânicos na fibra, e faz com que a fibra se quebre após um ciclo longo de trabalho.

Com o intuito de aumentar a confiabilidade do sistema mecânico, buscou-se outros métodos de fixação da fibra na peça, inclusive utilizando um processo de solda entre a fibra e o metal. Esse processo apesar de extremamente eficiente quanto à fixação da fibra óptica na peça metálica, provocava o apagamento da FBG nela inscrita, devido à temperatura em que a fibra

óptica era submetida no processo de solda. Não foi possível fazer a gravação da FBG após a solda, pois a FBG encontra-se abrigada em um ferrolho opaco.

A Figura 59 mostra o sinal de controle aplicado no processo de sintonização de outro conjunto sintonizador de FBG desenvolvido.

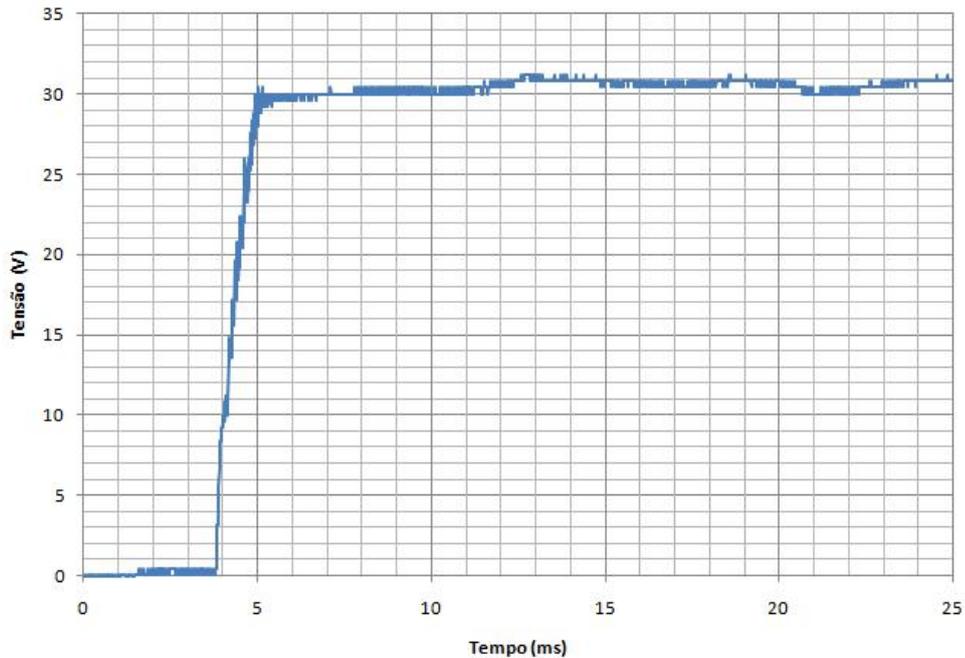


Figura 59: Sinal de controle

A FBG inicialmente está posicionada em 1550nm e após a aplicação de 30V ela desloca-se à 1547nm. A Figura 60 mostra o processo de sintonização desse conjunto, do comprimento de onda de 1550nm até 1547nm. Na Figura 61 é mostrado o processo de volta, de 1547nm até 1550nm.

Nota-se que, assim como no dispositivo anterior, a velocidade de sintonização quando o atuador piezoelétrico sofre relaxação é maior que no caso de compressão. O tempo de sintonização obtido foi de aproximadamente 3ms, portanto a velocidade de sintonização foi de aproximadamente 1nm/ms. Esse novo conjunto porém, tem uma faixa de trabalho de apenas 3nm, devido ao efeito de gorjeio que aparece na fibra para tensões de controle superiores à 35V.

Apesar da funcionalidade comprovada do sistema para sintonização de canais WDM, e as velocidades de sintonização obtidas serem suficientes para atender às recomendações do ITU, tanto a faixa de trabalho obtida quanto as velocidades de sintonização estão aquém das já apresentadas na literatura.

