

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

Alexander Cascardo Carneiro

**TÉCNICA AUTO-REFERENCIÁVEL DE INTERROGAÇÃO
DE GRADE DE BRAGG PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE
TEMPERATURA E VIBRAÇÕES**

NITERÓI
2014

Alexander Cascardo Carneiro

**TÉCNICA AUTO-REFERENCIÁVEL DE INTERROGAÇÃO
DE GRADE DE BRAGG PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE
TEMPERATURA E VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Orientador: Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero

NITERÓI
2014

Alexander Cascardo Carneiro

**TÉCNICA AUTO-REFERENCIÁVEL DE INTERROGAÇÃO
DE GRADE DE BRAGG PARA MEDIÇÃO SIMULTÂNEA DE
TEMPERATURA E VIBRAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Comunicações Ópticas.

Aprovado em ____ de _____ de 2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Andrés Pablo López Barbero - Orientador

Universidade Federal Fluminense

Prof^ª. Dr.^a. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi

Instituto Militar de Engenharia

Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Vinicius Nunes Henrique Silva

Universidade Federal Fluminense

NITERÓI
2014

Dedico este trabalho a meus familiares, amigos, aos colegas do LaCop, aos professores e todos os demais funcionários do Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da UFF, e também a você leitor.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me colocado nesse caminho;

Aos meus familiares pelo apoio incondicional;

Aos meus amigos pelo incentivo nas horas de dificuldades;

Ao meu orientador, sempre disposto a me auxiliar em todos os aspectos;

Aos professores, pelos ensinamentos que foram fundamentais para a minha formação;

Aos colegas do LaCop que, além do apoio, tornaram essa minha caminhada mais prazerosa;

Ao CNPq processo 481457/2012-7, à Faperj processo E-26/110.341/2014, ao INCT Fotonicom, ao INCT INERGE, à Eletronorte contrato nº 4500072363 e à CAPES pelos subsídios dados a este trabalho.

Também a todos que direta ou indiretamente auxiliaram na conclusão deste trabalho.

Resumo

Os sensores ópticos baseados em grades de Bragg em fibras ópticas (FBGs) vêm se tornando um dispositivo bastante utilizado devido a sua alta sensibilidade e suas vantagens relacionadas às propriedades das fibras ópticas, tais como imunidade a interferências eletromagnéticas, baixo peso, tamanho compacto e resistividade à corrosão química. Esses sensores ópticos são usados no monitoramento de temperatura, deformação mecânica, pressão, ultrassom, aceleração, índice de refração, força e campos magnéticos de alta intensidade. Esse trabalho apresenta uma técnica auto-referenciável de interrogação de FBG para medição simultânea de temperatura e vibrações. Através dessa técnica é possível dissociar as variações sofridas pelo espectro da FBG devido à temperatura das variações devido à vibração.

No presente trabalho, é proposta uma técnica de interrogação capaz de monitorar uma FBG sensora sujeita a vibrações e à variação de temperatura, simultaneamente, utilizando uma FBG interrogadora, funcionando como filtro sintonizável auto-referenciado. A FBG interrogadora é fixada a uma cerâmica piezoelétrica de titanato zirconato de chumbo (PZT) que vibra em baixa frequência. Uma rotina em software calcula a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG interrogadora vibrando em baixa frequência. Quando essa relação tem valor acima de um limiar, o espectro de reflexão da FBG sensora está operando na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Nesse caso, as vibrações e a variação da temperatura da FBG sensora podem ser medidas. Como o valor da potência de ambos harmônicos é proporcional à potência de entrada da FBG interrogadora, a relação entre a potência dos harmônicos independe da potência de entrada, criando assim um mecanismo auto-referenciável.

Palavras-chave: Grades de Bragg em Fibras Ópticas. Técnica Auto-Referenciável de Interrogação. Temperatura. Vibração.

Abstract

Optical sensors based on fiber Bragg gratings (FBGs) are becoming a widely used device due to its high sensitivity and advantages related to the properties of optical fibers, such as immunity to electromagnetic interferences, light weight, compact size and resistivity to chemical corrosion. These optical sensors are used to monitor temperature, mechanical deformation, pressure, ultrasound, acceleration, refractive index, strength and high intensity magnetic fields. This work presents a FBG interrogation self-referencing technique for simultaneously measurement of temperature and vibration. Through this technique it is possible to separate variations of the FBG spectrum due to the temperature of the variation due to the vibration.

In the present work, an interrogation technique capable of monitoring a sensing FBG subjected simultaneously to vibration and temperature variation, using an FBG interrogator, working as a self-referenced tunable filter is presented. The FBG interrogator is attached to a lead zirconate titanate (PZT) piezoelectric ceramic that is vibrating at low frequency. A software routine calculates the ratio of the first and the second harmonic powers of the resulting signal from the FBG interrogator vibrating at low frequency. When this ratio is above a threshold value, the reflection spectrum of the sensing FBG is operating in the linear region of the transmission spectrum of the FBG interrogator. In this case, vibration and temperature variations of the sensing FBG can be measured. As the value of both harmonic powers is proportional to the input power, the ratio of the harmonic powers is independent of the input power, creating a self-referencing mechanism.

Keywords: Fiber Bragg Gratings. Interrogation Self-Referencing Technique. Temperature. Vibration.

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	14
1.1. Histórico das grades em fibras ópticas.....	14
1.2. Características das grades em fibras ópticas	16
1.3. Motivação e proposta da dissertação	19
1.4. Organização da dissertação	20
Referências Bibliográficas	22
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTOS DAS GRADES EM FIBRAS ÓPTICAS	23
2.1. Fotossensibilidade em fibras ópticas.....	23
2.1.1. Modelo dos centros de cor	24
2.1.2. Modelo do dipolo.....	24
2.1.3. Modelo da relaxação da tensão	25
2.1.4. Modelo da densificação ou compactação	25
2.2. Técnicas de melhoria de fotossensibilidade.....	26
2.2.1. Codopagem	26
2.2.2. Hidrogenação	26
2.3. Princípio de funcionamento de grades em fibras ópticas	27
2.4. Estado da arte em técnicas de interrogação de FBG.....	30
Referências Bibliográficas	44
CAPÍTULO 3 TÉCNICA DE INTERROGAÇÃO DE FBG PROPOSTA.....	47
3.1. Circuito de sensoriamento.....	49
3.1.1. Fonte de ASE	51
3.1.2. Circulador óptico	53
3.1.3. FBG sensora.....	54
3.1.4. Junção peltier no sensoriamento	57
3.1.5. Cerâmica piezoelétrica no sensoriamento	58
3.2. Circuito de interrogação	61
3.2.1. FBG interrogadora	62
3.2.2. Fotodetector	63
3.2.3. Placa de aquisição	64
3.2.4. Junção peltier na interrogação	65
3.2.5. Cerâmica piezoelétrica na interrogação	67
3.2.6. Computador	68
3.3. Modelagem matemática da técnica de interrogação	69

CAPÍTULO 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	73
4.1. Deslocamento do espectro em função da temperatura.....	73
4.2. Relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico	78
4.3. Análise dos resultados obtidos para a fase de sintonia	87
4.3.1. Análise da fase de sintonia a partir do lado esquerdo.....	92
4.3.2. Análise da fase de sintonia a partir do lado direito.....	95
4.4. Análise dos resultados obtidos para a fase de medição	96
CAPÍTULO 5 CONCLUSÃO	103
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	104
APÊNDICES	105
A. Medição da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico.....	105
B. Rotina para a medição da linearidade.....	106
C. Rotina para o controle da corrente da junção peltier.....	111
D. Funções obtidas a partir de gráficos.....	114
D1. Função $\Phi^-(h)$	114
D2. Função $\Phi^+(h)$	115
D3. Função $I(\lambda_L)$	116
D4. Função $T(i)$	117

Lista de Figuras

Figura 2-1: Representação de uma grade em fibras ópticas	28
Figura 2-2: Disposição dos modos de casca propagantes e guiados propagantes e contra-propagantes em termos da constante de propagação	29
Figura 2-3: Técnica de interrogação de FBG passiva utilizando filtros fixos	31
Figura 2-4: Técnica de interrogação de FBG usando WDM	32
Figura 2-5: Técnica de interrogação de FBG usando detecção interferométrica	34
Figura 2-6: Técnica de interrogação de FBG usando filtro Fabry-Perot sintonizável	36
Figura 2-7: Parâmetros relevantes para descrição do espectro de reflexão da FBG	38
Figura 2-8: Demodulação a partir de filtros de borda linear	40
Figura 2-9: Demodulação a partir de fontes sintonizáveis	41
Figura 2-10: Montagem do sensor de ultrassom para medição no interior de um tanque de água	42
Figura 2-11: Diagrama esquemático da técnica de interrogação usando dois comprimentos de onda	43
Figura 3-1: Diagrama representativo da técnica de interrogação de FBG proposta	48
Figura 3-2: Diagrama representativo do circuito de sensoriamento	50
Figura 3-3: FBG sensora submetida a vibrações de uma cerâmica piezoelétrica e à variação da temperatura de uma junção peltier	51
Figura 3-4: Fonte de ASE para bandas C e L	51
Figura 3-5: Densidade espectral de potência da fonte de ASE	52
Figura 3-6: Circulador óptico para bandas S, C e L	53
Figura 3-7: Função de transferência da FBG sensora	55
Figura 3-8: Disposição dos elementos ópticos em relação ao circulador	55
Figura 3-9: Densidade de potência da fonte de ASE	56
Figura 3-10: Espectro de reflexão da FBG sensora	56
Figura 3-11: Junção peltier	57
Figura 3-12: Temperatura da junção peltier usada no sensoriamento em função da corrente elétrica aplicada	58
Figura 3-13: PZT usado no circuito de sensoriamento	59

Figura 3-14: Representação da modulação do espectro de reflexão da FBG sensora devido às vibrações.....	60
Figura 3-15: Diagrama representativo do circuito de interrogação.....	61
Figura 3-16: Função de transferência da FBG interrogadora.....	63
Figura 3-17: Fotodetector InGaAs PDA10CS.....	63
Figura 3-18: Placa de aquisição NI USB-6210.....	64
Figura 3-19: Temperatura da junção peltier usada na interrogação em função da corrente elétrica aplicada.....	66
Figura 3-20: Deslocamento do espectro de ambas FBG sensora e interrogadora devido à temperatura.....	67
Figura 3-21: PZT usado no circuito de interrogação.....	67
Figura 3-22: Diagrama completo do circuito de interrogação, contendo a rotina para a medição da linearidade (RL), a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) e a rotina de medição (RM).....	68
Figura 3-23: Resultado da convolução entre o espectro de reflexão da FBG sensora e o espectro de transmissão da FBG interrogadora.....	70
Figura 3-24: Variação do espectro de potência na saída da FBG interrogadora em função das vibrações.....	71
Figura 4-1: Espectro de reflexão da FBG sensora em três casos: quando a temperatura da junção peltier no sensoriamento é de 20, 40 e 60 °C.....	74
Figura 4-2: Comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em função da temperatura da junção peltier no sensoriamento.....	75
Figura 4-3: Espectro de transmissão da FBG interrogadora identificando o comprimento de onda de pico que mede 1550,160 nm e o comprimento de onda da região linear que mede 1550,321 nm.....	76
Figura 4-4: Espectro de transmissão da FBG interrogadora em três casos: quando a temperatura da junção peltier na interrogação é de 20, 40 e 60 °C.....	77
Figura 4-5: Comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da temperatura da junção peltier na interrogação.....	77
Figura 4-6: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso A, no qual o comprimento de onda diferencial mede -0,124 nm.....	79
Figura 4-7: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso B, no qual o comprimento de onda diferencial mede 0 nm.....	80

Figura 4-8: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso C, no qual o comprimento de onda diferencial mede 0,143 nm	80
Figura 4-9: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora nos três casos: A, B e C....	81
Figura 4-10: Sinal de controle no domínio do tempo.....	81
Figura 4-11: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso A	83
Figura 4-12: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso A	83
Figura 4-13: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso B	84
Figura 4-14: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso B	84
Figura 4-15: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso C	85
Figura 4-16: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso C	85
Figura 4-17: Relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico em função do comprimento de onda diferencial	86
Figura 4-18: Pico do gráfico da Figura 4-17	87
Figura 4-19: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico	88
Figura 4-20: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora esta à esquerda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora	89
Figura 4-21: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora esta à direita da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora	89
Figura 4-22: Comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação	90

Figura 4-23: Corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação em função do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora	91
Figura 4-24: Temperatura da FBG sensora em função da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação	98
Figura 4-25: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso A	99
Figura 4-26: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso B	99
Figura 4-27: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso C	100
Figura 4-28: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso A	100
Figura 4-29: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso B	101
Figura 4-30: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso C	101
Figura A-1: Cálculo da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico	105
Figura B-1: Rotina para medição da linearidade (RL) no LabVIEW na etapa de verificação	107
Figura B-2: Rotina para medição da linearidade (RL) na transição entre a etapa de verificação e ajuste da fase de sintonia	108
Figura B-3: Rotina para medição da linearidade (RL) na etapa ajuste da fase de sintonia....	109
Figura B-4: Rotina para medição da linearidade (RL) na fase de medição.....	110
Figura C-1: Rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) – parte 1	112
Figura C-2: Rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) – parte 2	113
Figura D-1: Função $\Phi^-(h)$, que corresponde ao gráfico da Figura 6-20 do item 6.3	114
Figura D-2: Função $\Phi^+(h)$, que corresponde ao gráfico da Figura 6-21 do item 6.3	115
Figura D-3: Função $I(\lambda_L)$, que corresponde ao gráfico da Figura 6-23 do item 6.3	116
Figura D-4: Função $T(i)$, que corresponde ao gráfico da Figura 6-24 do item 6.4	117

Lista de Tabelas

Tabela 3-1: Especificações técnicas da fonte de ASE para bandas C e L.....	52
Tabela 3-2: Especificações técnicas do circulador óptico para bandas S, C e L.....	54
Tabela 3-3: Especificações técnicas da FBG sensora.....	54
Tabela 3-4: Especificações técnicas da junção peltier.....	57
Tabela 3-5: Especificações técnicas da FBG interrogadora	62
Tabela 3-6: Especificações técnicas do fotodetector InGaAs PDA10CS.....	64
Tabela 3-7: Especificações técnicas da placa de aquisição NI USB-6210.....	65
Tabela 4-1: Valores binários transmitidos da rotina para a medição de linearidade (RM) para a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) e para a rotina de medição (RM), em cada caso	92
Tabela 4-2: Valores binários transmitidos da rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) para a rotina para medição da linearidade (RL) e para a rotina de medição (RM), em cada caso	94
Tabela 4-3: Valores binários transmitidos da rotina de medição (RM) para a rotina para medição da linearidade (RL) e para a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC), em cada caso	97

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Histórico das grades em fibras ópticas

Em 1966 foi descoberto o efeito fotorrefrativo, que consiste na mudança do índice de refração induzida por um feixe de luz incidente com variação espacial de intensidade. Na fibra óptica, quando é realizada uma perturbação periódica no índice de refração, produz-se uma grade. Geralmente, as grades em fibras ópticas são realizadas através da alteração do índice de refração do núcleo em intervalos periódicos ao longo da fibra.

A gravação de grades em fibras ópticas, através do efeito fotorrefrativo, foi primeiramente demonstrada em 1978 por HILL *et al.* em um experimento utilizando fibras de sílica dopadas com germânio expostas a um padrão de interferência produzido por um laser de argônio (luz azul-verde) [1]. Nesse experimento verificou-se que a intensidade da luz refletida aumentava à medida que as fibras ficavam expostas à radiação de Ar^+ (488 nm), chegando a cerca de 100 % de refletividade. Esse efeito não linear fotorrefrativo nas fibras ópticas ficou conhecido como fotossensibilidade.

Pesquisas em relação à fotossensibilidade foram feitas em 1981 por LAN e GARSIDE [2]. Eles demonstraram que a magnitude da modulação fotoinduzida do índice de refração crescia com o quadrado da intensidade de potência da fonte de gravação. A fonte de gravação utilizada foi um laser de argônio em 488 nm. Naquela época acreditava-se que a fotossensibilidade era um fenômeno presente em apenas algumas fibras especiais. Em 1987,

STONE [3] observou que a fotossensibilidade ocorria em vários tipos de fibra, desde que possuíssem uma concentração de germânio maior que 8 % mol.

A partir daí aumentou-se o interesse na fotossensibilidade em fibras ópticas. As grades em fibras são usadas no Sensoriamento e em Sistemas de Comunicações Ópticas, como, por exemplo, em espelhos de realimentação para um diodo laser e em sensores para tensão mecânica sobre a fibra.

Apesar disso, as primeiras grades impressas não possuíam o período nas janelas de interesse das comunicações ópticas. Essa limitação espectral das grades foi superada por MELTZ *et al.* [4], em 1989, que demonstraram uma nova técnica de gravação em fibras ópticas. A interferência de dois feixes de radiação ultravioleta, próximos a 245 nm, formam grades de reflexão para uso em 647 nm. As grades de Bragg foram foto-impressas no núcleo da fibra óptica sem a necessidade de remoção de sua casca, pois esta é transparente à luz ultravioleta. Além disso, através do experimento, constatou-se que o período das grades dependia do ângulo entre os dois feixes de luz ultravioleta interferentes. Essa descoberta, considerada um marco histórico sobre grades de Bragg em fibras ópticas (FBG – *Fiber Bragg Grating*), permitiu a fabricação de grades com características específicas adequadas a diferentes aplicações.

Como extensão dos resultados de MELTZ *et al.* [5], em 1990, KASHYAP *et al.* reportaram a foto-impressão de grades de Bragg na terceira janela de comunicações, causando um forte impacto no campo da fotossensibilidade em comunicações ópticas.

Já LEMAIRE *et al.* [6], em 1993, desenvolveram uma técnica que aumentava a fotossensibilidade em fibras ópticas. Ao difundir moléculas de hidrogênio para o núcleo da fibra óptica exposta à luz ultravioleta ocorre o aumento da troca fotoinduzida do índice de refração do núcleo da fibra óptica. Com isso, é possível fazer a gravação da grade de Bragg com maior intensidade de variação do índice de refração.

A versatilidade da fabricação de FBGs deve-se ao fato de o comprimento de onda de Bragg ser independente da fonte de luz utilizada na inscrição. O comprimento de onda de Bragg está relacionado com a periodicidade espacial da modulação do índice de refração e com o índice de refração efetivo do núcleo.

O aumento da utilização de FBGs em sensores a fibra se deve às suas vantagens em relação a outros tipos de sensores, tais como imunidade eletromagnética, operação eletricamente passiva, baixa atenuação, elevado ponto de fusão, peso e dimensões reduzidas. Essas características permitem a utilização desses sensores para monitoramento em ambientes hostis.

As FBGs podem ser usadas para medição de certos parâmetros, como: temperatura, deformação mecânica, pressão, ultrassom, aceleração, força e campos magnéticos de alta intensidade. Dessa forma, ela pode ser empregada no monitoramento de processos químicos e industriais, monitoração de estruturas e monitoração ambiental. Além disso, as FBGs podem ser usadas em aplicações na área de telecomunicações como dispositivo passivo, em multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM – *Wavelength Division Multiplexing*), em lasers a fibra e refletores de bombeamento amplificado, em dispositivos de grande largura de faixa e em elementos de compensação de dispersão.

Em 1996, VENGSARKAR *et al.* [7] apresentaram um novo tipo de grade fotoinduzida, conhecida como grade de período longo inscritas em fibras (LPG – *Long-Period Fiber Grating*). Essa grade foi inscrita em uma fibra dopada com Germânio sensibilizada em uma atmosfera de hidrogênio exposta a um laser de KrF (fluoreto de criptônio), cujo comprimento de onda de operação é 248 nm (ultravioleta), através de uma máscara feita de sílica cromada. Nesse experimento, as LPGs se mostraram mais sensíveis às variações externas do que as FBGs. Foram encontrados para as LPGs valores de sensibilidade para deformação longitudinal variando entre -0,7 e 1,5 nm/me (nanômetros por milistrain) e de 0,04 a 0,05 nm/°C para a temperatura, maiores do que os valores esperados de sensibilidade para a FBG, que são de aproximadamente 1,2 nm/me para deformação longitudinal e 0,0137 nm/°C para a temperatura, com comprimento de onda de ressonância em 1550 nm.

As primeiras LPGs foram usadas em filtros de rejeição de banda e como equalizador de ganho de amplificadores a fibra dopada com Érbio. As LPGs vêm se tornando uma importante ferramenta para monitoramento da temperatura, deformação longitudinal e variação do índice de refração. As LPGs também são utilizadas na detecção bioquímica e no monitoramento de processos industriais, devido a sua alta sensibilidade.

1.2. Características das grades em fibras ópticas

Uma grade ou rede de Bragg em fibras ópticas é produzida ao criar-se uma variação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica. Quando a condição de casamento de fase ocorre, o modo guiado do campo elétrico no interior do núcleo da fibra óptica é acoplado a outro modo quando o campo elétrico passa através da região na qual a grade está inscrita. Dessa forma, existe um comprimento de onda no qual ocorre o máximo acoplamento entre os modos, conhecido como comprimento de onda de ressonância. O acoplamento também ocorre, em menor escala, para os comprimentos de onda próximos ao comprimento de onda

de ressonância, resultando em um espectro de transmissão com as características de um filtro de rejeição de banda. O comprimento de onda de ressonância, a largura espectral e o pico de atenuação do espectro de transmissão da grade dependem da intensidade de variação do índice de refração do núcleo, do período dessa variação, do comprimento da grade e do índice de refração efetivo da fibra óptica, o qual depende dos raios e dos índices de refração do núcleo e da casca [7]. Com isso, é possível fabricar filtros ópticos, a partir de grades inscritas em fibras ópticas, com características específicas.

Existem dois tipos mais comuns de grades em fibras ópticas: as FBGs e as LPGs. No caso da FBG, o modo guiado propagante é acoplado ao modo guiado contra-propagante no comprimento de onda de ressonância, resultando em um espectro de reflexão óptico no sentido oposto ao da propagação da onda. No caso da LPG, o modo guiado propagante é acoplado a um ou mais modos de casca propagantes. Dessa forma, ambas FBG e LPG possuem espectro de transmissão de um filtro rejeita banda, mas apenas a FBG possui espectro de reflexão. Como na LPG podem ocorrer mais de um modo de casca, o espectro de transmissão na saída da fibra óptica na qual a LPG foi inscrita pode possuir mais de um comprimento de onda de ressonância e, conseqüentemente, mais de uma banda, correspondente a cada modo de casca [7]. Além de o comprimento de onda de ressonância, essas bandas podem possuir largura espectral e pico de atenuação diferente entre elas.

Diversas técnicas de fabricação de grades em fibras ópticas foram propostas nos últimos anos [8]. Enquanto o comprimento de onda de ressonância da banda de transmissão depende do período da grade e do índice de refração efetivo do modo guiado, no caso da FBG, e do índice de refração efetivo dos modos de casca, no caso da LPG, o pico de atenuação e a largura espectral dependem da intensidade de variação do índice de refração do núcleo e do comprimento da grade, os quais são realizados durante o processo de fabricação. Portanto, o período, o comprimento e a intensidade de variação do índice de refração da grade formam grades com as características do espectro de transmissão desejadas.