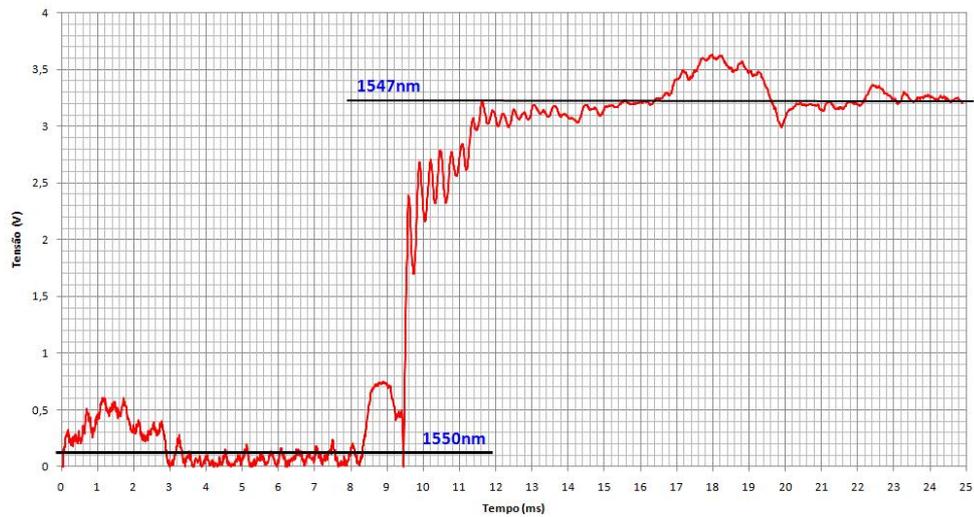


Figura 60: Sinal de sintonização. De 1550nm para 1547nm

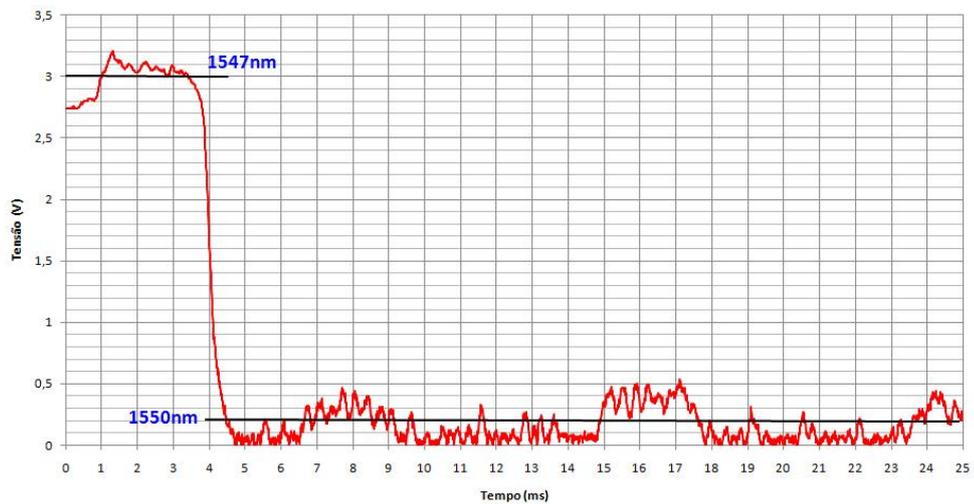


Figura 61: Sinal de sintonização. De 1547nm para 1550nm

4.6 ENSAIOS DO SISTEMA DE INTERROGAÇÃO

O sistema de interrogação que utiliza o filtro óptico linear e um par de fotodetectores foi aferido utilizando-se um Laser Sintonizável. A Figura 62 mostra o esquema de ensaio utilizado.

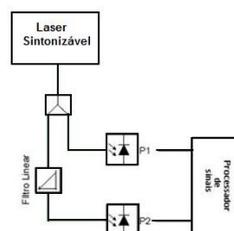


Figura 62: Esquema do ensaio de calibração

O sinal do Laser foi variado de 1560nm até 1510nm. O espectro do laser sintonizado em

diversos comprimentos de onda é mostrado na Figura 63. Na figura o intervalo de sintonização mostrado é de 10nm, entretanto durante os ensaios utilizou-se um intervalo de 1nm.