Um exemplo de técnica de fabricação de grades é a exposição da fibra óptica à radiação ultravioleta através de uma máscara [9]. A radiação ultravioleta produz uma variação no índice de refração do núcleo devido à fotossensibilidade da fibra óptica. Uma maior variação do índice de refração do núcleo gera um maior acoplamento, o que geralmente resulta em um maior pico de atenuação. Como a intensidade de variação do índice de refração do núcleo é consequência da natureza fotossensível da fibra óptica, foram desenvolvidas diversas técnicas para melhoria da fotossensibilidade, como a codopagem [6] e a hidrogenação [10], possibilitando a produção de grades com maior pico de atenuação.

As grades em fibras ópticas são usadas em aplicações na área de Sensoriamento e em Comunicações Ópticas. Ao variar o período da grade ou o índice de refração efetivo o comprimento de onda de ressonância varia, deslocando a banda de transmissão da grade para menores ou maiores valores de comprimento de onda. Portanto, parâmetros externos à grade que modifiquem o período e/ou o índice de refração efetivo, deslocam o espectro óptico de transmissão da grade. No caso da FBG, o índice de refração efetivo do modo guiado depende dos raios e dos índices de refração do núcleo e da casca. Uma FBG sujeita à deformação mecânica ou à variação da temperatura, as quais variam o período e/ou o índice de refração efetivo, tem seu espectro de transmissão e, conseqüentemente, o seu espectro de reflexão deslocado [9]. No caso da LPG, o índice de refração efetivo do modo de casca depende do índice de refração do meio no qual a grade está submersa, tornando a LPG sensível à variação do índice de refração do meio externo. Além disso, a LPG também é sensível à deformação mecânica [11] e à variação da temperatura [12]. Com isso, é possível monitorar a variação do parâmetro externo através da variação do espectro óptico da grade. Essa característica é essencial para a fabricação de sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas. Além disso, o deslocamento do espectro de transmissão da grade permite a realização de filtros de rejeição de banda sintonizáveis para aplicações em Comunicações Ópticas.

Nas aplicações que envolvem sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas é comum a utilização de técnicas de interrogação no lugar de um analisador de espectro óptico para monitorar o deslocamento do espectro óptico da grade. As primeiras técnicas de interrogação de FBG utilizavam filtros fixos para monitoramento a partir do espectro de reflexão da grade, como a descrita por MELLE *et al.* [13]. Nessa técnica, o espectro de reflexão da FBG é dividido em duas parcelas. Uma das parcelas é sintonizada à região linear de um filtro de borda linear. O deslocamento do espectro de reflexão da FBG devido ao parâmetro externo produz uma variação da amplitude óptica do espectro de reflexão na saída do filtro de borda linear. É calculada, então, a relação entre a parcela do espectro de reflexão da FBG que passou pelo filtro de borda linear e a parcela que não passou pelo filtro associando o resultado dessa operação ao deslocamento do espectro de reflexão da FBG e à variação do parâmetro ao qual ela está sujeita. Existem também técnicas que utilizam filtros sintonizáveis, como filtro Fabry-Perot [14].

Além disso, algumas técnicas de interrogação utilizam sistemas auto-referenciáveis para o monitoramento da grade. Um mecanismo de referência permite que o sinal de saída independa de flutuações de potência da fonte e das perdas de transmissão provocadas pelos

componentes do sensor. A técnica descrita por MELLE *et al.* [13] constitui um sistema auto-referenciável.

Recentemente, foi demonstrada a construção de sensores ópticos baseados em grade de Bragg sujeitas a ondas acústicas, vibrações, ultrassom ou a descargas parciais [15]. Esses parâmetros provocam uma deformação na FBG modulando seu espectro em comprimento de onda através do efeito opto-elástico. A FBG pode ser interrogada usando um filtro de borda linear ou uma fonte sintonizável. Quando o espectro de reflexão da FBG é sintonizado à região linear do espectro de transmissão do filtro ou quando o espectro de transmissão da fonte sintonizável é sintonizado à região linear do espectro de reflexão da FBG, o espectro de reflexão da FBG é demodulado, isto é, a variação de comprimento de onda é convertida em uma variação de amplitude que representa as ondas acústicas, vibrações, ultrassom ou descargas parciais.

1.3. Motivação e proposta da dissertação

É cada vez mais comum o uso de grades em fibras ópticas na fabricação de sensores devido às vantagens das grades e das fibras ópticas. Baixas perdas, imunidade eletromagnética, dimensões e peso reduzido, além de elevado ponto de fusão e isolamento elétrico são algumas das vantagens dos sensores ópticos baseados em grades em fibras ópticas. Essas características permitem o desenvolvimento de soluções compactas, com baixo custo, resposta rápida e elevada sensibilidade para o monitoramento de parâmetros de um sistema.

Geralmente, em sistemas de monitoramento de múltiplos parâmetros, são usadas múltiplas FBGs, de forma que cada FBG fique sujeita a um dos parâmetros. Nesse caso, pode ser utilizado um sistema de interrogação multiplexado, no qual as múltiplas FBGs, dispostas em série e/ou em paralelo, são interrogadas simultaneamente. Outro método para interrogação de múltiplas FBGs consiste na varredura em toda a faixa de comprimento de onda dos espectros das FBGs a partir de um filtro Fabry-Perot sintonizável.

A técnica de interrogação de FBG apresentada nessa dissertação foi proposta à Eletronorte como solução para o processo de monitoramento das descargas parciais e da temperatura a partir da superfície externa da carcaça de um transformador. Nesse caso, é fornecida uma técnica para medição acústica de descargas parciais, que consiste em medir a deformação mecânica sobre uma FBG sensora provocada pelas ondas acústicas resultantes das descargas parciais. Além disso, a técnica de interrogação fornece um mecanismo capaz de

medir a temperatura sobre a FBG sensora, a qual é fixada à superfície externa da carcaça de um transformador.

Visto que as ondas acústicas e as vibrações produzem o mesmo efeito de modulação do espectro de reflexão da FBG sensora, a técnica de interrogação de FBG proposta pode ser estendida para uma abordagem mais geral, medindo vibrações no lugar de descargas parciais. Dessa forma, essa dissertação propõe uma técnica de interrogação capaz de monitorar uma FBG sensora sujeita a vibrações e à variação de temperatura. Para a interrogação da FBG sensora, é utilizada uma FBG interrogadora, funcionando como filtro sintonizável auto-referenciado. A FBG interrogadora também está sujeita a vibrações e à variação da temperatura. Uma rotina em software calcula a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG interrogadora vibrando em baixa frequência e decide se o espectro de reflexão da FBG sensora está operando na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora a partir dessa relação. Como o valor da potência de ambos harmônicos é proporcional à potência de entrada da FBG interrogadora, a relação entre a potência desses harmônicos independe da potência de entrada e das perdas de transmissão no percurso, criando um mecanismo auto-referenciável. O espectro de transmissão da FBG interrogadora é sintonizado através da variação da temperatura de uma junção peltier controlada por corrente elétrica. O valor da corrente elétrica é obtido a partir da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico calculada. Quando o espectro de reflexão da FBG sensora está operando na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, é realizada a medição da temperatura e das vibrações às quais a FBG sensora está sujeita.

1.4. Organização da dissertação

O Capítulo 1 apresenta a introdução ao tema sobre grades inscritas em fibras ópticas, descrevendo o histórico, características e técnicas de interrogação. Além disso, é proposto um mecanismo para medição de vibrações e temperatura a partir de uma técnica de interrogação de FBG.

O Capítulo 2 explica o princípio de funcionamento das grades em fibras ópticas e apresenta o estado da arte em técnicas de interrogação de FBG.

O Capítulo 3 descreve a técnica de interrogação proposta nessa dissertação, identificando os componentes do circuito para sensoriamento das vibrações e da variação de temperatura e os componentes do circuito de interrogação. Além disso, é apresentado o modelo matemático da técnica de interrogação de FBG proposta nesse trabalho.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados obtidos, assim como os processos para a sua obtenção.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões dessa dissertação e sugestões para trabalhos futuros.

Os Apêndices A, B e C exibem as rotinas desenvolvidas no software LabVIEW para medição entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, para a medição da linearidade e para o controle da temperatura da FBG interrogadora funcionando como filtro sintonizável auto-referenciado, respectivamente. O Apêndice D apresenta as funções obtidas a partir de gráficos do Capítulo 5.

Referências Bibliográficas

1. HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. “**Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication**”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, p. 647-649, May 1978.
2. LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. “**Characterization of single-mode optical fiber filters**”, *Appl. Opt.*, vol. 20, p. 440-445, 1981.
3. STONE, J. “**Photorefractivity in GeO₂-doped silica fibers**”, *Journ. Appl. Phys.*, vol. 62, p. 4371-4374, 1987.
4. MELTZ, G.; W. W. MOREY and W. H. GLENN, “**Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method**”, *Optics Letters*, vol. 14, p. 823-825, 1989.
5. KASHYAP, R.; ARMITAGE, J. R.; WYATT, R.; DAVEY, S. T.; WILLIAMS, D. L. “**All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm**”, *Electronics Letters*, vol. 26, no. 11, p. 730, 1990.
6. LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; REED, W. A. “**High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO₂ doped optical fibres**”, *Electronics Letters*, vol. 29 no. 13, p. 1191-1193, 1993.
7. VENGSARKAR, A. M.; LEMAIRE, P. J.; JUDKINS, J. B.; BHATIA, V.; ERDOGAN, T.; SIPE, J. E. “**Long-Period Fiber Grating as Band-Rejection Filters**”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 1, p. 58-65, Jan. 1996.
8. JAMES, S. W.; TATAM, R.P. “**Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application**”, *Measurement Science and Technology*, vol. 14, p. R49-R61, 2003.
9. KASHYAP, R. “**Fiber Bragg Gratings**”, Academic Press, London, 1999.
10. LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; REED, W. A. “**High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO₂ doped optical fibres**”, *Electronics Letters*, vol. 29 no. 13, p. 1191-1193, 1993.
11. BHATIA, V. “**Properties and sensing applications of long-period gratings**”, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech., 1996.
12. BHATIA, V. “**Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing**”, *Optics Express*, vol. 4, p. 457-466, 1999.
13. MELLE, S. M.; LIU, K.; MEASURES, R. M. “**A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Grating Sensors**”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 5, p. 516–518, May 1992.
14. KERSEY, A. D.; BERKOFF, T. A.; MOREY, W. W. “**Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter**”, *Optics Letters*, vol. 18, no. 16, p. 1370–1372, August 1993.
15. WILD, G.; HINCKLEY, S. “**Optical Fibre Bragg Grating for Acoustic Sensors**”, *Proceedings of 20th International Congress on Acoustics*, p. 23-27, 2010.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS DAS GRADES EM FIBRAS ÓPTICAS

2.1. Fotossensibilidade em fibras ópticas

A fotossensibilidade é o efeito de alteração do índice de refração de uma fibra óptica quando esta é irradiada por um feixe de ultravioleta. Ela foi primeiramente demonstrada por HILL *et al.* em um experimento utilizando fibras de sílica dopadas com germânio [1].

A amplitude de alteração do índice de refração depende das características do material de constituição da fibra, das condições de radiação, como a intensidade e o comprimento de onda da fonte óptica de exposição ultravioleta, da composição do núcleo e de qualquer processamento da fibra anterior à exposição ao ultravioleta [2].

Apesar de diversos modelos teóricos validados pelas evidências experimentais explicarem o efeito da fotossensibilidade, não existe uma teoria única capaz de reunir todos os fenômenos associados a ela. Essa dificuldade é consequência da diversidade de parâmetros físicos que são alterados durante a exposição ao ultravioleta. Além de o índice de refração, outras propriedades da fibra óptica como a absorção, o estado de tensão, a birrefringência, o coeficiente de expansão térmica e a densidade também são alterados [3].

Os principais modelos que explicam o processo de alteração do índice de refração em fibras ópticas são apresentados nos próximos itens.

2.1.1. Modelo dos centros de cor

O modelo de centros de cor foi proposto por HAND *et al.* [4] e RUSSEL *et al.* [5], no início da década de noventa, quando acreditava-se que a fotossensibilidade só existia em fibras dopadas com germânio. Entretanto, em trabalhos posteriores, mostrou-se que a fotossensibilidade não ocorria apenas na presença de germânio. Fibras ópticas dopadas com európio [6], cério [7] e érbio/germânio [8] também se mostraram fotossensíveis.

A fotossensibilidade em fibras de sílica dopada com germânio se deve a uma deficiência na estrutura eletrônica das ligações GeO no núcleo da fibra óptica, conhecida como deficiência oxigênio-germânio. No modelo dos centros de cor é assumido que a radiação ultravioleta ioniza os centros GeO na sílica dopada com germânio. Os elétrons livres se ligam a outros centros de germânio presentes na matriz vítrea formando centros do tipo Ge (1) e Ge (2). No centro Ge (1) o elétron é retido no átomo de germânio que está unido a quatro ligações O-Si. No centro Ge (2) o elétron é retido no átomo de germânio que está unido a uma ligação O-Ge e três ligações O-Si.

Esses defeitos na matriz vítrea provocado pela radiação ultravioleta próxima ao pico de absorção dos defeitos do germânio modificam a aparência cromática do material, isto é, modificam o espectro de absorção dos defeitos. Por isso esse modelo é conhecido como centros de cor ou centros absorvidos.

A formação de defeitos na matriz de sílica devido à radiação ultravioleta provoca um aumento no índice de refração, permitindo a criação de grades em fibras ópticas. O índice de refração em um ponto está relacionado à densidade e orientação dos defeitos dessa região devido aos espectros de absorção eletrônica dos defeitos. Portanto, os espectros de absorção das bandas centradas no ultravioleta provocam alteração no índice de refração. Essa variação do índice de refração em função do comprimento de onda é dada pela relação de Kramers-Kronig [9].

2.1.2. Modelo do dipolo

O modelo do dipolo explica que a fotoexcitação dos defeitos na fibra óptica forma um campo periódico de cargas elétricas. A fotoionização de centros deficitários de oxigênio, Ge-Si ou Ge-Ge origina centros carregados positivamente e elétrons livres. Quando uma fibra é exposta à radiação ultravioleta através de uma máscara, os elétrons livres nas regiões de maior intensidade são difundidos até serem capturados pelos defeitos nas zonas de menor intensidade. Essa nova distribuição estática do campo elétrico provoca uma alteração

periódica do índice de refração por efeito Kerr [2]. Essa alteração no índice de refração é proporcional à suscetibilidade elétrica de terceira ordem e ao quadrado do campo elétrico.

2.1.3. Modelo da relaxação da tensão

O modelo da relaxação da tensão mostra que a alteração no índice de refração é causada pela diminuição das tensões termoelásticas presentes no núcleo da fibra quando esta é exposta à radiação ultravioleta durante o processo de fabricação da grade. Esse modelo foi proposto por SCEATS *et al.* [10]. A presença de germânio na fibra leva a uma diminuição na temperatura fictícia, também conhecida como temperatura de transição vítrea, a partir da qual os átomos das cadeias poliméricas possuem uma mobilidade maior. A solidificação da casca na presença do núcleo ainda fluido provoca o aparecimento de uma tensão hidrostática isotrópica. Além disso, a diferença entre os coeficientes de expansão térmica do núcleo e da casca provoca uma tensão anisotrópica adicional. A tensão faz distender as ligações na matriz vítrea levando a uma diminuição do índice de refração. A ruptura das ligações conduz ao rearranjo da matriz vítrea em torno de um novo centro, relaxando totalmente a tensão acumulada durante o estiramento. Nesse caso ocorre a máxima alteração do índice de refração.

Entretanto, FONJALLAZ *et al.* [11] mostraram, alguns anos depois, através de resultados experimentais, que a tensão no núcleo aumenta após a exposição ao ultravioleta ao invés de relaxar, como diz o modelo de relaxamento da tensão.

2.1.4. Modelo da densificação ou compactação

O modelo da densificação, também conhecido como modelo da compactação, foi proposto por BERNARDIN *et al.* [12] e trata da possibilidade da radiação ultravioleta induzir alterações na matriz vítrea do material constituinte da fibra óptica, originando alterações no índice de refração. Alguns anos antes, FIORI *et al.* [13] havia demonstrado que a irradiação de um laser no comprimento de onda de 248 nm em uma sílica amorfa induzia uma compactação linear reversível, por efeito térmico, causando alterações no índice de refração.

Apesar de a densificação assumir um papel importante na alteração do índice de refração induzida pela exposição à radiação ultravioleta, os parâmetros que são alterados durante a densificação não são explícitos. Dessa forma, acredita-se que o processo de alteração do índice de refração seja consequência de uma sobreposição dos modelos apresentados anteriormente.

2.2. Técnicas de melhoria de fotossensibilidade

A alteração do índice de refração nas fibras ópticas de germano-silicato é muito baixa, da ordem de 10^{-5} para a maioria das aplicações que utilizam grades em fibras. Dessa forma, foram desenvolvidas técnicas capazes de aumentar a fotossensibilidade. O objetivo dessas técnicas é tornar o núcleo das fibras ópticas mais sensíveis à radiação ultravioleta. As principais técnicas de melhoria da fotossensibilidade são a codopagem e a hidrogenação.

2.2.1. Codopagem

Na técnica de codopagem são utilizados outros elementos dopantes além do GeO_2 para melhorar a fotossensibilidade das fibras de germano-silicato. O dopante mais comum é o boro, o qual permite alterações no índice de refração na ordem de 10^{-3} com radiação no comprimento de onda de 248 nm [14]. Apesar de as fibras codopadas com boro possuírem atenuação elevada, em torno de 115 dB/km, no comprimento de onda de 1550 nm, o boro é o codopante mais comum em fibras fotossensíveis disponíveis comercialmente. Uma alternativa é a codopagem com estanho, no lugar da codopagem com boro. Fibras codopadas com estanho possuem elevada fotossensibilidade, além de atenuação em torno de 25 dB/km no comprimento de onda de 1550 nm. A causa mais provável da melhoria da fotossensibilidade em fibras codopadas com boro é a relaxação da tensão fotoinduzida na estrutura da fibra óptica.

2.2.2. Hidrogenação

A técnica de hidrogenação foi primeiramente proposta por LEMAIRE *et al.* [15]. Ela consiste em manter a fibra óptica em uma atmosfera de hidrogênio a alta pressão e baixa temperatura durante um período de tempo determinado. Esse procedimento aumenta a fotossensibilidade à radiação ultravioleta, tornando-a até duas ordens de magnitude superior às fibras ópticas convencionais. A presença de hidrogênio possibilita que os íons de germânio sejam convertidos de Ge-O para Ge-H, o que gera alterações no índice de refração até a ordem de 10^{-2} . Essa técnica tem sido bastante utilizada antes da exposição ao ultravioleta para melhoria da fotossensibilidade em fibras ópticas.

2.3. Princípio de funcionamento de grades em fibras ópticas

Um número finito de modos guiados viaja em uma fibra óptica devido à existência de uma faixa de restrição para os valores da constante de propagação $n_2 k_0 \leq |\beta| \leq n_1 k_0$, onde n_1 e n_2 são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente, e k_0 a constante de propagação de espaço livre. A constante de propagação é função do comprimento de onda da fonte de luz e dos parâmetros da fibra, podendo ser determinada usando as equações de Maxwell e as condições de fronteira dos campos elétrico e magnético na interface entre o núcleo e a casca.

Em uma fibra monomodo, a propagação da luz é realizada por apenas um modo guiado, que pode ser aproximado por um modo linearmente polarizado, denominado modo LP_{01} . Entretanto, além dos modos guiados, existe um conjunto de modos que também satisfazem as equações de Maxwell e os valores de fronteira, presentes na faixa de variação da constante de propagação dada por $0 \leq |\beta| \leq n_2 k_0$. Esses modos são denominados modos de radiação. Existem infinitos modos de radiação em uma fibra óptica, os quais possuem uma constante de propagação complexa.

Considerando que o raio da casca é finito e existe um meio ao redor da casca com índice de refração n_3 , é possível analisar os modos que satisfazem as condições de fronteira entre a casca e o meio ao redor da casca. Análogo aos modos guiados existe uma faixa de valores para a constante de propagação dada por $n_3 k_0 \leq |\beta| \leq n_2 k_0$, a qual representa um subconjunto dos modos de radiação. Esses modos ficam confinados na casca e são conhecidos como modos de casca.

Tanto os modos guiados quanto os modos de casca podem viajar nas direções propagantes e contra-propagantes e possuem um número finito de constantes de propagação. Os modos de casca atenuam rapidamente devido às perdas na casca. O acoplamento ou transferência de energia entre os modos guiados e os modos de casca forma o mecanismo de operação básico de uma grade de período longo em fibras ópticas (LPG – *Long-Period Fiber Grating*). Já o acoplamento entre um modo guiado propagante em um modo guiado contra-propagante forma o princípio de funcionamento de uma grade de Bragg em fibras ópticas (FBG – *Fiber Bragg Grating*).

Uma grade é uma variação periódica do índice de refração no núcleo de uma fibra óptica, como mostra a Figura 2-1. Nela, Λ é o período da grade.

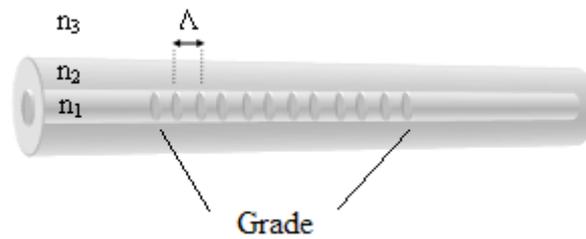


Figura 2-1: Representação de uma grade em fibras ópticas.

Para que haja acoplamento de um modo a outro é necessário que a condição de casamento de fase (*phase matching*), mostrada na equação (1), seja alcançada [16].

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (1)$$

Nessa condição, se houver um valor $\Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda}$, o modo β_1 é acoplado ao modo β_2 . A variável $\Delta\beta$ é conhecida como constante de propagação diferencial.

Considerando o acoplamento do modo guiado fundamental propagante (β_{01}) ao modo fundamental guiado contra-propagante ($-\beta_{01}$), a equação (1) pode ser escrita como na equação (2).

$$\Delta\beta = \beta_{01} - (-\beta_{01}) = \frac{2\pi}{\Lambda}$$

$$\beta_{01} = \frac{\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

Como $\beta_{01} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$, a equação (2) se torna a equação (3). Nela, n_{eff} é o índice de refração efetivo do modo guiado.

$$\frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = \frac{\pi}{\Lambda}$$

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (3)$$

A equação (3) é conhecida como condição de Bragg de uma FBG. A variável λ corresponde ao comprimento de onda de ressonância, no qual ocorre o máximo acoplamento do modo propagante ao modo contra-propagante.

Em uma LPG ocorre o acoplamento dos modos guiados aos modos de casca. Considerando a existência de apenas o modo guiado fundamental (β_{01}), a equação (1) pode

ser escrita como mostra a equação (4). A variável β_{cl}^u representa os u modos de casca nos quais o modo guiado fundamental pode ser acoplado.

$$\beta_{01} - \beta_{cl}^u = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (4)$$

Como $\beta_{01} = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ e $\beta_{cl}^u = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}^u$, onde n_{eff}^u representa o índice de refração efetivo

de cada um dos u modos de casca, a equação (4) pode ser escrita como mostra a equação (5).

$$\begin{aligned} \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} - \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}^u &= \frac{2\pi}{\Lambda} \\ \frac{1}{\lambda} (n_{eff} - n_{eff}^u) &= \frac{1}{\Lambda} \\ \lambda^u &= (n_{eff} - n_{eff}^u) \Lambda \end{aligned} \quad (5)$$

A variável λ^u corresponde aos u comprimentos de onda de ressonância, nos quais ocorre o máximo acoplamento do modo guiado propagante a cada um dos u modos de casca propagantes. Logo, as LPGs podem possuir mais de um comprimento de onda de ressonância, devido à possibilidade de existirem mais de um modo de casca que assumam a condição de casamento de fase. Enquanto isso as FBGs possuem apenas um comprimento de onda de ressonância, correspondente ao acoplamento do modo fundamental propagante ao contra-propagante.

A Figura 2-2 mostra a disposição dos modos de casca propagantes e guiados propagantes e contra-propagantes em termos da constante de propagação.

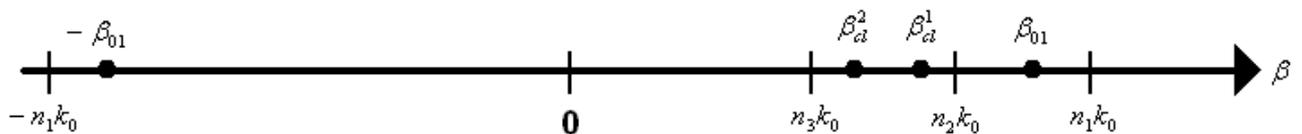


Figura 2-2: Disposição dos modos de casca propagantes e guiados propagantes e contra-propagantes em termos da constante de propagação [17].

Através da Figura 2-2 conclui-se que a diferença entre os modos guiados propagantes e contra-propagante é maior do que a diferença entre o modo guiado e os modos de casca, tornando o período da grade de período longo maior do que o período da grade de Bragg. E, conseqüentemente, o comprimento da grade de período longo inscrita em fibra é maior do que o comprimento da grade de Bragg.

Visto que na FBG o modo guiado propagante é acoplado ao modo guiado contra-propagante no comprimento de onda de ressonância, as grades de Bragg em fibras ópticas

possuem espectro de reflexão. Já as LPGs não possuem espectro de reflexão, pois o modo fundamental propagante é acoplado aos modos de casca propagantes.

2.4. Estado da arte em técnicas de interrogação de FBG

A FBG é um elemento óptico utilizado em diversas aplicações para o monitoramento de certos parâmetros, devido a sua alta sensibilidade e suas vantagens relacionadas às propriedades das fibras ópticas. Baixas perdas, imunidade eletromagnética, baixo peso, pequenas dimensões, elevado ponto de fusão e isolamento elétrico são algumas das vantagens dos sensores ópticos, quando comparados aos sensores elétricos convencionais. A FBG é sensível a diversos parâmetros externos, como: temperatura, deformação mecânica, pressão, ultrassom, aceleração, índice de refração, força e campos magnéticos de alta intensidade, além de criar soluções compactas, simples, com respostas rápidas, elevada sensibilidade e baixo custo para o monitoramento de parâmetros de um sistema. Dessa forma, a FBG vem se tornando um elemento muito importante no desenvolvimento de sensores ópticos cada vez mais eficientes.

A FBG possui o espectro de transmissão de um filtro rejeita faixa. Quando um sinal de banda espectral larga passa através de uma FBG, parte do sinal é atenuado, em torno de um comprimento de onda central conhecido como comprimento de onda de ressonância. Essa parte atenuada é refletida, pois na FBG o modo fundamental propagante é acoplado ao modo contra-propagante, como explicado no item 2.3. Logo, a FBG possui um espectro de reflexão, proveniente do sinal que passa através dela.

Existem três características relevantes em relação ao espectro da FBG: a largura espectral, o pico de atenuação e o comprimento de onda de ressonância. Esses parâmetros dependem de quatro variáveis: a intensidade de variação do índice de refração do núcleo produzida durante o processo de fabricação, o período de variação do índice de refração conhecido como período da grade, o comprimento da grade e o índice de refração efetivo, que é função da geometria e dos índices de refração do núcleo e da casca da fibra óptica. Normalmente, a largura espectral e o pico de atenuação dependem da intensidade de variação do índice de refração do núcleo e do comprimento da FBG, os quais são gerados durante o processo de fabricação. Entretanto, o período e o índice de refração efetivo da FBG podem ser modificados por parâmetros externos, os quais causam um deslocamento no comprimento de onda de ressonância, como mostra a equação (3).

Dessa forma, quando existe alguma perturbação externa modificando o período e/ou o índice de refração efetivo da FBG, o comprimento de onda de ressonância sofre um deslocamento. Logo, criando-se um sistema de interrogação, que calcule o deslocamento do comprimento de onda de ressonância associando-o a um ou mais parâmetros externos, é possível monitorar a variação desses parâmetros em função da variação do comprimento de onda de ressonância da FBG.

Diversas técnicas foram propostas para interrogação de FBG. Elas podem ser divididas em três grupos: passiva utilizando filtros fixos [18, 19, 20, 21]; ativa utilizando técnicas interferométricas [22, 23], com um interferômetro de Mach-Zehnder, ou filtros sintonizáveis [22, 24, 25], com um filtro Fabry-Perot; ativa utilizando fonte de luz sintonizáveis [26,27].

Uma técnica de interrogação passiva utilizando filtros fixos consiste na determinação do deslocamento do comprimento de onda de ressonância através da comparação entre o sinal que passa através de um filtro e um sinal de referência. Uma representação geral dessa técnica é mostrada na Figura 2-3.

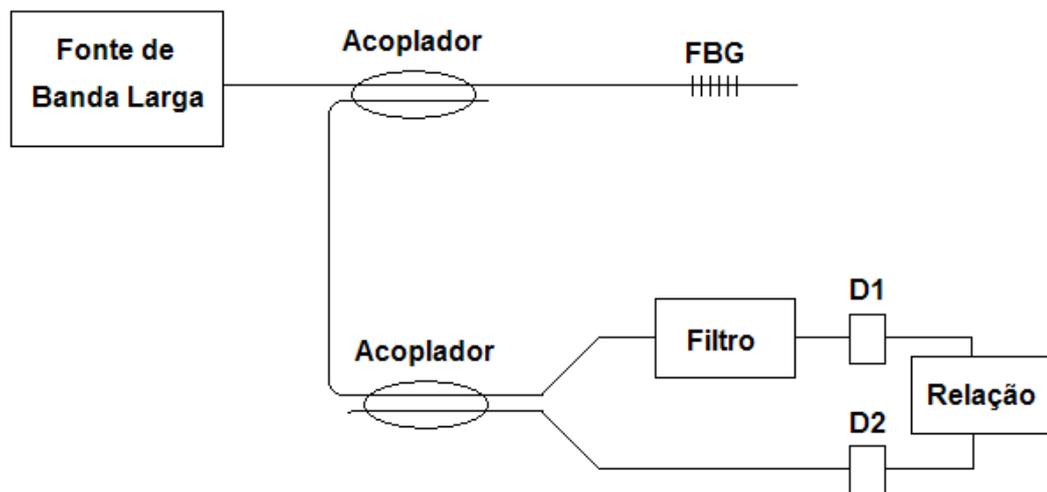


Figura 2-3: Técnica de interrogação de FBG passiva utilizando filtros fixos.

O sinal de banda espectral larga que passa pela FBG é refletido e, em seguida, dividido em duas parcelas. A primeira parcela passa por um filtro, chegando até o fotodetector 1 (D1) enquanto a segunda parcela do sinal chega até o fotodetector 2 (D2). O sinal refletido pela FBG deve estar na região linear do filtro. Dessa forma, o deslocamento do comprimento de onda de ressonância da FBG devido a algum parâmetro externo se torna uma variação na amplitude do sinal, após passar pelo filtro. Com isso, a partir da relação entre a parcela de potência do sinal refletido pela FBG que chega à D2 e a parcela de potência do sinal refletido pela FBG que passa pela região linear de um filtro e chega à D1, é possível determinar o

deslocamento do comprimento de onda de ressonância. A resposta da interrogação da FBG é tão linear quanto a linearidade dessa região de operação do filtro.

Essa técnica de interrogação passiva utilizando um filtro fixo foi proposta por MELLE *et al.* [18]. Nesse experimento, foi usado um filtro passa alta de infravermelho comercial, cuja função de transferência é linear no intervalo de comprimento de onda entre 815 e 838 nm, e com transmitância igual a 50 % em 828 nm. O comprimento de onda de ressonância da FBG usada era de 832 nm, quando não submetida a nenhum parâmetro externo a ela. A interrogação é determinada através da divisão do sinal que chega à D1 pelo sinal que chega à D2.

Uma forma alternativa de interrogação da FBG foi apresentada por DAVIS *et al.* [19]. Esse artigo apresenta uma forma simples de interrogação de uma FBG a partir da utilização de um WDM, diminuindo o número de componentes e, conseqüentemente, diminuindo o custo, podendo ser usada em aplicações que não necessitem alta resolução. A Figura 2-4 mostra o diagrama representativo dessa técnica de interrogação.

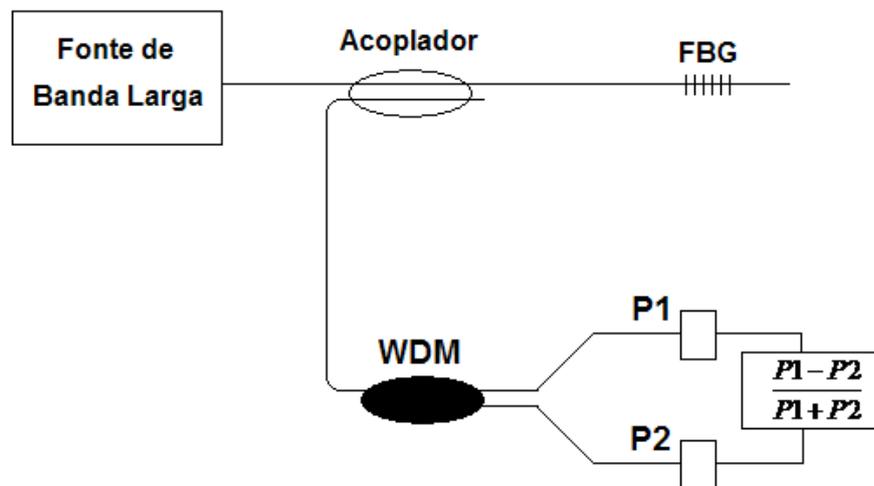


Figura 2-4: Técnica de interrogação de FBG usando WDM [19].

Nessa técnica de interrogação mostrada na Figura 2-4, o sinal refletido pela FBG passa por um WDM. Esse WDM possui duas saídas, uma no comprimento de onda de 1510 nm e a outra no comprimento de onda de 1575 nm. O comprimento de onda de ressonância da FBG é 1548 nm quando não sofre perturbações externas. Quando o comprimento de onda de ressonância da FBG aumenta, a parte da potência que sai pela porta de comprimento de onda 1575 nm (P2) tende a ser maior do que a parte da potência que sai pela porta de comprimento de onda 1510 nm (P1). Por outro lado, quando o comprimento de onda de ressonância da FBG diminui, a parte da potência que sai pela porta de comprimento de onda 1510 nm (P1) tende a ser maior do que a parte da potência que sai pela porta de comprimento de onda 1575 nm

(P2). Além disso, a função de transferência do WDM é linear na faixa de variação do comprimento de onda de ressonância da FBG. Dessa forma, é possível determinar o deslocamento do comprimento de onda de ressonância a partir das potências em cada saída do WDM.

Já a técnica de interrogação de FBG apresentada por FALLON *et al.* [20] utilizava como filtro uma FBG idêntica à FBG sensora. Essa técnica de interrogação ficou conhecida como ICGI (*Identical Chirped Grating Interrogation*) e foi usada no monitoramento de deformação axial. Quando a FBG não sofre nenhuma deformação, a luz recebida por D1 é mínima, pois o espectro de ambas FBGs, sensora e filtro, estão alinhados. À medida que a FBG sensora é esticada, o seu espectro desloca, desalinhando em relação ao espectro FBG que funciona como filtro, aumentando a potência que chega ao receptor. Dessa forma, é possível calcular a deformação axial sofrida pela FBG sensora a partir da potência que passa pela FBG que funciona como filtro. Esse artigo ainda mostra que essa técnica de interrogação pode ser expandida para um sistema de interrogação multiplexada, no qual múltiplas FBGs sensoras, em série e/ou em paralelo, podem ser interrogadas simultaneamente, permitindo o monitoramento de múltiplos parâmetros.

No ano seguinte, FALLON *et al.* [21] apresentou uma nova técnica de interrogação de FBG, análoga à apresentada na Figura 2-3. Nela, é utilizada uma LPG como filtro fixo, de forma que o sinal refletido pela FBG se encontre na região linear do espectro da LPG. A FBG possui o comprimento de ressonância em 1519 nm e largura espectral de 0.5 nm. Já a LPG possui o comprimento de ressonância em 1529 nm e largura espectral de 20 nm, permitindo uma faixa de sensibilidade de 10 nm.

Outra forma de calcular o deslocamento do comprimento de onda de ressonância é através de técnicas interferométricas. Um interferômetro assimétrico é um filtro óptico com função de transferência cuja fase depende do comprimento de onda do sinal de entrada. Portanto, o deslocamento do comprimento de onda induzido por um parâmetro externo produz uma mudança na fase, a qual pode ser detectada por um interferômetro. Um exemplo é o interferômetro de Mach-Zehnder assimétrico a base de fibras ópticas. A Figura 2-5 mostra os principais elementos da técnica interferométrica.

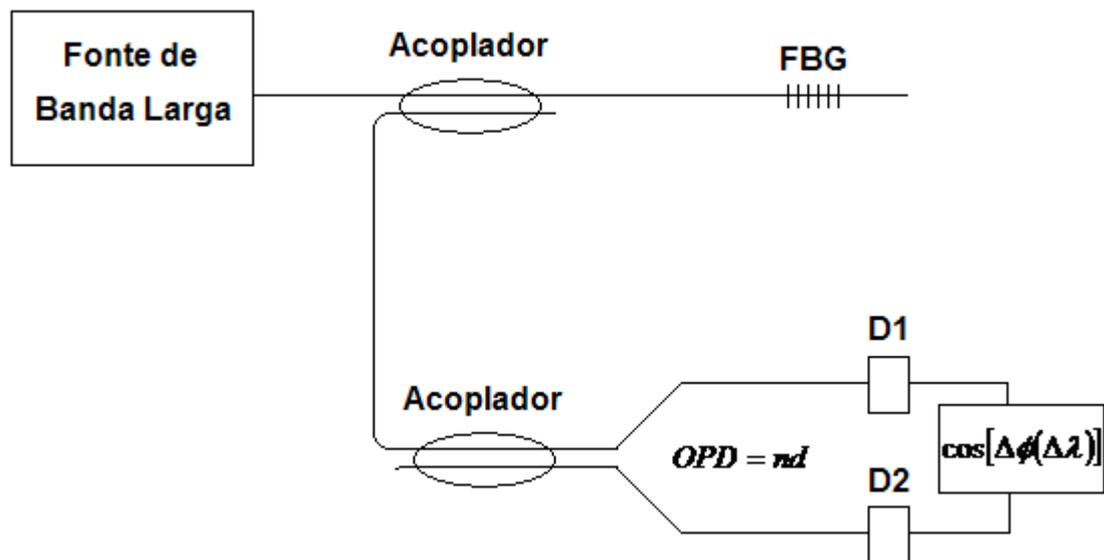


Figura 2-5: Técnica de interrogação de FBG usando detecção interferométrica [22].

Na técnica interferométrica, a luz refletida pela FBG passa através de um interferômetro, o qual possui caminhos de comprimentos diferentes, conhecido por OPD (*Optical Path Difference*). Visto que a fase do interferômetro assimétrico depende do comprimento de onda de entrada, o deslocamento do comprimento de onda de ressonância da FBG é convertido em uma variação na fase. Como a saída do interferômetro pode ser modulada por meio do controle da assimetria entre os caminhos do interferômetro, várias técnicas de leitura de fase podem ser aplicadas para determinar a modulação de fase induzida pelo deslocamento do comprimento de onda de ressonância da FBG. Através da escolha apropriada do OPD, essa técnica pode se tornar bastante sensível, podendo medir pequenas variações no comprimento de onda da FBG. Com um interferômetro de OPD igual a 1 cm, por exemplo, o fator de conversão comprimento de onda – fase mede, aproximadamente, 37 rad/nm no comprimento de onda de 1,3 μm [22].

Uma técnica de interrogação demonstrada por ALLSOP *et al.* [23] consiste de um refratômetro baseado em um interferômetro de Mach-Zehnder feito com um par de LPGs. Esse artigo aborda a relação entre a variação do índice de refração e a modulação da fase induzida no interferômetro do ponto de vista experimental e teórico. Foi obtida, a partir desse esquema de interrogação, a mudança mínima no índice de refração detectável igual a $1,8 \times 10^{-6}$.

A interrogação da FBG também pode ser feita com um filtro Fabry-Perot em fibra (FFP – *Fiber Fabry-Perot*). Um filtro Fabry-Perot é composto por duas placas transparentes paralelas, separadas entre si por uma distância que pode ser alterada. A superfície exterior da

placa é revestida de um material antirreflexivo. Já a superfície interior é revestida com um material de alta refletividade e baixa absorção. Dessa forma, quando os feixes de luz do sinal de entrada incidem sobre as placas paralelas, eles sofrem múltiplas reflexões resultando em um sinal na saída com amplitude e fase dependente do comprimento de onda do sinal de entrada, do ângulo de incidência, do índice de refração do meio e da distância entre as placas. Como o índice de refração da cavidade é definido durante o processo de fabricação, para se alterar as características do sinal de saída em um determinado comprimento de onda, deve-se alterar o ângulo de incidência do sinal de entrada ou a distância entre as placas.

Um sistema de interrogação de FBG baseado em um FFP proposto por KERSEY *et al.* [24] é mostrado na Figura 2-6. A luz da fonte de banda larga é refletida pela FBG e passa por um FFP sintonizável, o qual possui uma largura espectral comparável a da FBG e uma faixa espectral livre (FSR – *Free Spectral Range*), que é o intervalo entre dois comprimentos de onda centrais das bandas de passagem do FFP, maior do que o máximo deslocamento do espectro da FBG. O espectro de transmissão da banda de passagem do FFP pode ser alinhado ao espectro da FBG através da alteração da distância entre as placas paralelas. Essa alteração da distância pode ser feita aplicando-se uma tensão sobre um piezoelétrico. Além disso, é adicionada uma tensão senoidal, a qual modula o comprimento de onda do espectro de transmissão do FFP. Dessa forma, o sinal da FBG que passa pelo FFP contém a componente fundamental e os harmônicos da frequência do sinal senoidal. Quando o comprimento de onda de ressonância da FBG e o comprimento de onda central da banda do FFP estão alinhados, a amplitude da frequência fundamental é nula. No caso de o espectro da FBG sofrer um deslocamento, o sinal de saída passa a conter uma componente na frequência fundamental não nula, devido ao desalinhamento entre os espectros. Em um estágio de conversão é calculada a amplitude da tensão que deve ser adicionada à tensão aplicada sobre o piezoelétrico a partir da amplitude da componente fundamental, medida na saída de um filtro passa baixa, de modo que os espectros de ambas FBG e FFP voltem a ficar alinhados. Como existe uma relação entre a tensão adicional aplicada sobre o piezoelétrico e a distância entre as placas paralelas do FFP e entre essa distância e o deslocamento do comprimento de onda central do espectro do FFP, é possível calcular o deslocamento do espectro da FBG a partir dessa tensão adicional aplicada sobre o piezoelétrico.

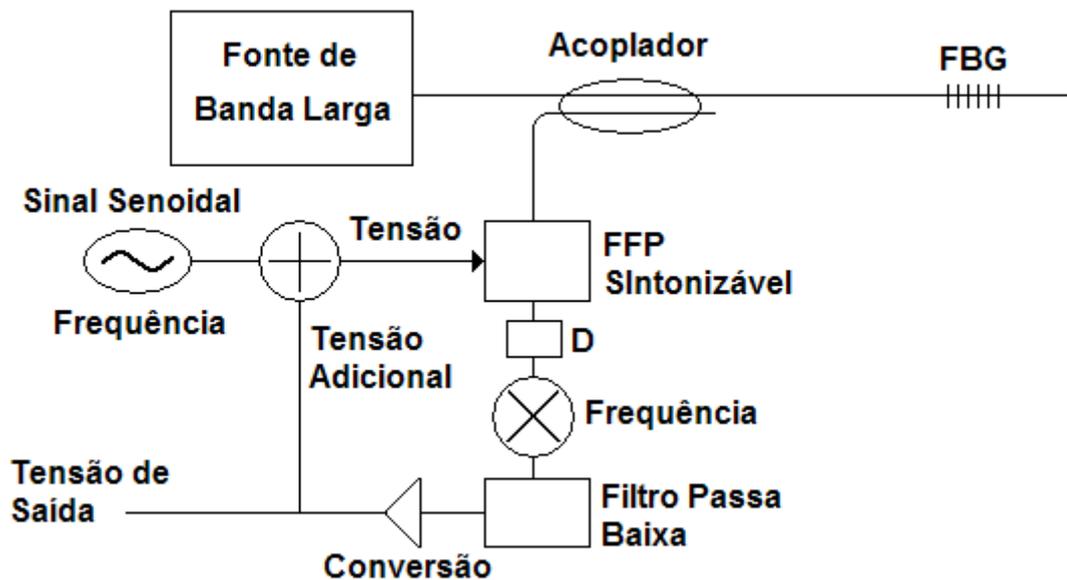


Figura 2-6: Técnica de interrogação de FBG usando filtro Fabry-Perot sintonizável [24].

No mesmo artigo, KERSEY *et al.* [24] demonstram uma nova técnica de interrogação de múltiplas FBGs usando um filtro Fabry-Perot sintonizável. Agora, o FFP opera em modo de varredura de comprimento de onda. Para isso, é aplicada uma forma de onda triangular sobre o piezoelétrico, a qual modifica a distância entre as placas paralelas, de maneira a deslocar o comprimento de onda central da banda passante do FFP em toda a faixa de comprimento de onda de operação das FBGs. O número de FBGs é limitado pela FSR, isto é, o intervalo de comprimento de onda ocupado pelo espectro das FBGs deve ser menor do que a FSR. É aplicada uma tensão senoidal ao FFP à medida que o espectro se desloca. Quando o espectro do FFP começa a sobrepor o espectro de uma das FBGs, a componente de frequência fundamental do sinal de saída deixa de ser nula. Dessa forma, como é conhecida a tensão aplicada sobre o piezoelétrico durante a varredura e, conseqüentemente, a variação da distância entre as placas paralelas, o comprimento de onda central da banda passante do FFP também é conhecido. Visto que a faixa de comprimento de onda de operação de cada FBG é conhecida e a largura espectral da banda passante é menor do que intervalo de comprimento de onda entre duas FBGs consecutivas, é possível determinar qual a FBG que está sendo sobreposta no momento em que a componente fundamental deixa de ser nula. Se a frequência fundamental for nula e o comprimento de onda central do FFP estiver dentro da faixa de comprimento de onda de operação da FBG, os espectros de ambas FBG e FFP estão alinhados. Como é conhecida a tensão de varredura e, a partir dela, o comprimento de onda central do FFP, além do comprimento de onda de ressonância da FBG quando ela não é submetida a nenhum parâmetro externo, é possível calcular o deslocamento do espectro da

FBG. Esse processo é realizado para cada FBG durante a varredura. Com isso, todas as FBGs são interrogadas.