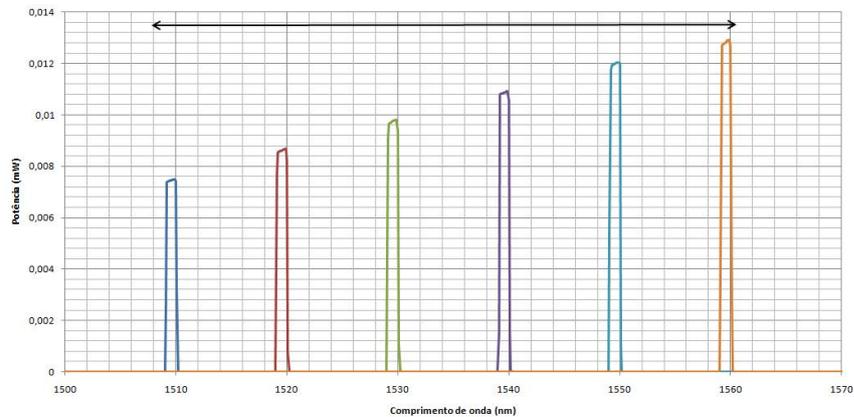


Figura 63: Espectro do laser sintonizável

Vale ressaltar que há variações de potência para cada comprimento de onda sintonizado, esse fato, entretanto não prejudica o processo de interrogação, como já explicado anteriormente. Nota-se ainda que o comprimento de FWHM do sinal é de aproximadamente 1nm, esta limitação é imposta pelas características do analisador de espectro óptico. Na realidade a FWHM do laser é menor que este valor.

A Figura 64 mostra as curvas obtidas após o processamento dos sinais pelos circuitos de fotodeteccção. Os sinais são condicionados pelo circuito de amplificação entre 0 e 3,3V, de modo a respeitar a faixa de trabalho do circuito de conversão analógico-digital.

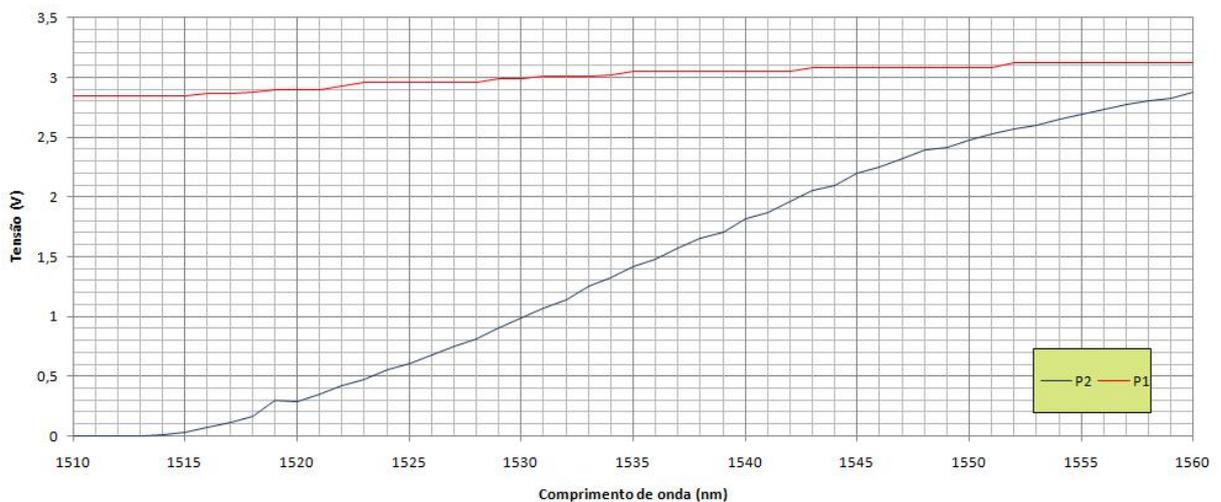


Figura 64: Ensaio de interrogação

A divisão entre as tensões oriundas devido a potência incidente no fotodetector-P2 que recebe o sinal do filtro óptico linear é dividido pela tensão oriunda devido a potência incidente

no fotodetector-P1 que recebe o sinal não filtrado. A relação entre essas tensões são mostradas na Figura 65.