Em outro artigo, KERSEY *et al.* [22] apresentaram um FFP funcionando no modo de varredura com FSR de 50 nm e largura de banda de 0,3 nm. Como o máximo intervalo de comprimento de onda de operação de cada FBG era de 3 nm, poderiam ser multiplexadas até 16 FBGs como sensores independentes. DAVIS *et al.* [25] demonstraram um sistema capaz de monitorar 60 FBGs funcionando como sensoras de deformação. A parte sensora possui 5 conjuntos contendo 12 FBGs cada. As FBGs de cada conjunto estão em série, enquanto os conjuntos estão em paralelo. Uma chave óptica controlada por um computador comuta entre os conjuntos, permitindo a interrogação das FBGs contidas em cada conjunto.

Outra técnica para interrogação de FBG consiste no uso de fontes sintonizáveis como, por exemplo, um laser sintonizável. BETZ *et al.* [26] apresentam em seu artigo uma forma de monitorar ondas acústicas de ultrassom utilizando essa técnica. O comprimento de onda do laser é sintonizado na região linear do espectro de reflexão da FBG sensora. Quando a FBG sofre uma deformação provocada pelas ondas de ultrassom, o comprimento de onda de ressonância da FBG vibra com a mesma frequência das ondas de ultrassom, isto é, as ondas de ultrassom modulam o espectro de reflexão da FBG em comprimento de onda. Como a relação entre a deformação provocada pelas ondas de ultrassom e a variação do comprimento de onda é quase linear, esse deslocamento do comprimento de onda de ressonância se torna uma variação de potência no receptor que representa a deformação provocada pelas ondas de ultrassom, quando o laser é sintonizado na região linear da FBG. Logo, a variação em comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG é demodulado por um laser sintonizado na região linear dessa FBG, gerando uma variação de potência no receptor que representa a deformação provocada pelas ondas de ultrassom. A Figura 2-7 apresenta alguns parâmetros que descrevem o espectro de reflexão da FBG. Nela, λ_r representa o comprimento de onda de ressonância da FBG, λ_s é o comprimento de onda do laser sintonizável e $\Delta\lambda$ é o deslocamento do comprimento de onda provocado pela deformação produzida pelas ondas de ultrassom.

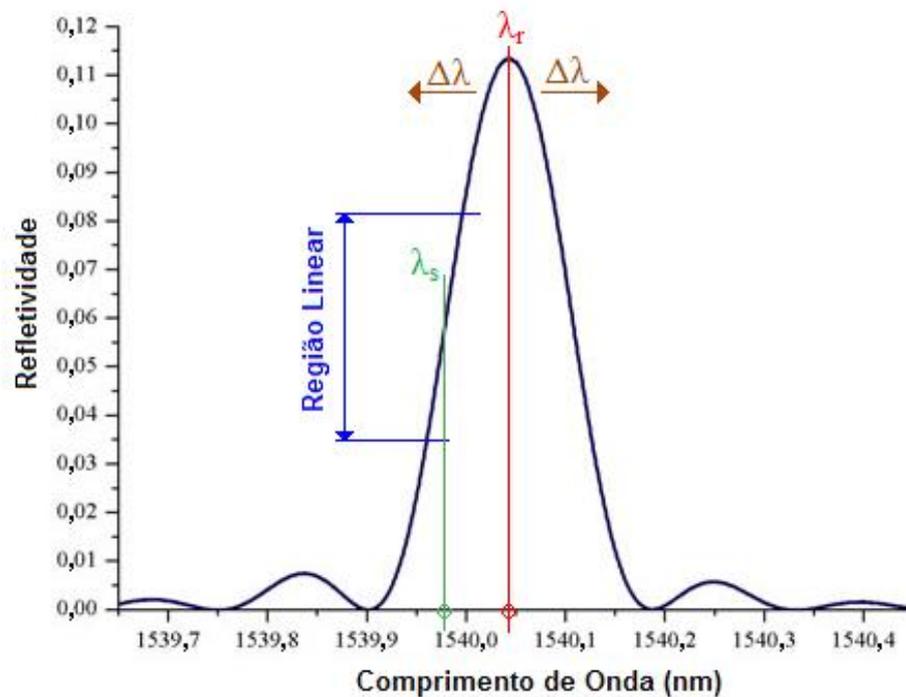


Figura 2-7: Parâmetros relevantes para descrição do espectro de reflexão da FBG [26].

No artigo de FARRELL *et al.* [27], é proposta uma nova técnica de interrogação com laser sintonizável capaz de monitorar a temperatura, deformação e pressão, em uma fibra instalada ao longo de uma estrutura, a uma distância acima de 70 km. O sistema de sintonia do laser possui uma fonte com largura espectral fina que varre toda a faixa de comprimento de onda de interesse. Utilizando uma taxa linear de sintonia, o comprimento de onda do laser se torna proporcional ao tempo. Dessa forma, o espectro do sinal refletido pela FBG apresenta uma intensidade, em cada comprimento de onda, que é função do tempo de varredura. Calibrando com precisão a forma de onda de varredura da fonte, com o intuito de converter o instante de tempo de varredura no comprimento de onda correspondente, a intensidade do sinal refletido em cada comprimento de onda é obtida. Com isso, o espectro de reflexão do sensor é reconstruído. Devido ao longo comprimento do percurso até o elemento sensor, é preciso considerar um atraso adicional na conversão do comprimento de onda para o tempo de varredura. Através do mapeamento da distância até cada sensor, ao longo da faixa de comprimento de onda de operação, esse efeito provocado pelo atraso pode ser normalizado. Em um sensor que opera na faixa de 1530 a 1532 nm a uma distância de 20 km, deve ser considerado um atraso de 100 μ s no tempo de varredura dentro dessa faixa.

O uso de filtros de borda linear e fontes sintonizáveis oferecem alternativas viáveis para construção de sensores ópticos baseados em grade de Bragg sujeitas a ondas acústicas, vibrações, ultrassom ou a descargas parciais [26, 28, 29, 30, 31]. Esses parâmetros provocam

uma deformação na FBG modulando seu espectro em comprimento de onda, através do efeito opto-elástico. Com isso, a grade de Bragg é interrogada através da demodulação do seu espectro, convertendo a variação de comprimento de onda em uma variação de amplitude que representa os parâmetros externos a ela. A Figura 2-8 apresenta circuitos ópticos para demodulação a partir do uso de filtros de borda linear. Já a Figura 2-9 apresenta circuitos ópticos para demodulação a partir do uso de fontes sintonizáveis. Nelas, a sigla SLD representa a fonte de banda larga, LEF representa o filtro de borda linear e TL o laser sintonizável.

Na Figura 2-8 (a), a demodulação é realizada quando a FBG sensora está na região linear do filtro. Outra forma de realizar a demodulação consiste no uso de uma FBG funcionando como filtro de borda linear, de forma que o espectro de reflexão da FBG sensora fique sintonizado à região linear do espectro de reflexão da FBG funcionando como filtro, como mostra a Figura 2-8 (b). Nesse caso, o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora produz uma variação de potência ao passar pela FBG funcionando como filtro. A Figura 2-8 (c) mostra o uso de WDM para a demodulação do sinal. O espectro de reflexão da FBG sensora está localizado na região linear de duas portas do WDM. Dessa forma, além de funcionar como um filtro de borda linear, uma das saídas pode ser usada como referência. O DeMUX da Figura 2-8 (d) pode ser um DWDM ou um AWG. Ambos são dispositivos multicanais. O espectro de reflexão da FBG fica localizado entre dois canais adjacentes. Com isso, o deslocamento do espectro pode ser calculado através da potência de saída de cada canal.

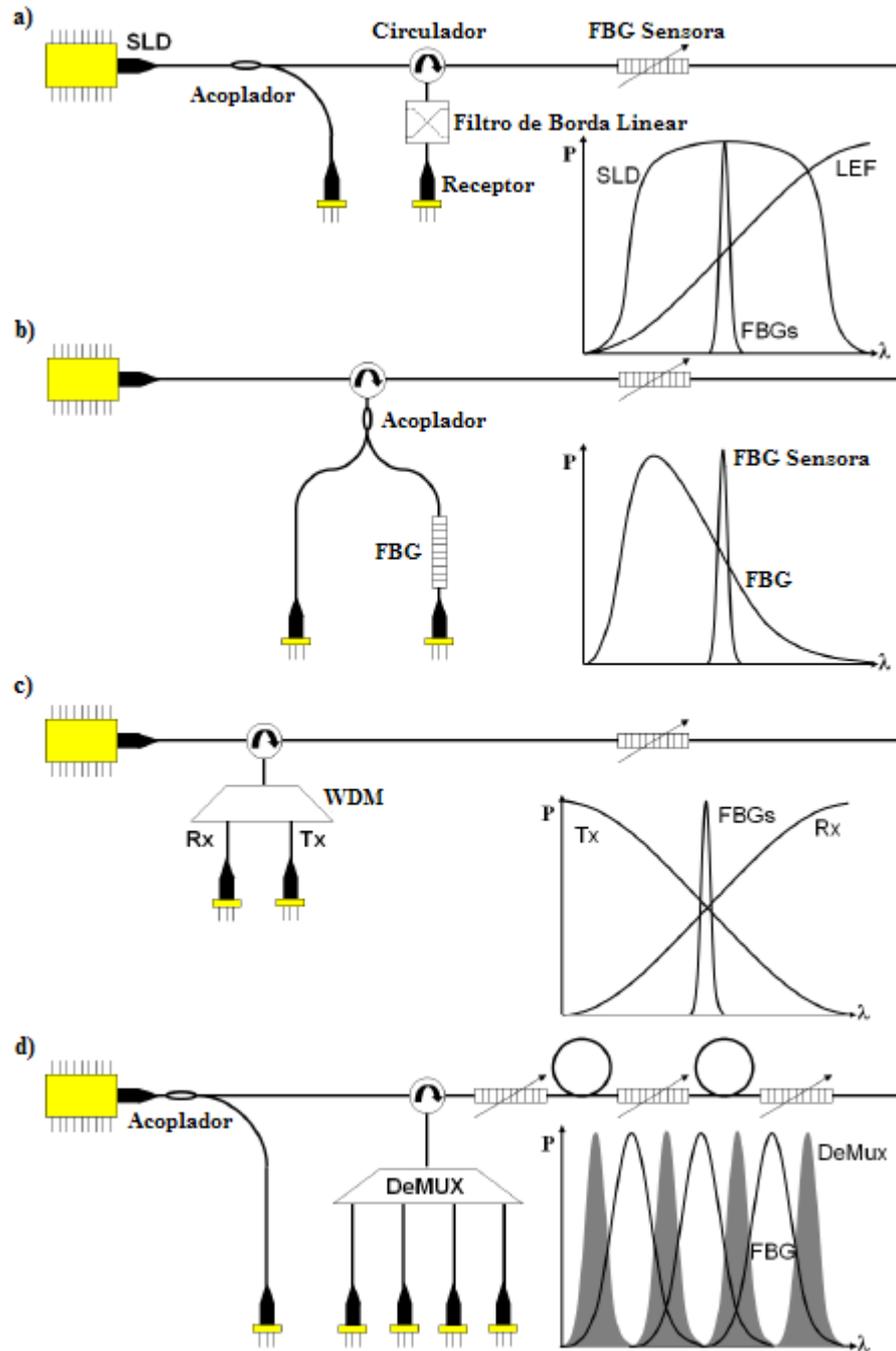


Figura 2-8: Demodulação a partir de filtros de borda linear [28].

Na Figura 2-9 (a), a demodulação é realizada quando a FBG sensora está na região linear da fonte de banda larga. As Figuras 2-9 (b) e 2-9 (c) apresentam a demodulação quando um laser sintonizável está na região linear do espectro de reflexão e de transmissão da FBG sensora, respectivamente.

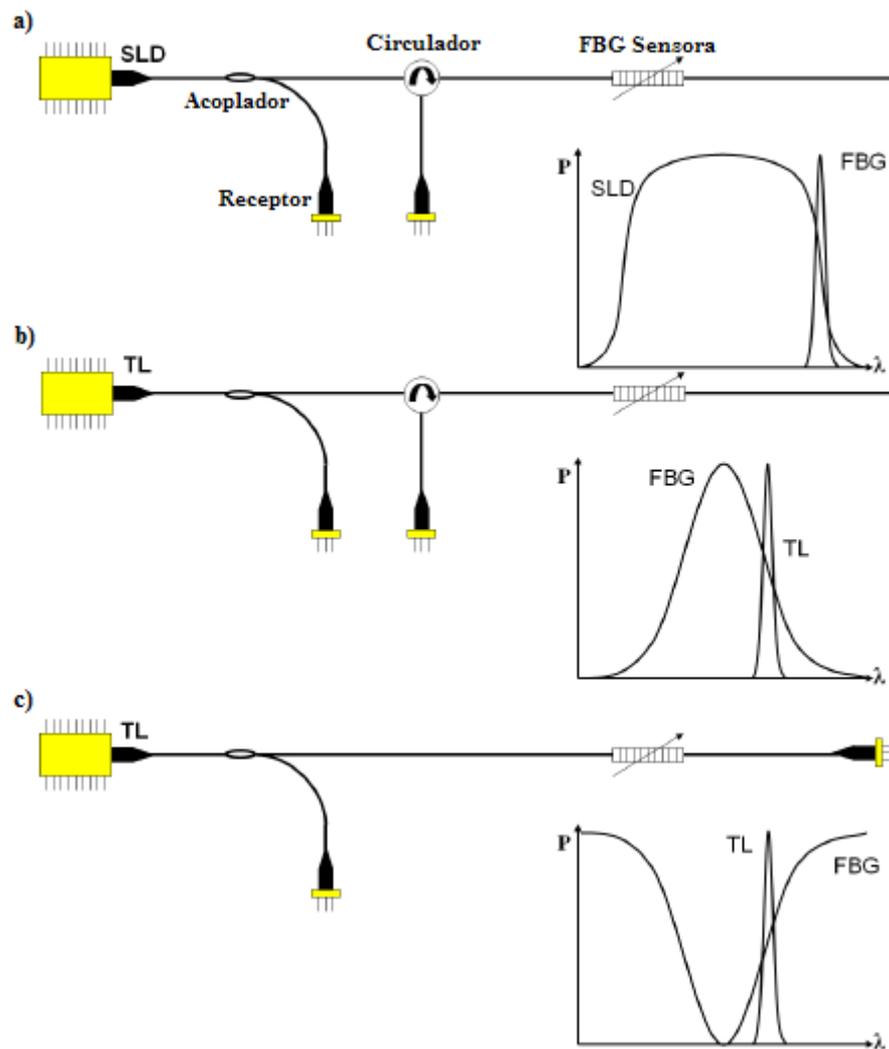


Figura 2-9: Demodulação a partir de fontes sintonizáveis [28].

FOMITCHOV *et. al* [29] investigaram o uso de sensores baseados em FBG para a detecção de ondas de ultrassom em estruturas sólidas e líquidas. A Figura 2-10 apresenta a montagem do sensor para medição no interior de um tanque preenchido com água. O laser sintonizável, usado como fonte óptica, é sintonizado ao centro da região linear do espectro da FBG, o qual é monitorado através de um fotodetector.

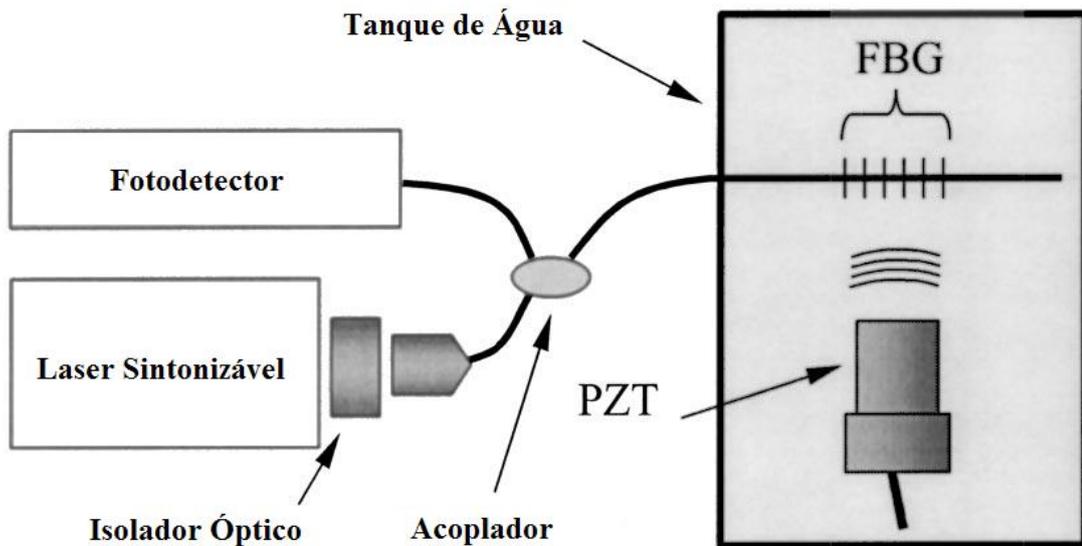


Figura 2-10: Montagem do sensor de ultrassom para medição no interior de um tanque de água [29].

Diversos artigos foram propostos demonstrando o uso de sistemas auto-referenciáveis para a interrogação de grades de Bragg [18, 19, 32, 33, 34]. Um mecanismo de referência permite que o sinal de saída independa de flutuações de potência da fonte e das perdas de transmissão provocadas pelos componentes do sensor. Na técnica proposta por MELE *et al.* [18], o espectro de reflexão de uma FBG sujeita à deformação axial é dividido em duas parcelas. Uma das parcelas passa por um filtro de borda linear, enquanto a outra parcela é usada como referência. No mecanismo descrito por DAVIS *et al.* [19], o sinal refletido por uma FBG sujeita à deformação axial passa através de um WDM que possui duas portas de saída. A interrogação é realizada pela relação entre a diferença e a soma da potência dessas duas portas.

No artigo de WILSON *et al.* [32] é descrito uma técnica de interrogação de FBG em um mecanismo auto-referenciável. Para isso foi usado um diodo laser pulsado que emite sinal em dois comprimentos de onda. O princípio da técnica é ilustrado na Figura 2-11. O espectro de reflexão da FBG é iluminado em dois comprimentos de onda, simultaneamente. Esses comprimentos de onda são sintonizados no ponto de meia potência das duas bordas do espectro da FBG. Quando a FBG não sofre nenhuma perturbação, a intensidade da luz refletida nos dois comprimentos de onda é igual, como mostra a Figura 2-11 (a). O deslocamento do espectro de reflexão da FBG induzido por parâmetros externos varia a intensidade em ambos os comprimentos de onda, como mostra a Figura 2-11 (b). Com isso, o deslocamento é calculado pela relação entre a diferença e a soma da intensidade da luz refletida nos dois comprimentos de onda.

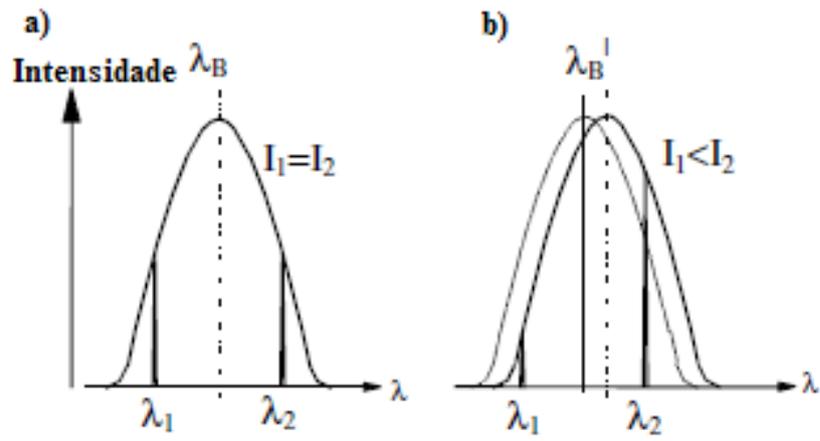


Figura 2-11: Diagrama esquemático da técnica de interrogação usando dois comprimentos de onda [32].

Referências Bibliográficas

1. HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C.; KAWASAKI, B. S. “**Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication**”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, p. 647-649, May 1978.
2. OTHONOS, A. “**Fiber Bragg Gratings**”, *Review of Scientific Instruments*, vol. 68, no. 12, p. 4322-4327, December 1997.
3. KASHYAP, R. “**Fiber Bragg Gratings**”, Academic Press, London, 1999.
4. HAND, D. P.; RUSSEL, P. S. “**Photoinduced Refractive-Index Changes in Germanosilicate Fiber**”, *Optics Letters*, vol. 15, no. 2, p. 102-104, 1990.
5. RUSSEL, P. S.; HAND, D. P.; CHOW, Y. T.; POYNTZ-WRIGHT, L. J. “**Optically induced creation, transformation, and organization of defects and color centers in optical fibers**”, *Proc. SPIE*, vol. 1516, no. 47, 1991.
6. HILL, K. O.; MALO, B.; BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; MORSE, T. F.; KILIAN, A.; REINHART, L.; OH, K. “**Photosensitivity in $\text{Eu}^{2+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ -doped-core fibre: preliminary results and application to mode converters**”, in *Optical Fiber Communication Conference, 1991, OFC'91*, PD3-1, p. 14-17.
7. BROER, M. M.; CONE, R. L.; SIMPSON, J. R. “**Ultraviolet-induced distributed-feedback gratings in Ce^{3+} doped silica optical fibres**”, *Optics Letters*, vol. 16, no. 18 p. 1391-1393, 1991.
8. BILODEAU, F.; JOHNSON, D. C.; MALO, B.; VINEBERG, K. A.; HILL, K. O.; MORSE, T. F.; KILIAN, A.; REINHART, L. “**Ultraviolet-light photosensitivity in Er^{3+} -Ge-doped optical fiber**”, *Optics Letters*, vol. 15, no. 20 p. 1138-1140, 1990.
9. MALITSON, L. H. “**Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica**”, *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 55, no. 10, p. 1205-1209, 1965.
10. SCEATS, M. G.; POOLE, S. B. “**Stress-relief: the mechanism of photorefractive index control in fiber cores**”, *Sixteenth Australian Conference on Optical Fiber Technology*, p. 302-305, 1991.
11. FONJALLAZ, P. Y.; LIMBERGER, H. G.; SALATHÉ, R. P.; COCHET, F.; LEUEMBERGER, B. “**Tension increase correlated to refractive-index change in fibers containing UV-written Bragg gratings**”, *Optics Letters*, vol. 10, p. 1346-1348, 1995.
12. BERNARDIN, J. P.; LAWANDY, N. M. “**Dynamics of the formation of Bragg gratings in germanosilicate optical fibers**”, *Optics Communications*, vol. 79, p. 194-199, 1990.
13. FIORI, C.; DEVINE, R. A. B. “**Ultraviolet irradiation induced compaction and photoetching in amorphous thermal SiO_2** ”, *Materials Research Society Symposium Proceedings*, vol. 61, p. 187-195, 1986.
14. WILLIAMS, D. L.; AINLIE, B. J.; ARMITAGE, J. R.; KASHYAP, R.; CAMPBELL, R. “**Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibers**”, *Electronics Letters*, vol. 29, p. 45-47, 1993.
15. LEMAIRE, P. J.; ATKINS, R. M.; MIZRAHI, V.; REED, W. A. “**High pressure H_2 loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO_2 doped optical fibres**”, *Electronics Letters*, vol. 29 no. 13, p. 1191-1193, 1993.