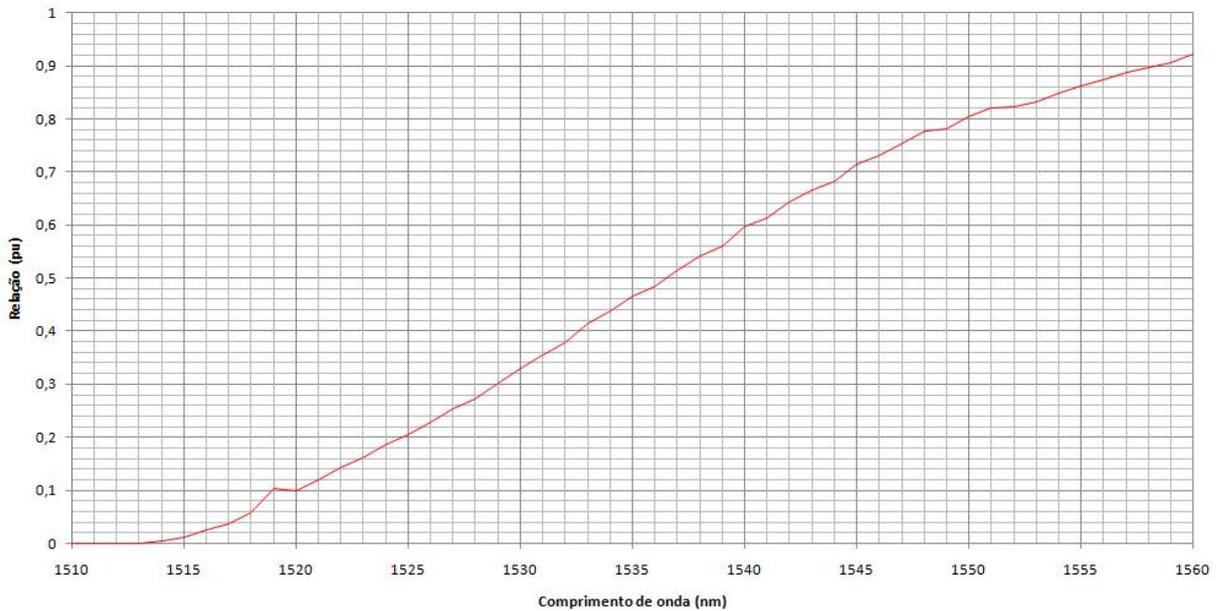


Figura 65: Relação entre potências

Nota-se que há uma relação linear entre as tensões geradas pelos circuitos de ambos os fotodetectores e ainda que a curva do fotodetector P2 apresenta uma inclinação que é justamente a inclinação do filtro óptico linear. Portanto, para determinar o comprimento de onda em que o Laser está sintonizado, basta calcular a relação das potências de ambos os fotodetectores. Se o laser for substituído por uma FBG, pode-se portanto determinar o comprimento de onda de Bragg em que a rede está sintonizada, bastando para tanto, somente analisar a relação entre as potências de ambos os fotodetectores.

Vale ressaltar que é muito importante analisar as potências ópticas envolvidas em toda a faixa de trabalho, a fim de ajustar o circuito de fotodeteção de modo a não degradar a resolução do comprimento de onda. Adicionalmente o circuito de condicionamento de sinal deve filtrar o sinal de modo a eliminar o ruído, porém sem prejudicar o tempo de resposta do sistema.

Com o emprego de um conversor A/D de 12 bits, a sensibilidade calculada do sistema para a faixa de trabalho de 1520nm até 1560nm é de aproximadamente 10pm. Ajustando-se o circuito de amplificação para gerar 0V quando a FBG estiver em 1520nm e para gerar 3.3V quando a FBG estiver em 1560nm, têm-se $2^{12} = 4096$ valores para representar os 40nm. Para se obter este valor teórico de resolução deve-se atentar especialmente para o ruído presente no circuito de fotodeteção.