16. TAYLOR, H. F.; YARIV, A. “**Guided Wave Optics**”, Proceedings of the IEEE, vol. 62, no. 8, p. 1044-1060, August 1974.
17. BHATIA, V. “**Properties and Sensing Applications of Long-Period Gratings**”, Ph.D. Dissertation, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, 1996.
18. MELLE, S. M.; LIU, K.; MEASURES, R. M. “**A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Grating Sensors**”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 4, no. 5, p. 516–518, May 1992.
19. DAVIS, M. A.; KERSEY, A. D. “**All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler**”, Electronics Letters, vol. 30, no. 1, p. 75-77, 1994.
20. FALLON, R. W.; ZHANG, L.; GLOAG, A.; BENNION, I. “**Multiplexed Identical Broad-Band-Chirped Grating Interrogation System for Large-Strain Sensing Applications**”, IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 9, no. 12, p. 1616–1618, December 1997.
21. FALLON, R. W.; ZHANG, L.; EVERALL, L. A.; WILLIAMS, J. A. R.; BENNION, I. “**All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating**”, Measurement Science and Technology, vol. 9, p. 1969-1973, 1998.
22. KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBRANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; PUTNAM, M. A.; FRIEBELE, E. J. “**Fiber Grating Sensors**”, J. Lightwave Technol., vol. 15, no. 8, p. 1442-1463, August 1997.
23. ALLSOP, T.; REEVES, R.; WEBB, D. J.; BENNION, I.; NEAL, R. “**A high sensitivity refractometer based upon a long period grating Mach–Zehnder interferometer**”, Review of Scientific Instruments, vol. 73, no. 4, p. 1702-1705, April 2002.
24. KERSEY, A. D.; BERKOFF, T. A.; MOREY, W. W. “**Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter**”, Optics Letters, vol. 18, no. 16, p. 1370–1372, August 1993.
25. DAVIS, M. A.; BELLEMORE, D. G.; PUTNAM, M. A.; KERSEY, A. D. “**Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with microstrain resolution capability**”, Electronics Letters, vol. 32, no. 15, p. 1393-1394, 1996.
26. BETZ, D. C.; THURSBY, G.; CULSAHW, B.; STASZEWSKI, W. J. “**Acousto-ultrasonic sensing using fiber Bragg gratings**”, Smart Materials and Structures, vol. 12, no. 1, p. 122-128, 2003.
27. FARRELL, T.; O’CONNOR, P.; LEVINS, J.; MCDONALD, D. “**Novel FBG interrogation technique for achieving < 100 nε accuracies at remote distances > 70 km**”, Proc. SPIE, vol. 5826, no. 1, p. 663-669, 2005.
28. WILD, G.; HINCKLEY, S. “**Optical Fibre Bragg Grating for Acoustic Sensors**”, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, p. 23-27, 2010.
29. FOMITCHOV, P. A.; KRISHNASWAMY, S. “**Response of a fiber Bragg grating ultrasonic sensor**”, Optical Engineering, vol. 42, no. 4, p. 956-963, April 2003.
30. KUNG, P.; WANG, L.; COMANICI, M. I.; CHEN, L. R. “**Detection and location of PD activities using an array of fiber laser sensors**”, Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on, p. 511-515, June 2012.

31. TAKAHASHI, N.; SOMATOMO, H.; TANAKA, S. “**Measurement of dynamic strain with optical fiber gratings**”, Proceedings of the XIth International Congress and Exposition, June 2008.
32. WILSON, A.; JAMES S. W.; TATAM, R. P. “**Time-division-multiplexed interrogation of fibre Bragg grating sensors using laser diodes**”, Measurement Science and Technology, vol. 12, p. 181-187, 2001.
33. CARVALHO, J. P.; COELHO, L.; FRAZÃO, O.; SANTOS, J. L. “**Electrical Dynamic Interrogation System for Long Period Gratings**”, Advanced in Sensors, Signals and Materials, ISBN: 978-960-474-248-6, p. 158-161, 2010.
34. SILVA, R. M.; BAPTISTA, J. M.; SANTOS, J. L.; RIBEIRO, A. B. L.; ARAÚJO, F. M.; FERREIRA, L. A.; FRAZÃO, O. “**A simple, self-referenced, intensity-based optical fibre sensor for temperature measurements**”, Optics Communication, vol. 291, p. 215-218, 2013.

CAPÍTULO 3

TÉCNICA DE INTERROGAÇÃO DE FBG PROPOSTA

O presente trabalho demonstra uma nova técnica de interrogação de sensores baseados em grades de Bragg para monitoramento de uma FBG sensora sujeita à vibração e temperatura, simultaneamente. O elemento interrogador consiste de uma FBG interrogadora atuando como filtro sintonizável auto-referenciado.

Um sinal de banda espectral larga, produzido por uma fonte de emissão espontânea amplificada (*ASE – Amplified Spontaneous Emission*), é transmitido para a FBG sensora através de um circulador óptico. A FBG sensora está sujeita a vibrações e variações de temperatura. As vibrações modulam o espectro de reflexão da FBG em comprimento de onda. O espectro de reflexão da FBG sensora é transmitido a FBG interrogadora. Ao sintonizar o espectro de transmissão da FBG interrogadora, de forma que o espectro de reflexão da FBG sensora fique alinhado à região linear, a variação do comprimento de onda de ressonância se torna uma variação de amplitude que representa as vibrações. Dessa forma, as vibrações são obtidas pela demodulação do espectro de reflexão da FBG sensora que ocorre quando seu espectro de reflexão está sintonizado à região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

A interrogação e sintonia são feitas pelo circuito de interrogação. A FBG interrogadora é fixada a uma cerâmica PZT que vibra em baixa frequência, tipicamente em torno de 800 Hz. Quando o espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, a potência do primeiro harmônico do sinal

resultante é muito maior do que a potência do segundo harmônico. Conforme o espectro de reflexão da FBG sensora se desloca devido à variação da temperatura, seu espectro de reflexão começa a sair da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, diminuindo a potência do primeiro harmônico e aumentando a potência do segundo harmônico. Dessa forma, é possível determinar se o espectro de reflexão da FBG sensora se encontra na região linear a partir da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da vibração em torno de 800 Hz. Além disso, como as potências de cada harmônico são proporcionais à potência do sinal de entrada, a relação entre as potências dos harmônicos se torna independente da potência do sinal de entrada, produzindo um mecanismo auto-referenciável.

A técnica de interrogação é representada na Figura 3-1. Quando a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico está acima de um determinado valor, o espectro de reflexão da FBG sensora se encontra na região linear. Nesse caso, o circuito de interrogação entra em fase de medição, na qual são medidas a temperatura e as vibrações sobre a FBG sensora. As vibrações são medidas através da demodulação do espectro de reflexão da FBG sensora.

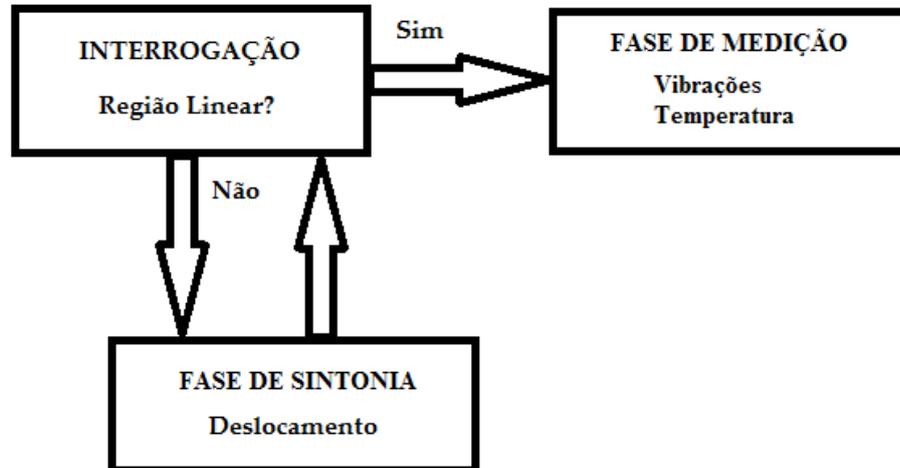


Figura 3-1: Diagrama representativo da técnica de interrogação de FBG proposta.

Abaixo de um determinado valor dado pela relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, o espectro de reflexão da FBG sensora deixa de operar na região linear. Nesse caso, o circuito de interrogação entra em fase de sintonia. O objetivo dessa etapa é deslocar o espectro de transmissão da FBG interrogadora até que o espectro de reflexão da FBG sensora volte a operar na região linear. Esse processo é feito esquentando ou esfriando a FBG interrogadora através de um dispositivo baseado em junção peltier encostado sobre ela, o qual provoca um deslocamento no espectro de transmissão para menores ou maiores valores

de comprimento de onda, em função da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier. Portanto, quando o espectro de reflexão da FBG sensora se desloca devido à variação da temperatura, uma corrente elétrica é aplicada sobre a junção peltier, baseada na relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, de forma a produzir um deslocamento no espectro de transmissão da FBG interrogadora, até que o espectro de reflexão da FBG sensora volte a operar na região linear. Dessa forma, conhecidas as relações entre a corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier e o deslocamento do espectro de transmissão da FBG interrogadora, e entre o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora e a temperatura, é possível medir a temperatura sobre a FBG sensora a partir da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação.

Portanto, enquanto as vibrações são medidas pela demodulação do espectro de reflexão da FBG sensora, quando este está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, a temperatura é medida através da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação, possibilitando o monitoramento de ambos os parâmetros simultaneamente. No lugar da vibração, é possível utilizar essa técnica para monitorar uma FBG sujeita a ondas acústicas, ou a descargas parciais, como as produzidas por equipamentos de alta tensão. Nesse caso, são monitoradas as descargas parciais e a temperatura no interior no equipamento, se a FBG for fixada internamente, ou a temperatura na superfície externa do equipamento, se a FBG for fixada na parte externa do equipamento.

Os próximos itens apresentam a montagem completa dos circuitos de sensoriamento e interrogação, caracterizando todos os seus componentes. O circuito de sensoriamento tem como principal elemento uma FBG sensora, que está sujeita a vibrações e à variação de temperatura, simultaneamente. O circuito de interrogação, cujo principal elemento é uma FBG interrogadora funcionando como filtro sintonizável auto-referenciado, tem a função de medir o deslocamento do espectro da FBG sensora associando-o à vibração e à variação da temperatura correspondente. É no circuito de interrogação que se encontra implementada a técnica de interrogação de FBG proposta nesse trabalho.

3.1. Circuito de sensoriamento

O circuito de sensoriamento é responsável pelo sensoriamento tanto das vibrações quanto da temperatura. O principal elemento desse circuito é uma FBG sensora, a qual está sujeita a esses parâmetros. Quando uma FBG sofre a influência do meio externo, de modo que o período da grade e/ou o índice de refração efetivo da fibra seja alterado, o comprimento de

onda de ressonância e, conseqüentemente, o espectro da FBG, sofre um deslocamento. A FBG sensora sujeita a vibrações tem seu espectro de reflexão modulado em comprimento de onda, isto é, o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora varia de forma correspondente à amplitude e frequência das vibrações as quais ela está sujeita.

A forma de onda de vibração à qual a FBG sensora está sujeita pode ser recuperada quando o espectro de reflexão da FBG sensora se encontra na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. A temperatura, por outro lado, varia o comprimento de onda de ressonância de forma gradual, por ser um parâmetro quase estático, ou seja, a variação da temperatura provoca um deslocamento mais lento no espectro da FBG sensora, quando comparado ao deslocamento provocado pelas vibrações. O espectro de transmissão da FBG interrogadora é sintonizado, de maneira que a FBG sensora volte a operar na região linear, através do controle da temperatura sobre uma junção peltier na qual a FBG interrogadora é encostada. Visto que o controle da temperatura é feito por uma corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação, o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora pode ser calculado através dessa corrente elétrica, associando-o a variação da temperatura sobre a FBG sensora. Dessa forma, as vibrações e a variação da temperatura são monitoradas, quando o espectro de reflexão da FBG sensora sujeita a esses parâmetros é transmitido para a FBG interrogadora, que é o principal elemento do circuito de interrogação. Logo, a função do circuito de sensoriamento é receber os parâmetros externos e transmiti-los para o circuito de interrogação.

O circuito de sensoriamento é representado na Figura 3-2. O sinal de banda espectral larga de uma fonte de emissão espontânea amplificada (ASE – *Amplified Spontaneous Emission*) é transmitido para uma FBG sensora através de um circulador óptico. O espectro de reflexão da FBG sensora sujeita a vibrações e à variação de temperatura é transmitido para o circuito de interrogação através do circulador.

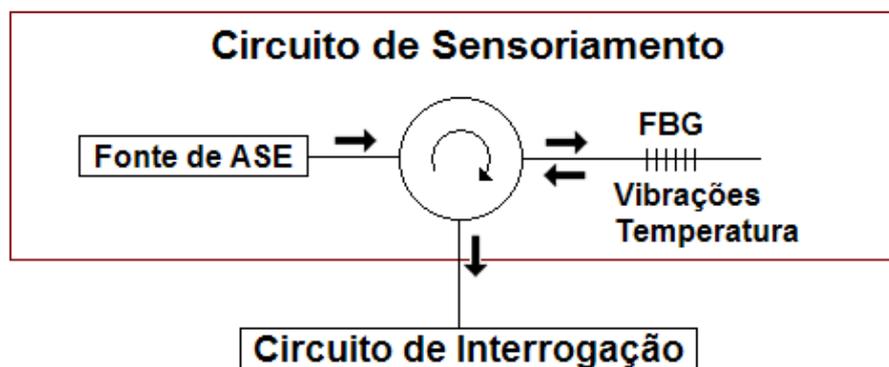


Figura 3-2: Diagrama representativo do circuito de sensoriamento.

As vibrações e a variação da temperatura sobre a FBG sensora são controladas por uma cerâmica piezoelétrica (PZT) e por uma junção peltier, respectivamente, como mostrado na Figura 3-3. A fibra, na qual a FBG sensora foi inscrita, é fixada a um suporte em cada uma das suas extremidades. O PZT se expande ou contrai dependendo do sinal elétrico aplicado sobre ele. Ao aplicar uma tensão senoidal sobre o PZT, ele vibra e essa vibração é transmitida para a FBG sensora que está fixada a ele. Portanto a vibração do PZT expande e contrai a fibra óptica cuja FBG sensora foi inscrita. A FBG sensora é encostada em uma junção peltier no sensoriamento, cuja temperatura é controlada pela corrente elétrica aplicada sobre ela.

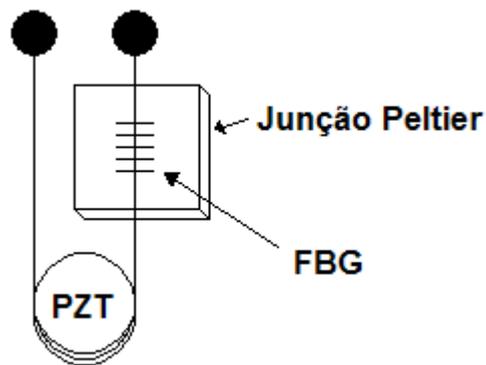


Figura 3-3: FBG sensora submetida a vibrações de uma cerâmica piezoelétrica e à variação da temperatura de uma junção peltier.

Os componentes do circuito de sensoriamento são caracterizados nos tópicos seguintes. O circuito de sensoriamento contém uma fonte de ASE, um circulador óptico e uma FBG sensora. Além disso, são caracterizadas a junção peltier e a cerâmica piezoelétrica.

3.1.1. Fonte de ASE

Esse dispositivo é uma fonte de emissão espontânea amplificada de banda espectral larga, na faixa de comprimento de onda entre 1530 e 1610 nm. A Figura 3-4 mostra a imagem do equipamento.



Figura 3-4: Fonte de ASE para bandas C e L.

As especificações técnicas da fonte de ASE e a densidade espectral de potência em função do comprimento de onda são mostradas na Tabela 3-1 e na Figura 3-5, respectivamente.

Tabela 3-1: Especificações técnicas da fonte de ASE para bandas C e L.

Modelo	ASE-FL7006-15
Potência Total de Saída	>+15 dBm (>31.6 mW)
Bandas de Comprimento de Onda de Saída	Bandas C e L
Densidade Espectral de Potência	> -8 dBm/nm 1528 - 1603 nm
Estabilidade da Potência de Saída	< +/-0.01 dB
Tipo de Fibra	SMF
Conector Óptico de Saída	FC/PC
Dimensões	28x120x90 mm
Temperatura Operacional	0 ~ 40 °C
Temperatura de Armazenamento	-10 ~ 60 °C
Fonte de Alimentação	AC 100 ~ 240 V (50/60 Hz)

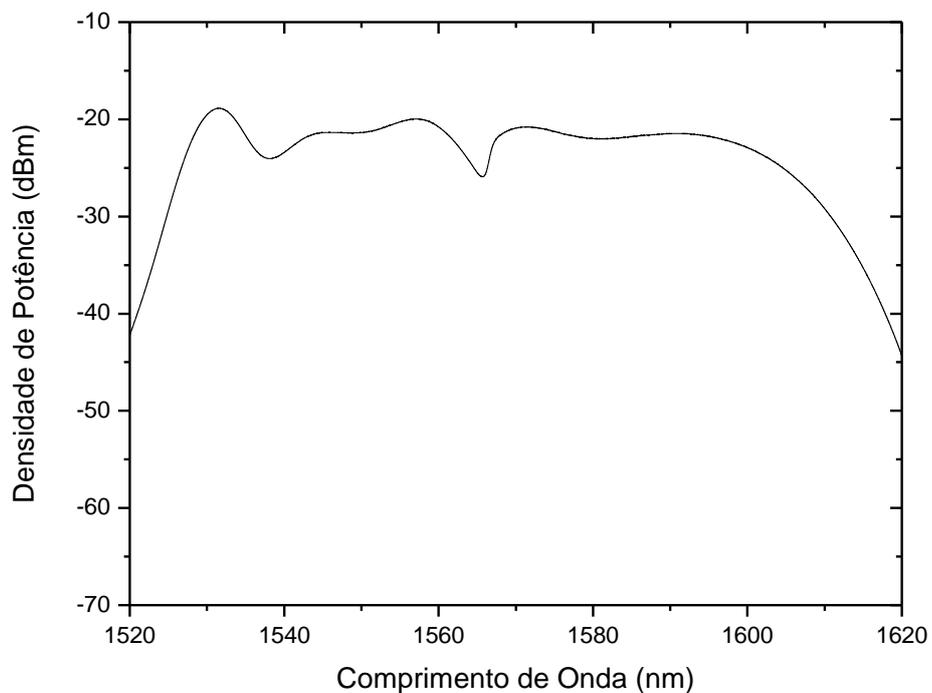


Figura 3-5: Densidade espectral de potência da fonte de ASE.

3.1.2. Circulador óptico

O circulador óptico é um elemento usado para separar sinais que viajam em direções opostas em uma fibra óptica. O circulador possui três portas. A cada porta é associada uma cor: a porta 1 tem cor vermelha, a porta 2 tem cor azul e a porta 3 tem cor branca. A imagem do circulador é mostrada na Figura 3-6.

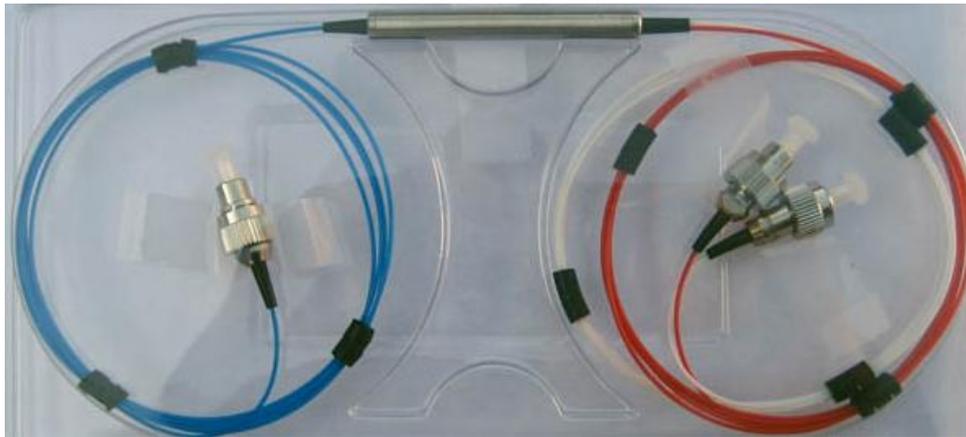


Figura 3-6: Circulador óptico para bandas S, C e L.

No circulador, o sinal é transmitido da seguinte forma: o sinal que entra na porta 1 (cor vermelha) é transmitido para a porta 2 (cor azul) e o sinal que entra na porta 2 (cor azul) é transmitido para a porta 3 (cor branca). As especificações técnicas do circulador óptico são apresentadas na Tabela 3-2.

Tabela 3-2: Especificações técnicas do circulador óptico para bandas S, C e L.

Modelo	PIOC3CLP2222
Faixa de Comprimento de Onda de Operação	1470 – 1610 nm
Perda de Inserção [Porta 1 para 2]	0,59 dB
Perda de Inserção [Porta 2 para 3]	0,54 dB
Perda de Inserção [Porta 2 para 1]	52 dB
Perda de Inserção [Porta 3 para 2]	51 dB
Perda de Retorno [Porta 1]	56 dB
Perda de Retorno [Porta 2]	58 dB
Perda de Retorno [Porta 3]	57 dB
<i>Cross Talk</i> [Porta 1 para 3]	59 dB
Comprimento da Fibra	2 m
Temperatura Operacional	0 ~ 70 °C
Temperatura de Armazenamento	-40 ~ 85 °C
Umidade	0 ~ 85 %

3.1.3. FBG sensora

A FBG sensora é o elemento sensor de temperatura e vibrações. Esses parâmetros variam o comprimento de onda central e, conseqüentemente, deslocam o seu espectro de reflexão. As especificações técnicas e a função de transferência da FBG sensora são apresentadas na Tabela 3-3 e na Figura 3-7, respectivamente.

Tabela 3-3: Especificações técnicas da FBG sensora.

Modelo	OEFBG-100
Largura de Banda	0,28 nm
Comprimento de Onda Central	1550,098 nm
Tipo de Fibra	SMF - 28
Revestimento	Acrilato
Refletividade	99,48%

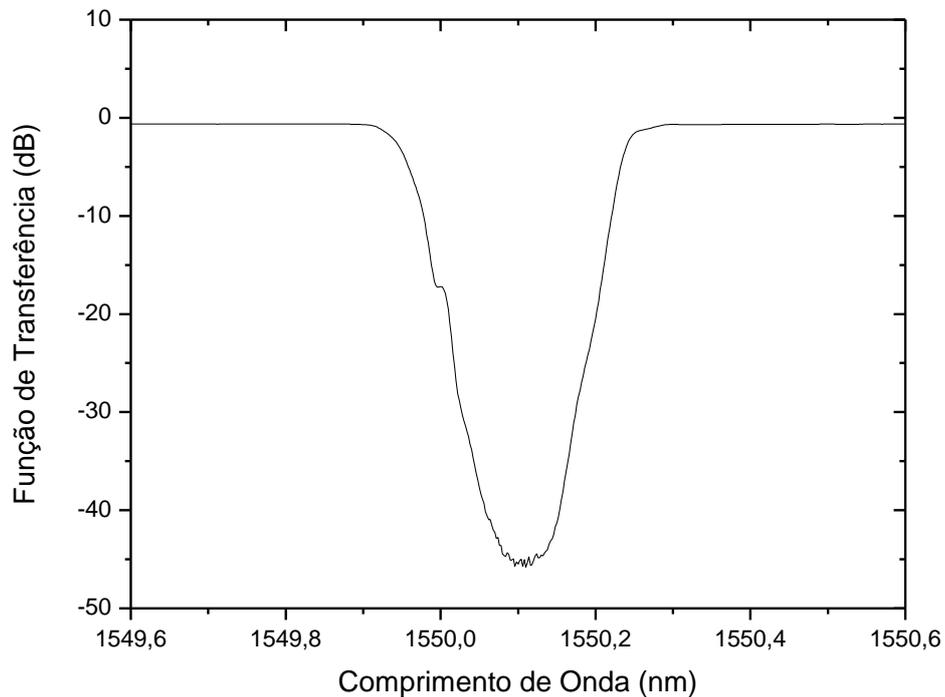


Figura 3-7: Função de transferência da FBG sensora.

Como a FBG sensora possui espectro de reflexão, ao liga-la à porta 2 (cor azul) do circulador, o sinal de ASE transmitido através da porta 1 (cor vermelha) do circulador para a porta 2, é refletido pela FBG e esse espectro de reflexão é transmitido para a porta 3 (cor cinza), como representado na Figura 3-8. O espectro de reflexão é então transmitido para o Circuito de Interrogação através da porta 3.

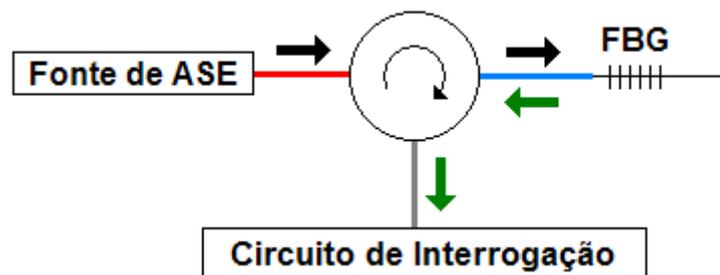


Figura 3-8: Disposição dos elementos ópticos em relação ao circulador.

A Figura 3-9 mostra o espectro de transmissão da fonte de ASE transmitido na direção indicada pelas setas de cor preta da Figura 3-8. A Figura 3-10 apresenta o espectro de reflexão da FBG sensora transmitido na direção indicada pelas setas de cor verde da Figura 3-8.

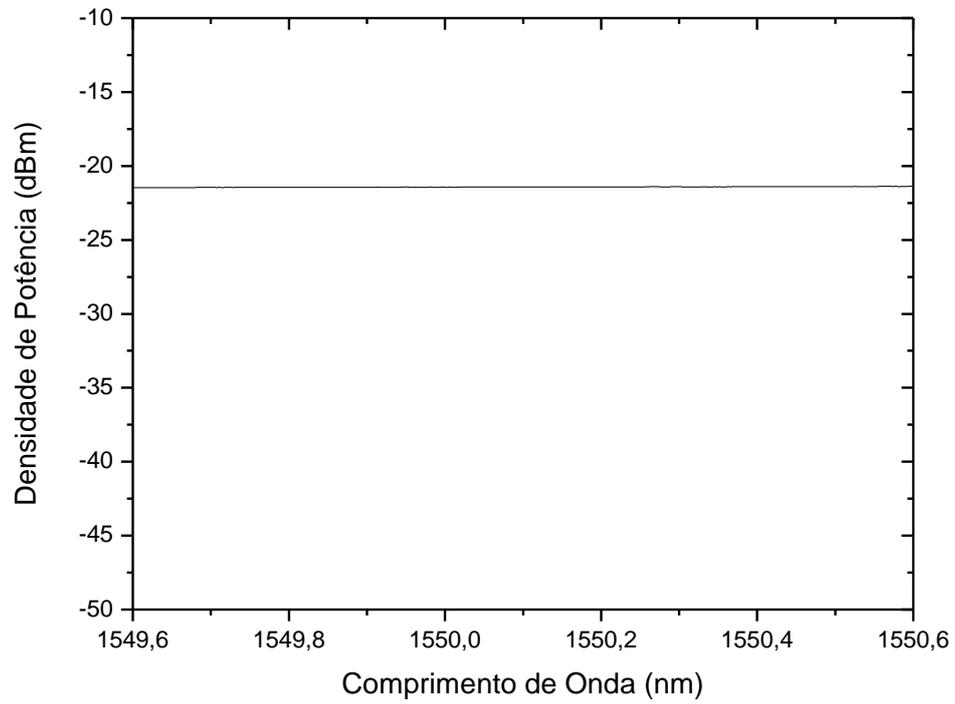


Figura 3-9: Densidade de potência da fonte de ASE.

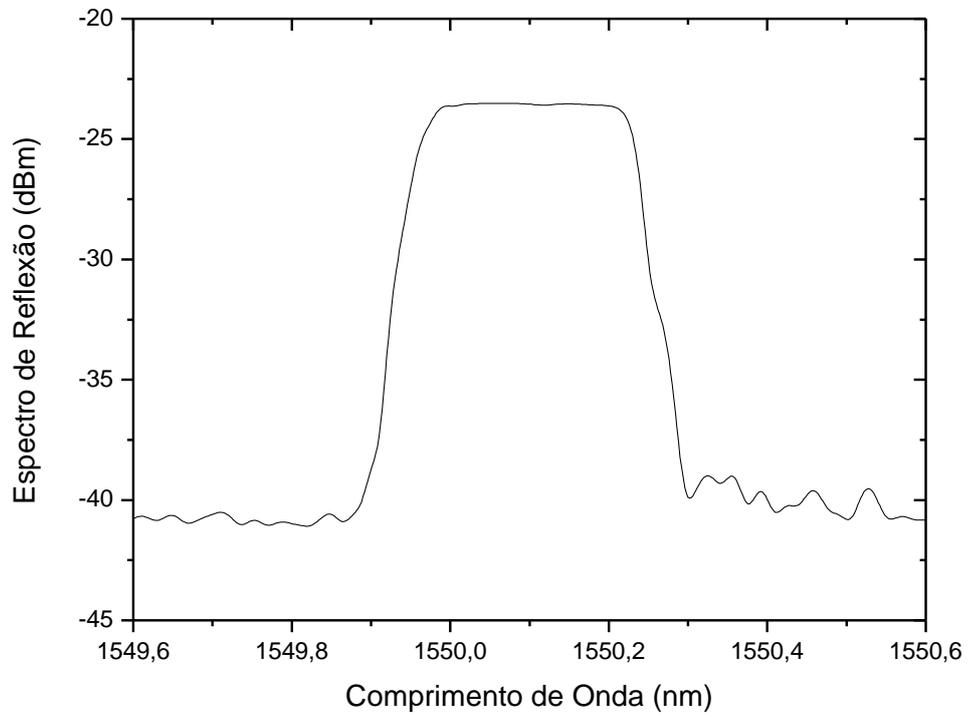


Figura 3-10: Espectro de reflexão da FBG sensora.

3.1.4. Junção peltier no sensoriamento

Um dispositivo baseado em junção peltier foi usado para controlar a temperatura sobre a FBG sensora. O efeito peltier ocorre quando uma corrente elétrica passa por um par de metais diferentes, resultando em um aumento da temperatura quando a corrente passa por um sentido e diminuição da temperatura quando a corrente passa no sentido inverso. Além disso, quando um lado aquece, o outro lado resfria e vice-versa. A imagem da junção peltier é mostrada na Figura 3-11.



Figura 3-11: Junção peltier.

As especificações técnicas da junção peltier, cujo modelo é TEC1-12710, são apresentadas na Tabela 3-4.

Tabela 3-4: Especificações técnicas da junção peltier.

Modelo	TEC1-12710	
Temperatura do Lado Quente	25 °C	50 °C
Máxima Potência	85 W	96 W
Máxima Variação de Temperatura	66 °C	75 °C
Máxima Corrente Elétrica	10,5 A	10,5 A
Máxima Tensão Elétrica	15,2 V	17,4 V
Módulo de Resistência	1.08 Ω	1.24 Ω
Dimensões	40x40x3,3 mm	
Máxima Temperatura de Operação	138 °C	

A Figura 3-12 mostra o gráfico da temperatura da junção peltier usada no sensoriamento em função da corrente elétrica aplicada.

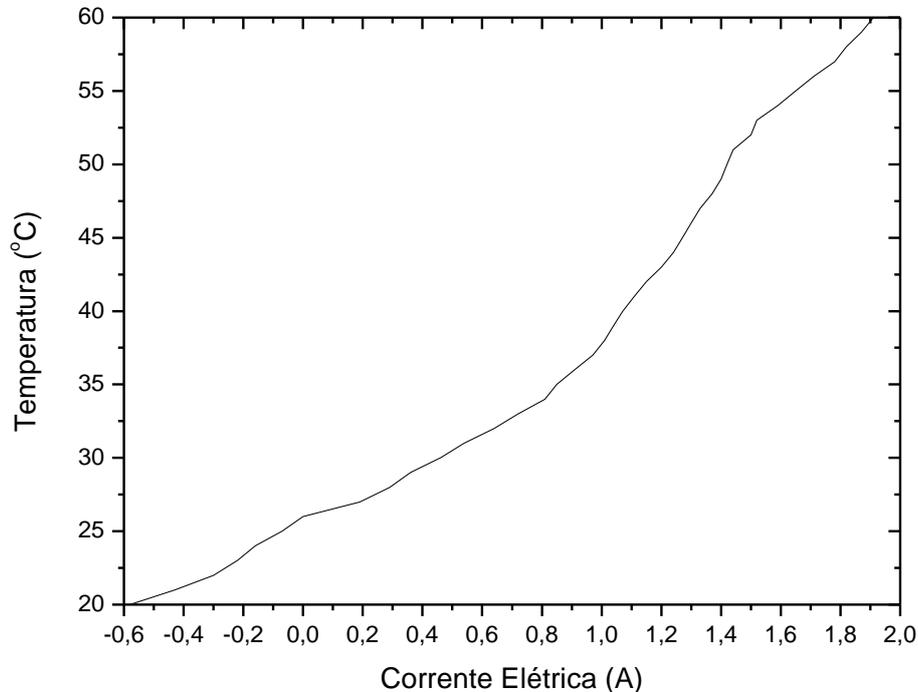


Figura 3-12: Temperatura da junção peltier usada no sensoriamento em função da corrente elétrica aplicada.

A temperatura provoca um deslocamento gradual do espectro da FBG sensora. Quando a temperatura sobre a FBG aumenta, o seu espectro desloca para maiores valores de comprimento de onda. Quando a temperatura sobre ela diminui, seu espectro desloca para menores valores de comprimento de onda.

3.1.5. Cerâmica piezoelétrica no sensoriamento

Em uma cerâmica piezoelétrica, a pressão mecânica a qual ela está sujeita é convertida em voltagem, através do efeito piezoelétrico direto. O inverso também ocorre: a cerâmica piezoelétrica sofre uma deformação mecânica quando sujeita a uma voltagem externa, pois sua estrutura cristalina se deforma na presença de campo elétrico. Esse efeito é conhecido como efeito piezoelétrico inverso. Um exemplo de cerâmica piezoelétrica é a cerâmica de titanato zirconato de chumbo (PZT). A Figura 3-13 mostra o PZT usado no circuito de sensoriamento.

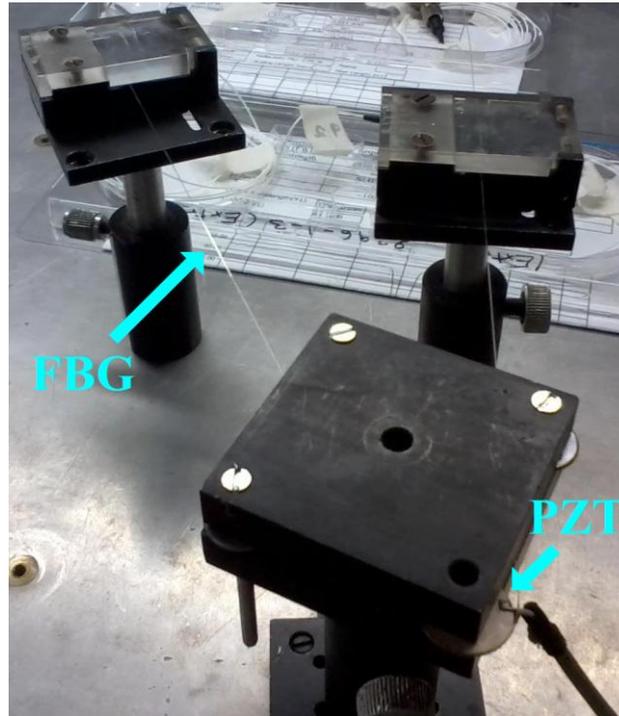


Figura 3-13: PZT usado no circuito de sensoriamento.

Nesse trabalho, o PZT atua sobre a FBG sensora com o intuito de produzir vibrações mecânicas sobre ela. Essas vibrações são produzidas ao aplicar uma voltagem sobre o PZT cuja forma de onda é senoidal. Como a FBG sensora é fixada à cerâmica piezoelétrica, essas vibrações são transmitidas para ela.

As vibrações provocam uma deformação na FBG sensora modulando seu espectro em comprimento de onda. Quando o PZT expande, a FBG é esticada, deslocando o seu espectro para maiores valores de comprimento de onda. Por outro lado, quando o PZT se contrai, a FBG também se contrai, deslocando o seu espectro para menores valores de comprimento de onda. Dessa forma, quando o PZT vibra, se expandindo e se contraindo, o espectro da FBG sensora se desloca para menores e para maiores valores de comprimento de onda conforme a deformação provocada pelo PZT. A Figura 3-14 mostra de forma representativa a modulação do espectro de reflexão da FBG sensora devido às vibrações, considerando λ_r o comprimento de onda de ressonância da FBG sensora quando ela não sofre influência de parâmetros externos, $\Delta\lambda_r$ a amplitude de variação do comprimento de onda de ressonância devido às vibrações e $f(t)$ uma função que representa a forma de onda das vibrações ao longo do tempo. A variação do comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora é dada pela equação (6).

$$\lambda_c(t) = \lambda_r + \Delta\lambda_r \cdot f(t) \quad (6)$$

Quando o espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, a variação no comprimento de onda de ressonância se torna uma variação na amplitude do espectro óptico de saída da FBG interrogadora. Dessa forma, o sinal é demodulado e as vibrações podem ser monitoradas. A forma de onda do sinal de saída, que representa as vibrações $f(t)$, é dada pela função $y(t)$. Considerando $\lambda_k(t)$ a variação do comprimento de onda de ressonância da FBG sensora, no tempo, em relação a λ_r , isto é, $\lambda_k(t) = \lambda_c(t) \pm \lambda_r$, a função $y(t)$ pode ser obtida a partir da equação (7), caso o espectro de reflexão da FBG sensora esteja na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Nela, A representa a inclinação da reta correspondente à região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Portanto ao normalizar a função $y(t)$, levando-se em conta a inversão de fase, é possível obter o sinal $f(t)$ que representa as vibrações às quais a FBG sensora está sendo sujeita.

$$y(t) = -A \cdot \lambda_k(t) = -A \cdot \Delta\lambda_r \cdot f(t) \quad (7)$$

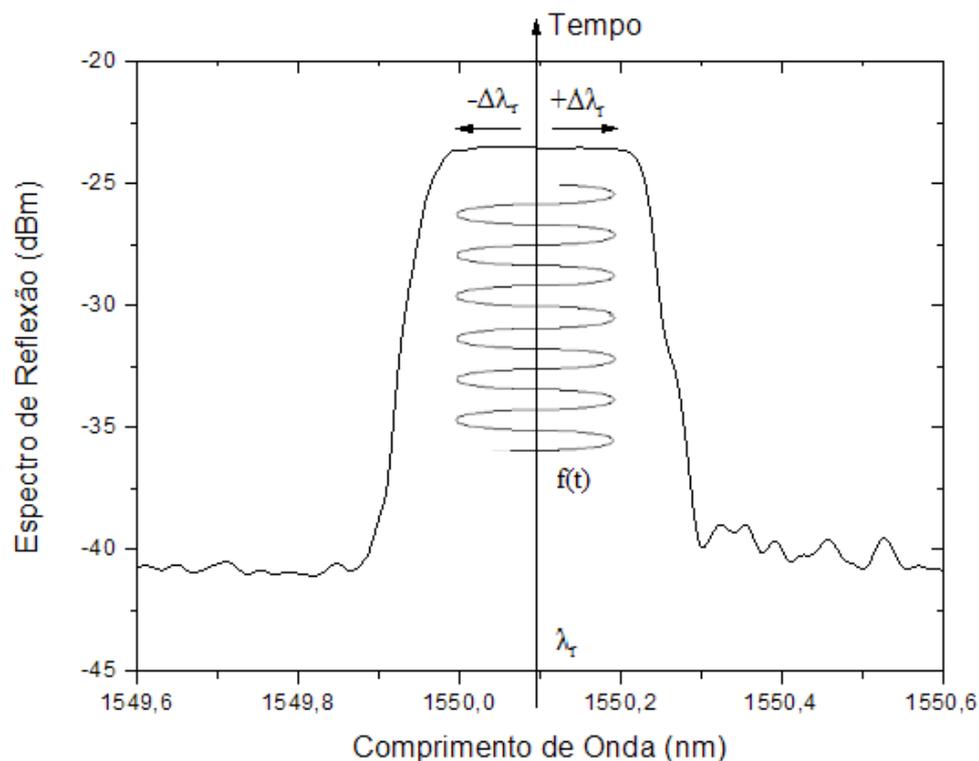


Figura 3-14: Representação da modulação do espectro de reflexão da FBG sensora devido às vibrações.

3.2. Circuito de interrogação

O circuito de interrogação tem a função de medir a temperatura e as vibrações a partir do espectro de reflexão da FBG sensora que está sujeita a esses parâmetros. Como elemento interrogador foi utilizada uma FBG, cuja largura de banda é aproximadamente dez vezes maior do que a largura de banda da FBG sensora e exerce a função de um filtro sintonizável auto-referenciado.

A Figura 3-15 mostra o diagrama representativo do circuito de interrogação. O espectro de reflexão da FBG sensora do circuito de sensoriamento é transmitido à FBG interrogadora que funciona como um filtro sintonizável auto-referenciado. O espectro de transmissão da FBG interrogadora é deslocado gradualmente através da variação da temperatura até que o espectro de reflexão da FBG sensora se sintonize à região linear. Além disso, é gerado um sinal de controle que produz uma vibração mecânica na FBG interrogadora em baixa frequência. A vibração modula seu espectro de transmissão com frequência tipicamente em torno de 800 Hz. Em seguida, o sinal óptico é convertido em um sinal elétrico pelo fotodetector. Esse sinal é, então, digitalizado por uma placa de aquisição e transmitido para um computador. No computador são executadas rotinas em software de controle e análise de dados.



Figura 3-15: Diagrama representativo do circuito de interrogação.

Assim como a FBG sensora, a FBG interrogadora está sujeita a vibrações de um PZT e à variação da temperatura de uma junção peltier, como mostrado na Figura 3-3. Um gerador de sinal gera um sinal de controle, que tem a forma de uma função senoidal de frequência tipicamente em torno de 800 Hz, o qual é transmitido para o PZT. Dessa forma, o PZT modula o espectro de transmissão da FBG interrogadora com frequência de 800 Hz. A partir da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG

interrogadora é possível determinar se o espectro de reflexão da FBG sensora está ou não na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. No caso de o espectro de reflexão da FBG sensora não estar na região linear é calculado o deslocamento que o espectro de transmissão da FBG interrogadora deve realizar para que o espectro de reflexão da FBG sensora volte a operar na região linear. O valor do deslocamento é obtido através da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG interrogadora vibrando em baixa frequência. O espectro de transmissão da FBG interrogadora é deslocado pela variação da temperatura da junção peltier na interrogação, a qual é controlada pela corrente elétrica aplicada sobre ela.

Os componentes do circuito de interrogação são caracterizados nos tópicos seguintes. O circuito de interrogação contém uma FBG interrogadora, um fotodetector, uma placa de aquisição e um computador. Além disso, são caracterizadas a junção peltier e a cerâmica piezoelétrica.

3.2.1. FBG interrogadora

A FBG interrogadora é o principal elemento óptico para interrogação da FBG sensora, a qual está sujeita a vibrações e à variação de temperatura. As especificações técnicas e a função de transferência da FBG interrogadora são apresentadas na Tabela 3-5 e na Figura 3-16, respectivamente.

Tabela 3-5: Especificações técnicas da FBG interrogadora.

Modelo	OEFBG-100
Largura de Banda	2,6 nm
Comprimento de Onda Central	1551,4 nm
Tipo de Fibra	SMF - 28
Revestimento	Acrilato
Refletividade	100%

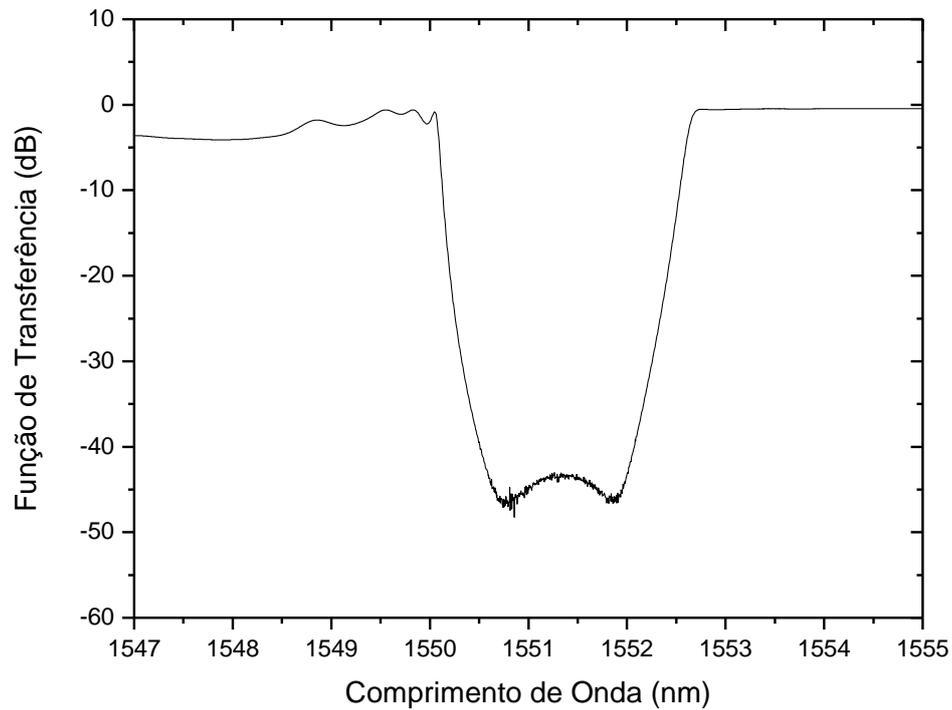


Figura 3-16: Função de transferência da FBG interrogadora.