Os ensaios demonstraram a viabilidade prática do emprego de filtros lineares para interro-

gação do comprimento de onda, e viabilidade do seu emprego para interrogação do comprimento de onda de Bragg.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÃO

O sistema desenvolvido, composto por um microcontrolador, um *driver* para acionamento de atuador piezoelétrico, um circuito de fotodeteção que utiliza fotodetectores no modo fotovoltaico e periféricos se mostrou adequado para ser empregado em um equipamento de sintonização e interrogação de FBG.

O *driver* para acionar o dispositivo piezoelétrico pode trabalhar com atuadores piezoelétricos com tensões de acionamento de 0-170V, e em casos de tensões diferentes dessa faixa, os ajustes são mínimos. O tempo de resposta do acionamento se mostrou adequado para as aplicações em questão.

A peça mecânica empregada obteve uma velocidade de resposta de aproximadamente 1nm/ms, valor esse superior ao obtido anteriormente de 0.3nm/ms com sintonizador baseado em tração. Acredita-se, porém, que ainda deve-se melhorar a peça mecânica de modo a evitar que a fibra óptica sofra flambagem e deve-se estudar como aprimorar o seu processo de fixação da fibra de modo a garantir que o comportamento da fibra óptica não varie ao longo do tempo.

Devido a natureza do dispositivo mecânico, há necessidade de que a FBG tenha um comprimento reduzido. No caso da peça utilizada, esse valor deve ser de aproximadamente 2mm. Contudo, sabe-se que o comprimento físico da FBG é um dos parâmetros que afeta a refletividade e portanto, menores serão as potências ópticas recebidas pelo circuito de fotodeteção do interrogador. Para esse comprimento de 2mm, a potência óptica chega facilmente perto da corrente de escuro do fotodetector. Caso o comprimento da rede seja maior que 2mm, devido ao processo de fixação, através do qual apenas parte da rede é comprimida, ela se torna aperiódica e seu perfil irregular. Isto acarreta em uma resposta degradada no interrogador e ainda inadequada para fins de sintonização.

Identificou-se que a baixa refletividade devido ao comprimento físico da FBG pode ser contornada através do ajuste da magnitude de modulação do índice de refração, ou mesmo

através da utilização de uma fibra óptica com outro valor de índice de refração efetivo.

Portanto, esses requisitos conflitantes devem ser resolvidos. Ainda há a necessidade de intensificar o estudo de outro projeto para o compressor (peça mecânica) e do processo de fixação da fibra óptica. Adicionalmente, pode-se tentar maximizar a potência óptica recebida pelos fotodetectores eliminando todos os conectores ópticos ou trabalhar com fonte de sinal, cuja potência óptica seja mais elevada.

O interrogador passivo utilizando um filtro óptico com perfil linear, construído com a tecnologia de filmes finos, se mostrou adequado para a faixa de trabalho de 1520nm até 1580nm. O suporte da lâmina do filtro deve ainda ser melhorada de forma a elevar a inclinação da função de transferência obtida experimentalmente. Atualmente este valor está $1/4$ do valor especificado pelo fabricante, e acredita-se que esse desempenho seja causado por questões de alinhamento entre a lâmina e o suporte do conjunto. Vale ressaltar que a faixa de trabalho do interrogador pode ser modificada facilmente, bastando para tanto trocar o filtro óptico e fazer os ajustes no circuito de fotodeteção.

A sensibilidade teórica do interrogador obtida foi de aproximadamente 10pm, valor esse adequado para monitoramento e controle de sintonizadores de canais WDM. Para fins de sensoriamento, a resolução em comprimento de onda pode ser significativamente melhorada, bastando, para tanto, readequar a faixa de trabalho e ainda ajustar o circuito de fotodeteção de acordo com as potências ópticas envolvidas.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

As características das fibras ópticas utilizadas para a escrita da FBG devem ser investigadas, juntamente com as técnicas de gravação das FBG de modo a melhorarem as características de reflexão. Deve-se investigar outras técnicas de fixação de fibra em metal e ainda o filtro óptico com perfil linear deve ser melhor acondicionado de modo a propiciar um perfil de transmissividade melhorado. Adicionalmente, deve-se aplicar técnicas de controle ao PZT, de modo a obter a melhor resposta do dispositivo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J.; SANTOS J.L.AND CARVALHO, A.; LAGE, A. Fiber bragg sensor interrogation system based on a ccd spectrometer. **Proceedings of IEEE Sensors**, v. 2, p. 909 – 913, 2003.
- ANDO, M. et al. Dependence of fiber bragg grating characteristics on its length. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 43, p. 4234–4235, 2004.
- BOGDANOV, S. V. The origin of the piezoelectric effect in pyroelectric crystals. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 49, n. 11, p. 1469–1473, Novembro 2002.
- CHANCLOU, P. et al. Overview of the optical broadband access evolution: A joint article in the i.s.t. network of excellence e-photon/one. **IEEE Communications Magazine**, v. 44, n. 8, p. 29–35, Agosto 2006.
- CHIH-HSIANG; CHANG, K.-M. Adaptive neural network control for piezoelectric hysteresis compensation in a positioning system. **Industrial Electronics, 2006 IEEE International Symposium**, v. 2, p. 829–834, 2006.
- CHUANG, K.-C.; MA, C.-C. Tracking control of a multilayer piezoelectric actuator using a fiber bragg grating displacement sensor system. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control**, v. 56, n. 10, p. 2036–2049, Outubro 2009.
- COOPER, D. J. F.; SMITH, P. W. E. Simple and highly sensitive method for wavelength measurement of low-power time-multiplexed signals using optical amplifiers. **Journal Of Lightwave Technology**, v. 21, p. 1612–1620, 2003.
- FERREIRA, L. A.; SANTOS, J. L.; FARAH, F. Pseudoheterodyne demodulation technique for fiber bragg grating sensors using two matched gratings. **Ieee Photonics Technology Letters**, v. 9, p. 487–489, 1997.
- GAO, H. et al. Ingaas spectrometer and f-p filter combined fbg sensing multiplexing technique. **Lightwave Technology, Journal of**, v. 26, n. 14, p. 2282–2285, 2008.
- GOH, C. S.; SET, S. Y.; KIKUCHI, K. Widely tunable optical filters based on fiber bragg gratings. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14, p. 1306–1308, 2002.
- GREEN, J. P. E. Fiber to the home: The next big broadband thing. **IEEE Communications Magazine**, v. 42, n. 9, p. 100–106, Setembro 2004.
- HILL, K. et al. Efficient mode conversion in telecommunication fibre using externally written gratings. **Electronics Letters**, v. 26, n. 16, p. 1270 –1272, 2 1990.
- HILL, K. O. et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Appl. Phys. Letters**, v. 32, p. 647, 1978.