3.2.2. Fotodetector

O fotodetector é um transdutor óptico que fornece em sua saída um sinal elétrico em resposta à radiação óptica incidente. A Figura 3-17 mostra a imagem do dispositivo.



Figura 3-17: Fotodetector InGaAs PDA10CS.

As especificações técnicas do fotodetector são mostradas na Tabela 3-6. Esse fotodetector possui 8 posições rotativas que permitem variar o ganho do sinal de saída em um passo de 10 dB na faixa de 0 à 70 dB.

Tabela 3-6: Especificações técnicas do fotodetector InGaAs PDA10CS.

Modelo	PDA10CS
Tipo de Detector	InGaAs PIN
Faixa de Comprimento de Onda de Operação	700 – 1800 nm
Impedância de Saída	50 Ω
Máxima Corrente Elétrica de Saída	100 mA
Tipo de Conexão de Saída	BNC
Faixa de Ajuste de Ganho	0 – 70 dB
Interruptor Rotativo de Ganho	8 posições
Temperatura Operacional	-55 ~ 125 °C
Temperatura de Armazenamento	-40 ~ 85 °C
Umidade	0 ~ 85 %

3.2.3. Placa de aquisição

A placa de aquisição tem a função de digitalizar o sinal de entrada, transmitindo-o para um computador. A Figura 3-18 mostra a imagem da placa de aquisição NI USB-6210.



Figura 3-18: Placa de aquisição NI USB-6210.

A Tabela 3-7 apresenta as especificações técnicas da placa de aquisição. A saída do fotodetector é conectada às portas de entrada analógica da placa de aquisição. Em seguida o sinal é digitalizado e transmitido para o computador via porta USB.

Tabela 3-7: Especificações técnicas da placa de aquisição NI USB-6210.

Modelo	NI USB-6210
Número de Entradas Analógicas	16
Resolução CAD	16 bits
Taxa de Amostragem	250 kS/s
Número de Entradas Digitais	4
Número de Saídas Digitais	4
Temperatura Operacional	0 ~ 45 °C
Temperatura de Armazenamento	-20 ~ 70 °C
Umidade	10 ~ 90 %

3.2.4. Junção peltier na interrogação

A imagem e as especificações técnicas da junção peltier são mostradas na Figura 3-11 e na Tabela 3-4, respectivamente, do item 3.1.4. Análoga à junção peltier no sensoriamento, a junção peltier na interrogação tem a função de controlar a temperatura sobre a FBG interrogadora. A Figura 3-19 mostra a temperatura da junção peltier usada na interrogação em função da corrente elétrica aplicada.

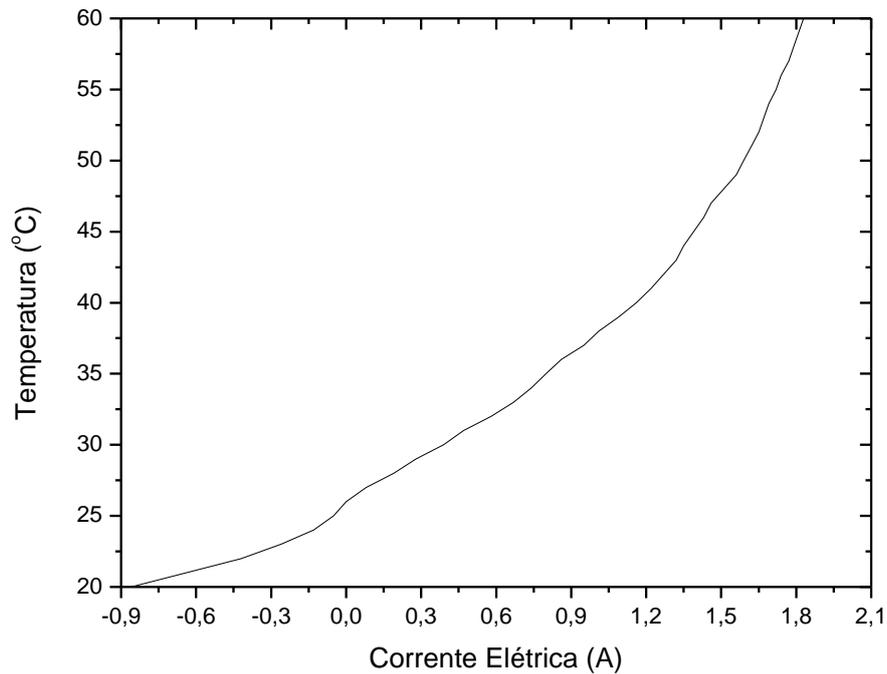


Figura 3-19: Temperatura da junção peltier usada na interrogação em função da corrente elétrica aplicada.

A Figura 3-20 apresenta de forma representativa o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora devido à variação da temperatura da junção peltier no sensoriamento e o deslocamento do espectro de transmissão da FBG interrogadora devido à variação da temperatura da junção peltier na interrogação. Quando a temperatura aumenta, os espectros de ambas FBGs sensora e interrogadora deslocam para maiores valores de comprimento de onda. Quando a temperatura diminui, os espectros deslocam para menores valores de comprimento de onda.

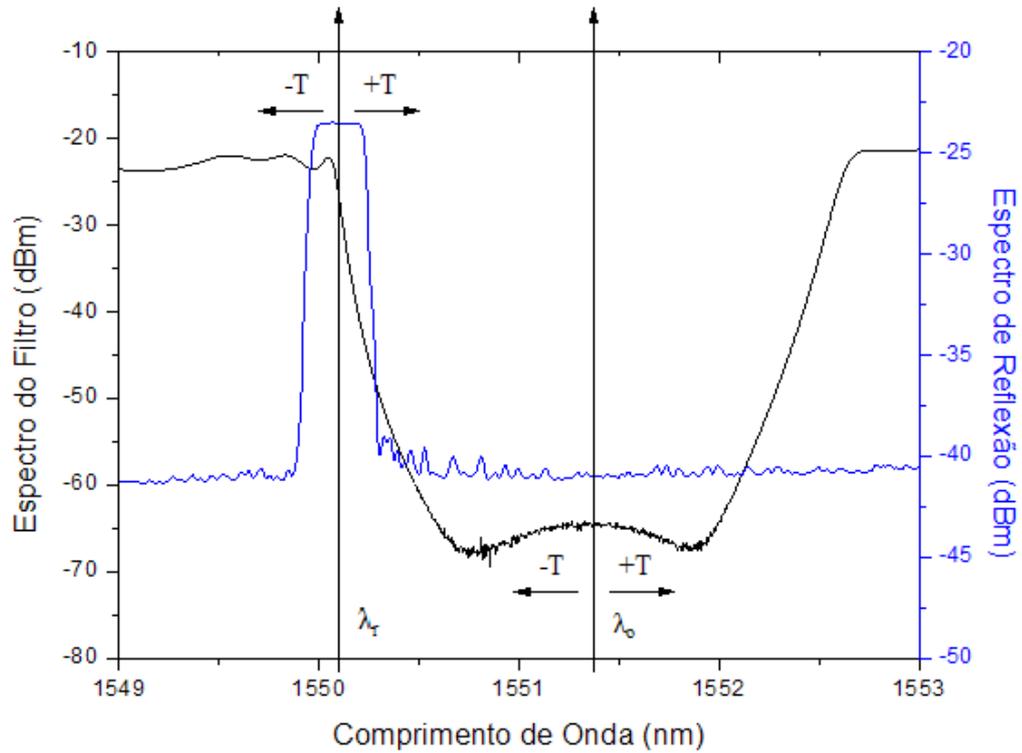


Figura 3-20: Deslocamento do espectro de ambas FBG sensora e interrogadora devido à temperatura.

3.2.5. Cerâmica piezoelétrica na interrogação

O funcionamento da cerâmica piezoelétrica de titanato zirconato de chumbo (PZT) usada na interrogação é análogo à apresentada no item 3.1.5. A Figura 3-21 mostra o PZT usado no circuito de interrogação.

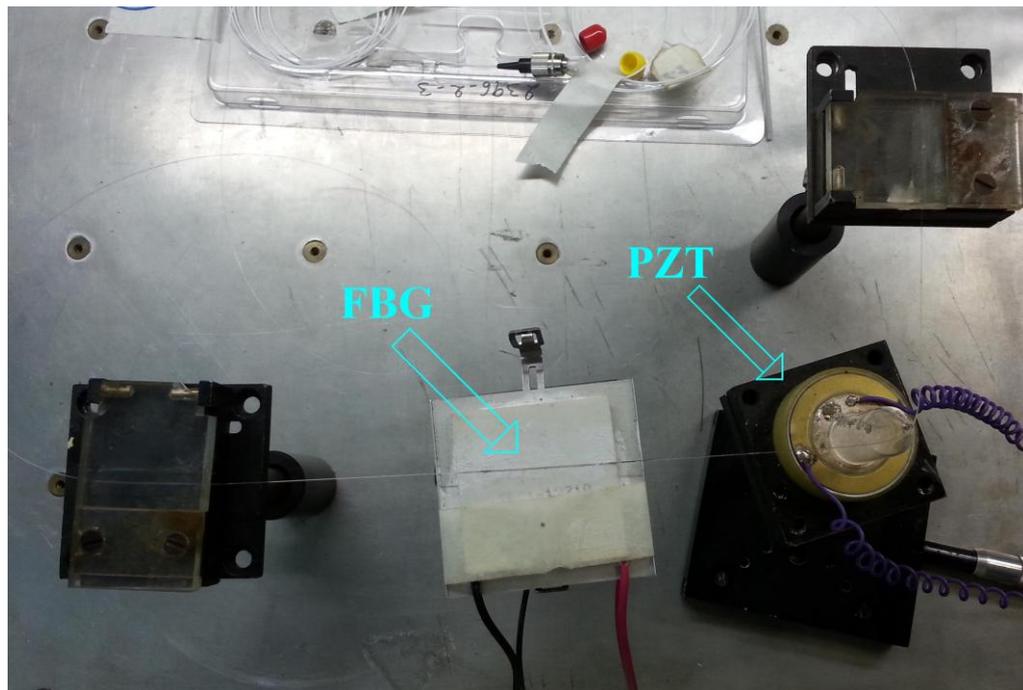


Figura 3-21: PZT usado no circuito de interrogação.

Na interrogação, o PZT vibra a FBG interrogadora através de um sinal de controle cuja forma de onda é senoidal e a frequência é tipicamente de 800 Hz. Dessa forma, o PZT modula o espectro de transmissão da FBG interrogadora em baixa frequência.

3.2.6. Computador

No computador são executadas as rotinas em software de controle e de análise do sinal digitalizado pela placa de aquisição. O software utilizado foi o LabVIEW, no qual são executadas três rotinas: a rotina para a medição da linearidade [APÊNDICE B], a rotina para o controle da corrente da junção peltier [APÊNDICE C] e a rotina de medição. A Figura 3-22 apresenta o circuito de interrogação mostrando as rotinas em software executadas no computador.

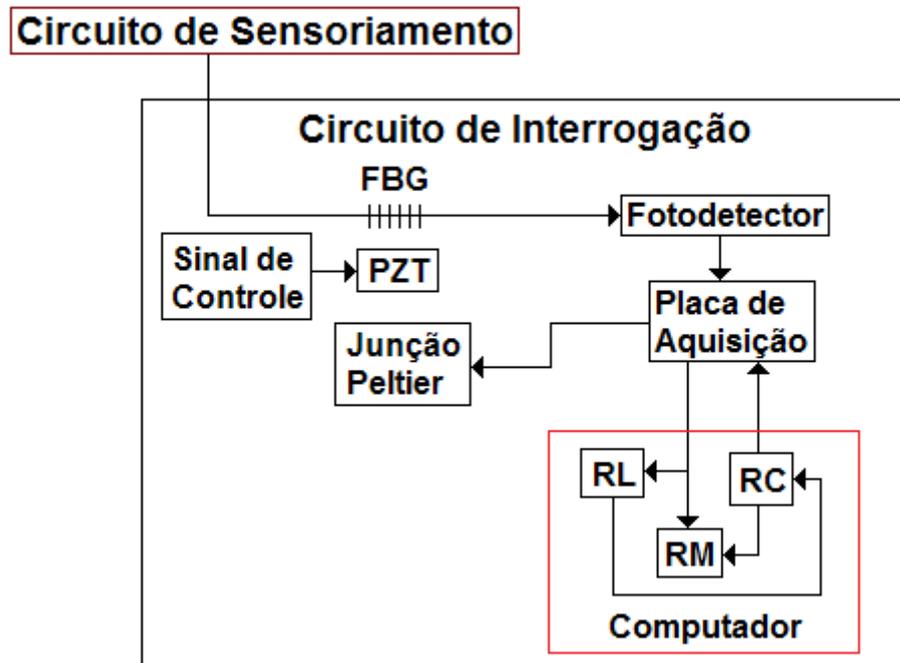


Figura 3-22: Diagrama completo do circuito de interrogação, contendo a rotina para a medição da linearidade (RL), a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) e a rotina de medição (RM).

A rotina para medição de linearidade (RL) recebe o sinal elétrico digitalizado da placa de aquisição e extrai a informação referente à vibração em baixa frequência, tipicamente em torno de 800 Hz, a qual representa o sinal de controle resultante da vibração da FBG interrogadora. Em seguida, a rotina RL calcula a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico comparando-a com um valor limiar pré-estabelecido [APÊNDICE A]. Quando a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico está acima do valor limiar, o sistema está operando na região linear e a rotina RL entra em fase de medição. No

caso de a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico estar abaixo do valor limiar, o sistema não está operando na região linear e a rotina RL entra em fase de sintonia. Na fase de sintonia, a rotina RL transmite o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico para a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC). A rotina RC calcula o valor da corrente elétrica que deve ser aplicada na junção peltier na interrogação para deslocar o espectro de transmissão da FBG interrogadora, a partir da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico recebida. A corrente elétrica é transmitida da rotina RC para a placa de aquisição e desta para o circuito de controle da corrente elétrica sobre a junção peltier. A variação da corrente elétrica produz uma variação na temperatura da junção peltier na qual a FBG interrogadora é encostada deslocando seu espectro de transmissão. A rotina RL transmite o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico para a rotina RC até que essa relação fique acima do valor limiar. Quando essa relação está acima do valor limiar o sistema entra em fase de medição. Nesse caso, a rotina RL transmite o valor da corrente elétrica para a rotina de medição (RM). A rotina RM calcula a temperatura sobre a FBG sensora a partir do valor da corrente elétrica recebida. Além disso, a rotina RM recebe o sinal digitalizado da placa de aquisição e extrai a informação referente às vibrações da FBG sensora.

3.3. Modelagem matemática da técnica de interrogação

O circuito de interrogação consiste de uma FBG interrogadora funcionando como filtro sintonizável sujeita a vibrações e à variação de temperatura. A temperatura desloca o espectro de transmissão da FBG interrogadora em relação ao espectro de reflexão de uma FBG funcionando como sensor. A equação (8) apresenta o espectro de potência na saída do filtro quando o espectro de reflexão da FBG sensora, dado por $S(\omega)$, representado na Figura 3-10, é transmitido para a FBG interrogadora, cuja função de transferência é dada por $I(\omega)$, representado na Figura 3-16.

$$T(\omega) = S(\omega) * I(\omega) \quad (8)$$

A Figura 3-23 mostra o resultado da convolução dado na equação (8). O eixo horizontal do gráfico corresponde ao comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em relação ao comprimento de onda da função de transferência da FBG interrogadora.

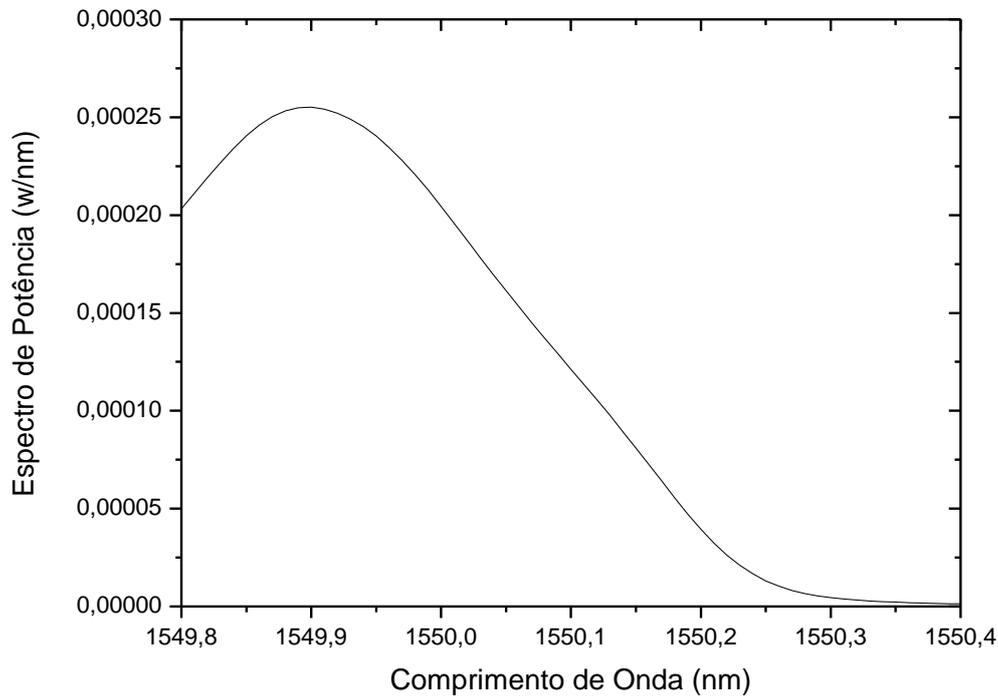


Figura 3-23: Resultado da convolução entre o espectro de reflexão da FBG sensora e o espectro de transmissão da FBG interrogadora.

O ponto máximo do gráfico da Figura 3-23, que representa a máxima potência óptica na saída da FBG interrogadora, ocorre quando o espectro de reflexão da FBG sensora está sintonizado ao comprimento de onda de 1549,9 nm do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

A FBG interrogadora é sujeita a vibrações de um PZT. Com isso, seu espectro de transmissão é deslocado em função da deformação provocada pelo PZT, conforme a equação (9). Nela, λ_s representa o deslocamento do espectro de transmissão da FBG interrogadora em relação ao comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora, dado por λ_r . A variável $\lambda_o(d)$ representa a resposta da FBG interrogadora à deformação mecânica d , enquanto g é a forma de onda de vibrações do PZT sobre a FBG interrogadora, que corresponde ao sinal de controle da Figura 3-22 do item 3.2.6.

$$\lambda_s = \lambda_o + g \lambda_r \quad (9)$$

A Figura 3-24 apresenta a variação do espectro de potência na saída da FBG interrogadora em função das vibrações. Quando a FBG interrogadora é esticada pelo PZT, seu espectro se desloca para maiores valores de comprimento de onda ($+\Delta\lambda_o$), reduzindo o valor

de $\lambda_s(t)$, por outro lado, quando ela é contraída pelo PZT, seu espectro se desloca para menores valores de comprimento de onda ($-\Delta\lambda_o$), aumentando o valor de $\lambda_s(t)$.

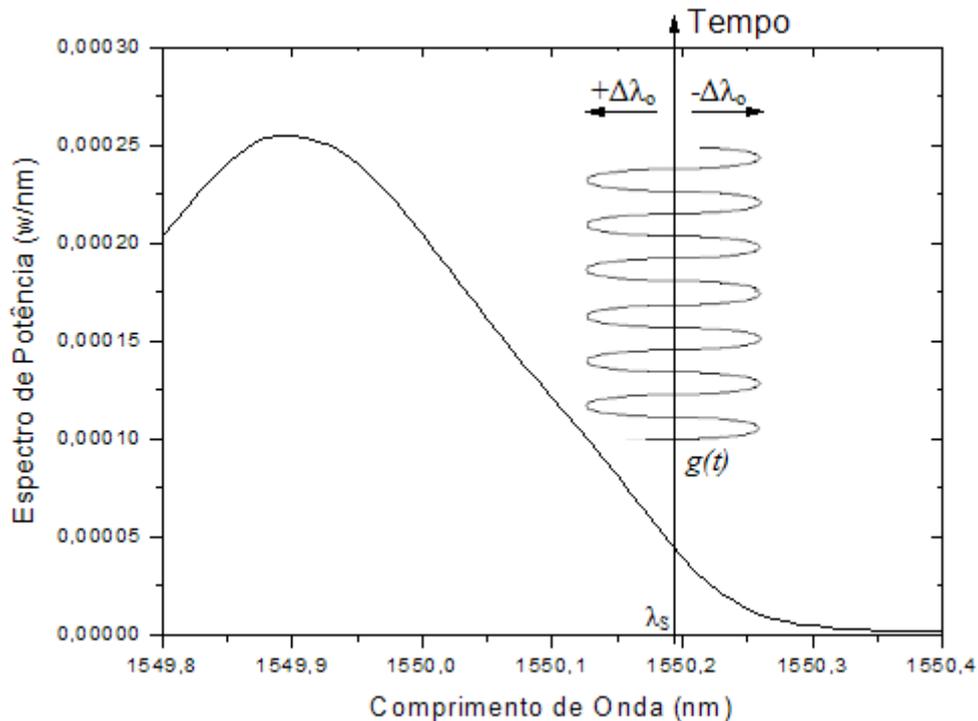


Figura 3-24: Variação do espectro de potência na saída da FBG interrogadora em função das vibrações.