- IOCCO, A. et al. Bragg grating fast tunable filter for wavelength division multiplexing. **Journal of Lightwave Technology**, v. 17, p. 1217–1221, 1999.
- JERSEY, A. D. et al. Fiber grating sensors. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1442–1463, 1997.
- JIANG, Q.; SUI, Q.; WANG, J. Experimental and technical study of fiber bragg grating vibration detection based on linear tilt filter method. In: **Automation and Logistics, 2007 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1295–1298.
- KASHYAP, R. **Fiber Bragg Grating**. [S.l.]: Optics and Photonics, 2006.
- LEWIS, T. The piezoelectric effect. In: **Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 1, p. 717–720.
- LIZHI, P. et al. Feedforward controller based-on piezoelectric actuator's hysteresis model and its performance simulation of an xy plane motion stage. In: **Electronic Measurement Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 3–1073–3–1077.
- MELLE, S. M.; LIU, K.; MEASURES, R. M. A passive wavelength demodulation system for guided-wave bragg grating sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 4, p. 516–518, 1992.
- MIAO, Y. et al. Dynamic temperature compensating interrogation technique for strain sensors with tilted fiber bragg gratings. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 20, p. 1393–1395, 2008.
- MOHAMMAD, N. et al. Analysis and development of a tunable fiber bragg grating filter based on axial tension/compression. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, p. 2001–2013, 2004.
- MOREY, W. W.; MELTZ, G.; GLENN, W. H. Holography generated grating in optical fibers. **Optics and Photonics News**, v. 1, n. 7, p. 14–16, 1990.
- MURPHY, D. F. et al. Interferometric interrogation of in-fiber bragg grating sensors without mechanical path length scanning. **Journal Of Lightwave Technology**, v. 19, p. 1004–1009, 2001.
- NEVES, P. de T. J. **Análise Temporal do Espectro Óptico em Redes de Bragg em Fibra**. Tese (Doutorado) — CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides**. [S.l.]: Elsevier Academic Press, 2006.
- OLIVEIRA, R. et al. Vibration mode analysis of a silica horn fiber bragg grating device. **Optics Communications**, v. 283, p. 1296–1302, 2010.
- OPTIWAVE. **OptiSystem**. Nepean, Ontario, Canada, 2010.
- OTHONOS, A.; KALLI, K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. [S.l.]: Artech House, 1999.
- RU, C.; CHEN, L.; SUN, L. Tracking control method of piezoelectric actuator for compensating hysteresis and creep. In: **Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2007. NEMS '07. 2nd IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 186–190.

RU, C. et al. An open-loop operation method of piezoelectric actuator based on a new hysteresis model. **6th Congress on Intelligent Control and Automation**, v. 1, p. 8366–8369, 2006.

RU, C.-H. et al. Adaptive identification and control of hysteresis for piezoelectric actuator. In: **Machine Learning and Cybernetics, 2006 International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 2834–2839.

SALEH, B. E. A.; TEICH, M. C. **Fundamentals of Photonics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc, 1991.

SHARUPICH, L.; TUGOV, N. **Optoelectronics**. [S.l.]: MIR, 1987.

SPILLMAN W.B., J. et al. Temperature and source fluctuation insensitive demodulation technique for bragg grating sensors. In: **Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. OFS 2002, 15th**. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 187–190.

SUN, J.; CHAN, C. C.; DONG, X. Y. A wide tunable range fiber bragg grating filter. **Journal Of Optoelectronics And Advanced Materials**, v. 8, p. 1250–1253, 2006.

SUZUKI, G.; ESASHI, M. Planar fabrication of multilayer piezoelectric actuator by groove cutting and electroplating. In: **The Thirteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems**. [S.l.: s.n.], 2000. p. 46–51, 23–27.

SWARTZ, S. Topics in electronic ceramics. **Electrical Insulation, IEEE Transactions on**, v. 25, n. 5, p. 935–987, Outubro 1990.

UNAMUNO, A.; LI, L.; UTTAMCHANDANI, D. Fiber bragg grating demodulator based on hybrid optical mems. **IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics**, v. 10, p. 598–603, 2004.

UNAMUNO, A.; UTTAMCHANDANI, D. Hybrid moems tunable filter for interrogation of fiber bragg grating sensors. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, p. 202–204, 2005.

WU, Z. et al. Tunable monolithic dwdm band-selection interleaver filter switch on silicon-on-insulator substrate. **Journal Of Lightwave Technology**, v. 26, n. 19, p. 3363–3368, 2008.

YEOM, D. I.; PARK, H. S.; KIM, B. Y. Tunable narrow-bandwidth optical filter based on acoustically modulated fiber bragg grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 16, p. 1313–1315, 2004.

YU, Y.; ZHAO, H. A novel demodulation scheme for fiber bragg grating sensor system. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, p. 166–168, 2005.

ZU, W.; GU, X. Fast fiber-optic tunable filter based on axial compression on a fiber bragg grating. **Applied Optics**, v. 45, p. 6457–6462, 2006.