A equação (10) mostra a variação da potência óptica no tempo quando a FBG interrogadora é sujeita a vibrações, que corresponde ao sinal de entrada do fotodetector da Figura 3-22 do item 3.2.6.

$$q(t) = T(\lambda_s(t)) \quad (10)$$

Considerando $v(t)$ a tensão elétrica resultante da potência óptica $q(t)$, no domínio do tempo, a equação (11) apresenta a função, no domínio da frequência, do sinal correspondente às vibrações, que representa o sinal elétrico na saída do fotodetector resultante das vibrações da FBG interrogadora. Nela, F representa a transformada de Fourier.

$$V(\omega) = F\{q(t)\} \quad (11)$$

Tendo ω_1 e ω_2 as frequências correspondentes ao primeiro e ao segundo harmônico, respectivamente, a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico é dada na equação (12).

$$R = \frac{V(\omega_1)}{V(\omega_2)} \quad (12)$$

Visto que a potência de ambos harmônicos é proporcional à potência de entrada da FBG interrogadora, a relação entre a potência desses harmônicos independe da potência de entrada, configurando um mecanismo auto-referenciável. Esse trabalho propõe a criação de uma técnica de interrogação de uma FBG sensora, sujeita a vibrações e à variação da temperatura, a partir do valor dessa relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico de uma FBG interrogadora vibrando em baixa frequência. Através do valor dessa relação, é possível definir se a FBG sensora está operando na região linear, podendo, dessa forma, obter as vibrações às quais ela está sujeita. Além disso, o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico funciona como parâmetro para definir a distância em que o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora se situa em relação ao comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, quando a FBG sensora não está operando na região linear. A partir do valor dessa relação é possível obter a corrente elétrica que deve ser aplicada à junção peltier usada na interrogação de forma a deslocar o espectro de transmissão da FBG interrogadora, através da variação da temperatura à qual ela está sujeita, até que a FBG sensora volte a operar na região linear.

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos dos circuitos de sensoriamento e interrogação. Em seguida é feita uma análise dos resultados obtidos das fases de sintonia e medição.

4.1. Deslocamento do espectro em função da temperatura

A variação da temperatura em ambas FBG sensora e interrogadora provoca um deslocamento em seus espectros. Enquanto a variação da temperatura da junção peltier no sensoriamento provoca um deslocamento no espectro de reflexão da FBG sensora, a variação da temperatura da junção peltier na interrogação provoca um deslocamento no espectro de transmissão da FBG interrogadora.

A Figura 4-1 mostra o espectro de reflexão da FBG sensora em três casos. No primeiro caso a temperatura sobre a FBG sensora aplicada pela junção peltier no sensoriamento é de 20 °C. No segundo e no terceiro caso, as temperaturas aplicadas são de 40 e 60 °C, respectivamente.

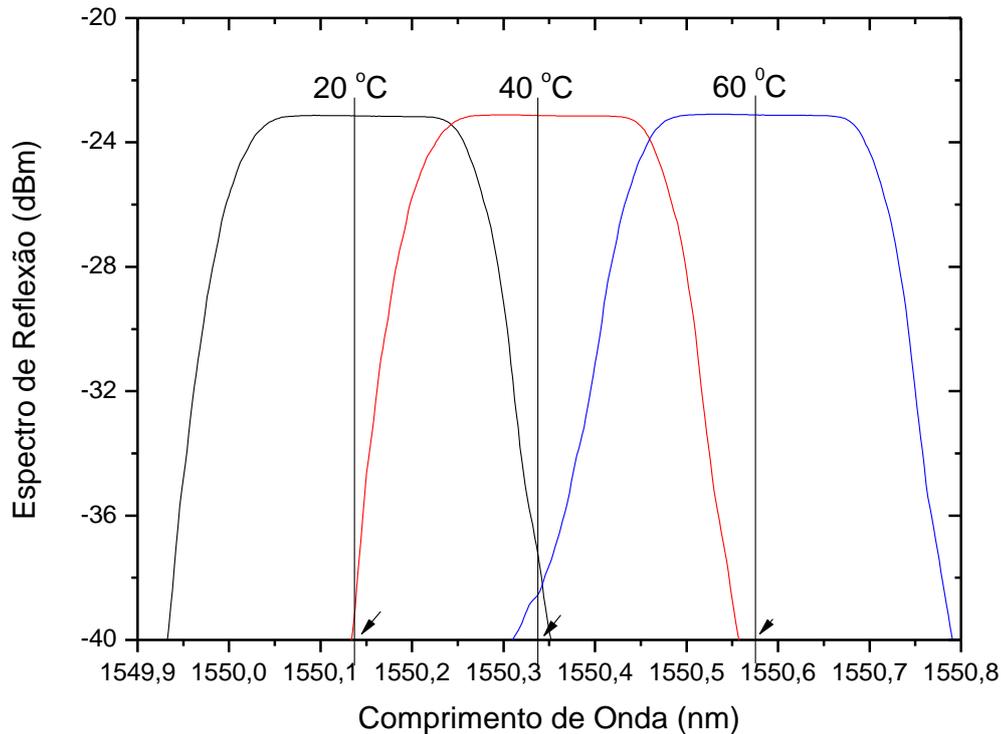


Figura 4-1: Espectro de reflexão da FBG sensora em três casos: quando a temperatura da junção peltier no sensoriamento é de 20, 40 e 60 °C.

Na Figura 4-1, as setas apontam para o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora para os três casos. O comprimento de onda de ressonância mede 1550,139; 1550,340 e 1550,575 nm para as temperaturas de 20, 40 e 60 °C, respectivamente. A Figura 4-2 apresenta o gráfico do comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em função da temperatura da junção peltier no sensoriamento. O gráfico da temperatura em função da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier no sensoriamento foi mostrado na Figura 3-12 do item 3.1.4.

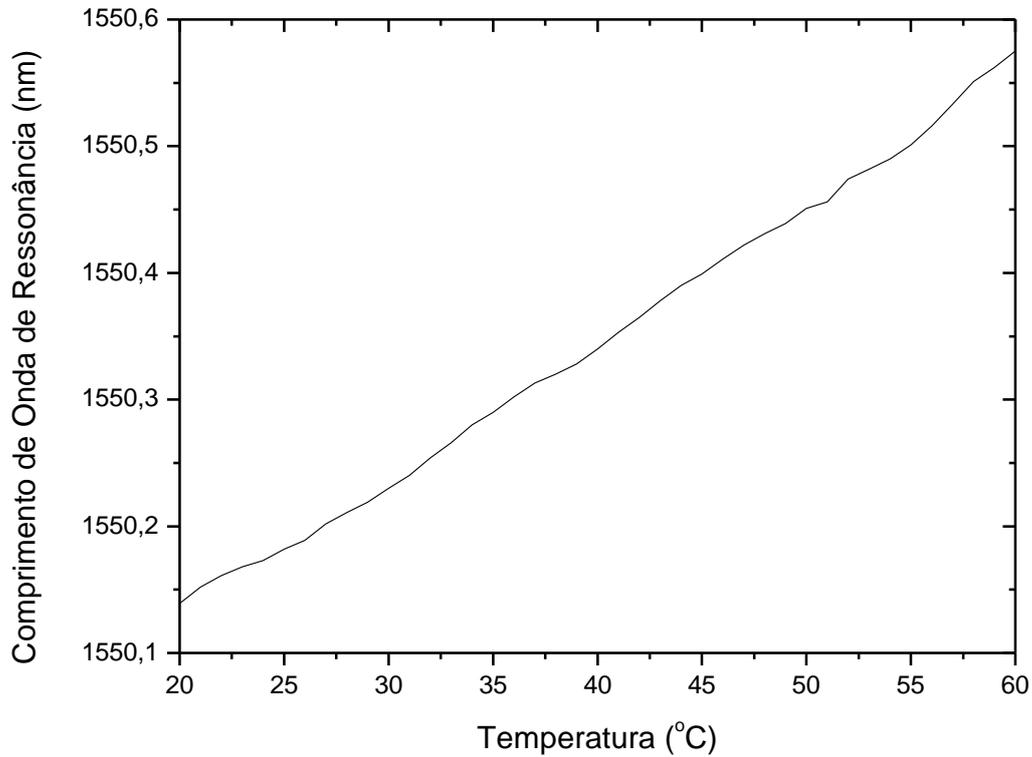


Figura 4-2: Comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em função da temperatura da junção peltier no sensoriamento.

A Figura 4-3 mostra o espectro de transmissão da FBG interrogadora identificando o comprimento de onda da região linear. Enquanto a posição do espectro da FBG sensora é apresentada através do seu comprimento de onda de ressonância como mostrado na Figura 4-2, a posição do espectro de transmissão da FBG interrogadora é apresentada através do comprimento de onda da região linear. O comprimento de onda da região linear se encontra a 0,161 nm de distância do comprimento de onda de pico que está em destaque na Figura 4-3.

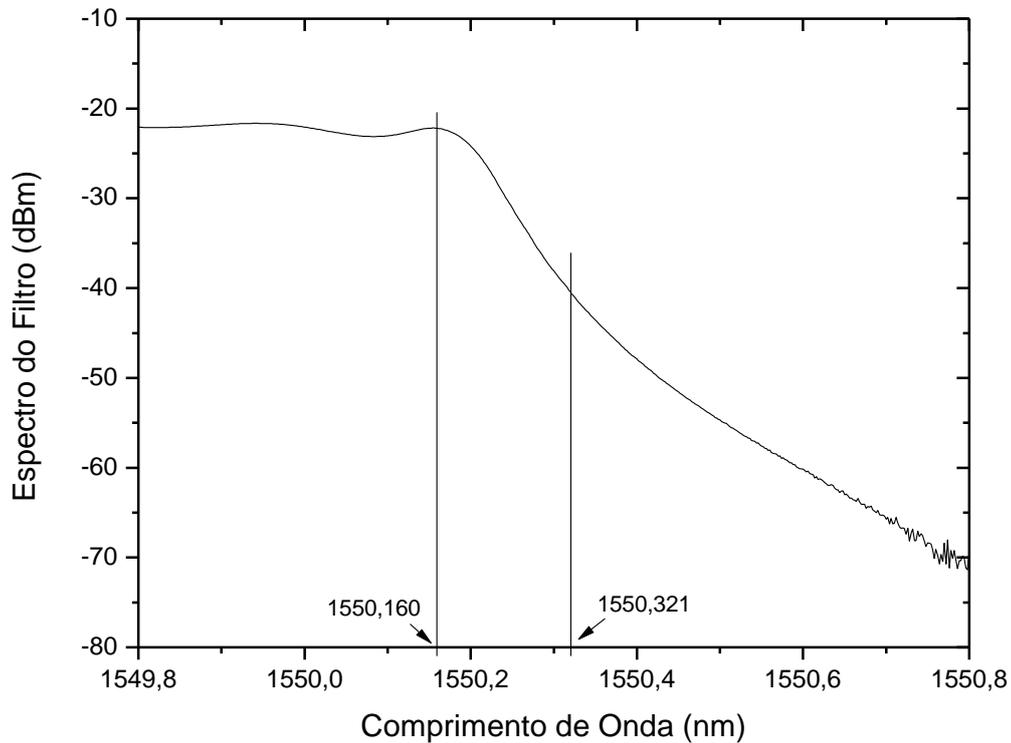


Figura 4-3: Espectro de transmissão da FBG interrogadora identificando o comprimento de onda de pico que mede 1550,160 nm e o comprimento de onda da região linear que mede 1550,321 nm.

A FBG interrogadora está sujeita à variação da temperatura de uma junção peltier na interrogação. A Figura 4-4 mostra o espectro de transmissão da FBG interrogadora em três casos. No primeiro caso a temperatura sobre a FBG interrogadora aplicada pela junção peltier na interrogação é de 20 °C. No segundo e no terceiro caso, as temperaturas aplicadas são de 40 e 60 °C, respectivamente. O comprimento de onda da região linear mede 1550,250; 1550,499 e 1550,747 nm para as temperaturas de 20, 40 e 60 °C, respectivamente. A Figura 4-5 apresenta o gráfico do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da temperatura da junção peltier na interrogação. O gráfico da temperatura em função da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação foi mostrado na Figura 3-19 do item 3.2.4.

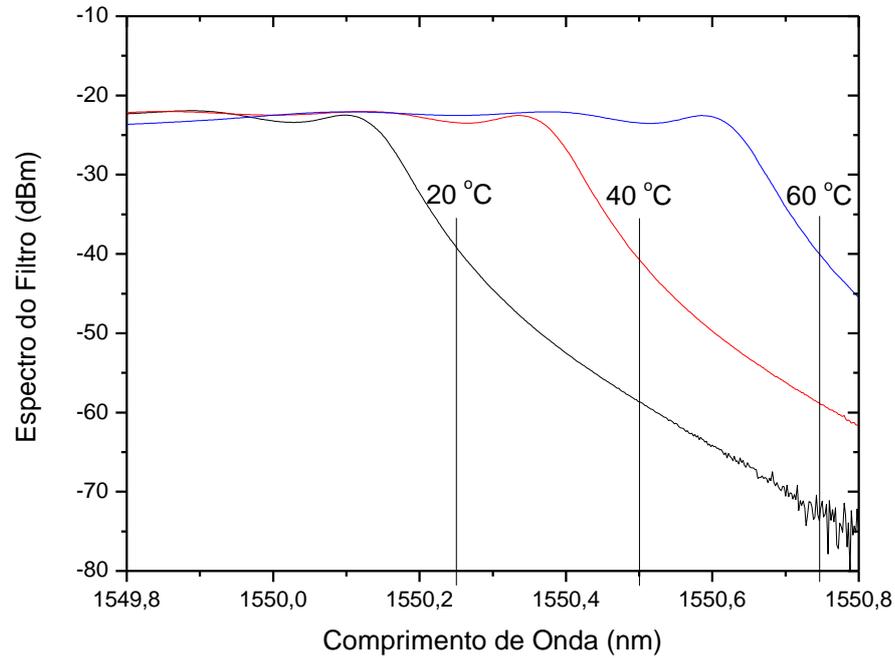


Figura 4-4: Espectro de transmissão da FBG interrogadora em três casos: quando a temperatura da junção peltier na interrogação é de 20, 40 e 60 °C.

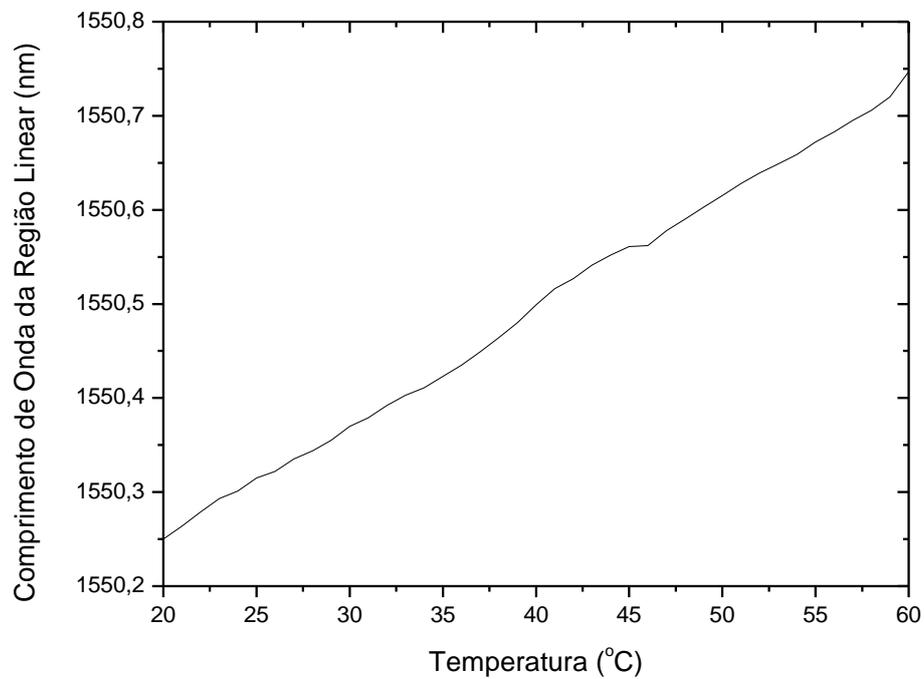


Figura 4-5: Comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da temperatura da junção peltier na interrogação.

4.2. Relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico

O espectro de reflexão da FBG sensora sujeita a vibrações e à variação da temperatura é transmitido para a FBG interrogadora no circuito de interrogação. A FBG interrogadora tem a função de sintonizar o espectro de reflexão da FBG sensora à região linear do seu espectro de transmissão. Dessa forma, o espectro de reflexão é demodulado gerando um sinal óptico na saída da FBG interrogadora que representa as vibrações às quais a FBG sensora está sujeita. Além disso, a temperatura da FBG sensora pode ser calculada através da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação.

As Figuras 4-6, 4-7 e 4-8 mostram o espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora em três casos: A, B e C, respectivamente. A densidade de potência em μW do espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora e do espectro de reflexão da FBG sensora é mostrada nos traçados de cor preta e azul, respectivamente. O traçado de cor vermelha mostra a função de transferência do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Assim, o traçado de cor preta, que é a densidade de potência do espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora, corresponde à densidade de potência do espectro de reflexão da FBG sensora (traçado de cor azul) transmitida para a FBG interrogadora, cuja função de transferência é dada no traçado de cor vermelha. Considere o comprimento de onda diferencial como a diferença entre o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora e o comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, isto é, o comprimento de onda diferencial mede a distância em nm entre o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em relação ao comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. O comprimento de onda diferencial é negativo quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à esquerda do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora e é positivo quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à direita do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Portanto, o comprimento de onda diferencial é uma medida da posição do espectro de reflexão da FBG sensora em relação ao espectro de transmissão da FBG interrogadora. O comprimento de onda diferencial mede -0,124; 0 e 0,143 nm nos casos A, B e C, respectivamente. A Figura 4-7 (caso B) apresenta o espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora quando o

espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. A Figura 4-9 mostra os casos A, B e C.

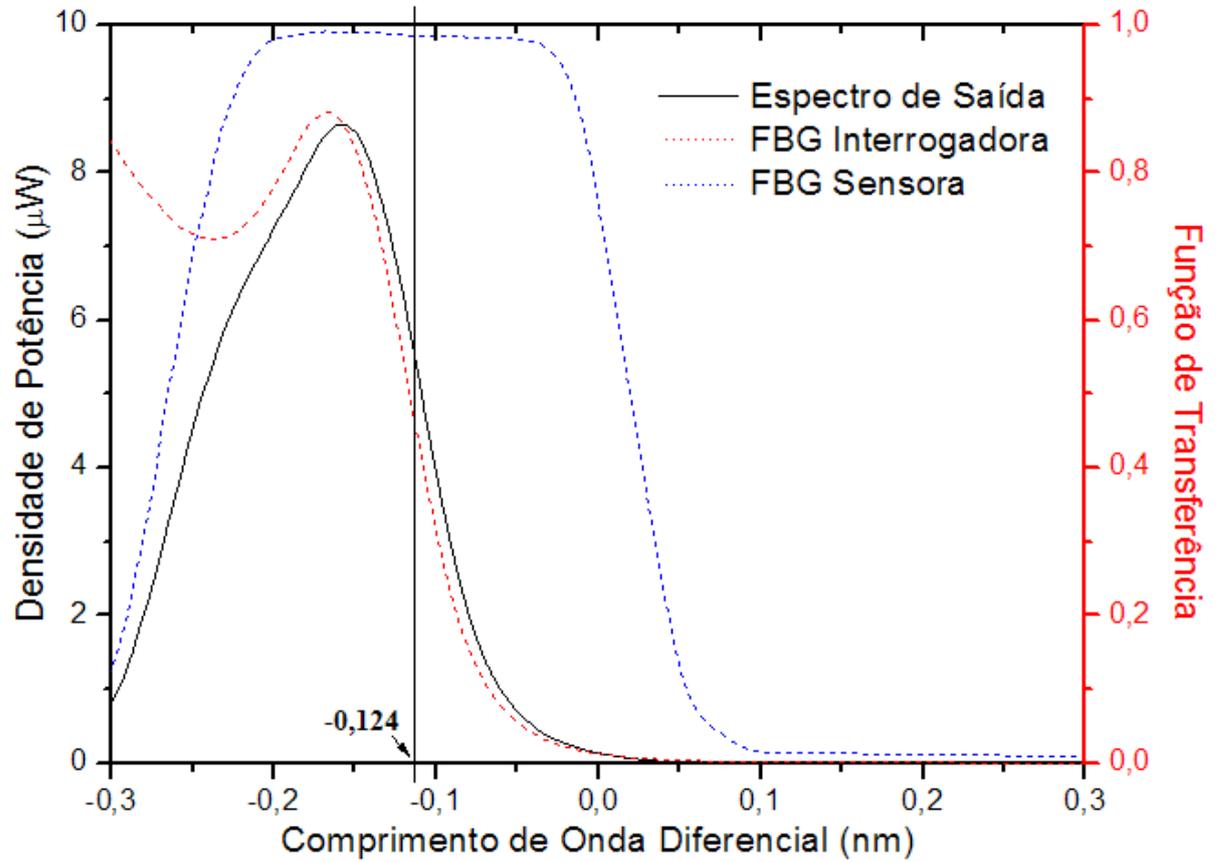


Figura 4-6: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso A, no qual o comprimento de onda diferencial mede -0,124 nm.

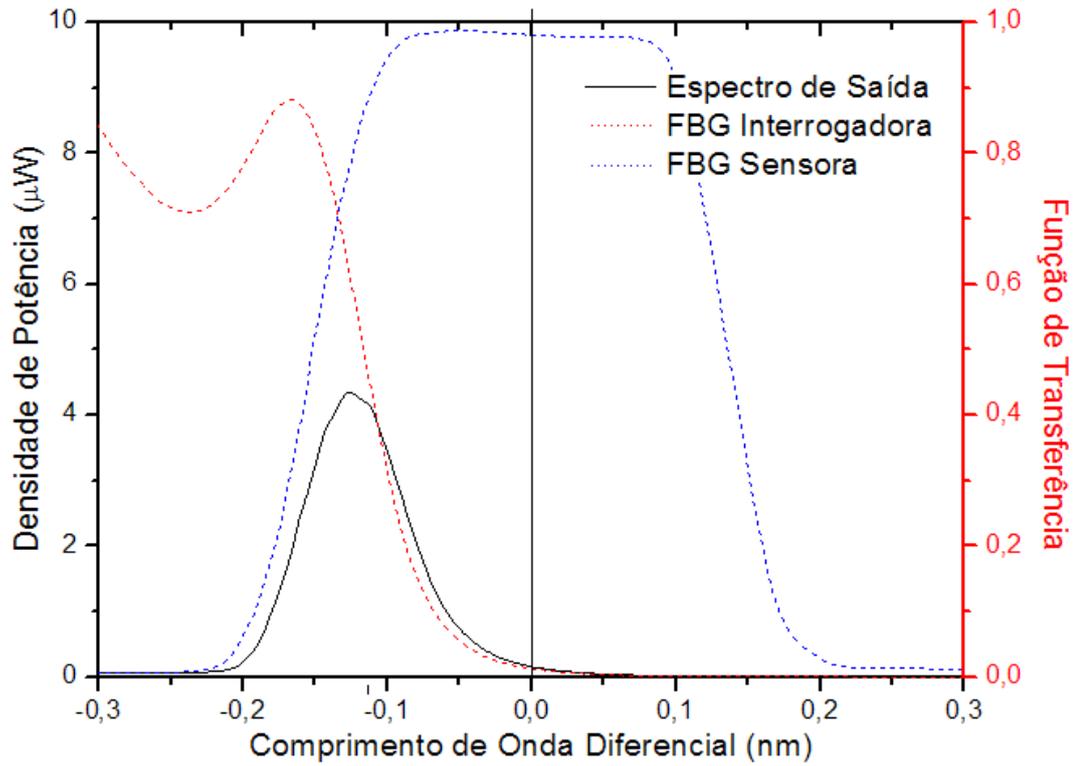


Figura 4-7: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso B, no qual o comprimento de onda diferencial mede 0 nm.

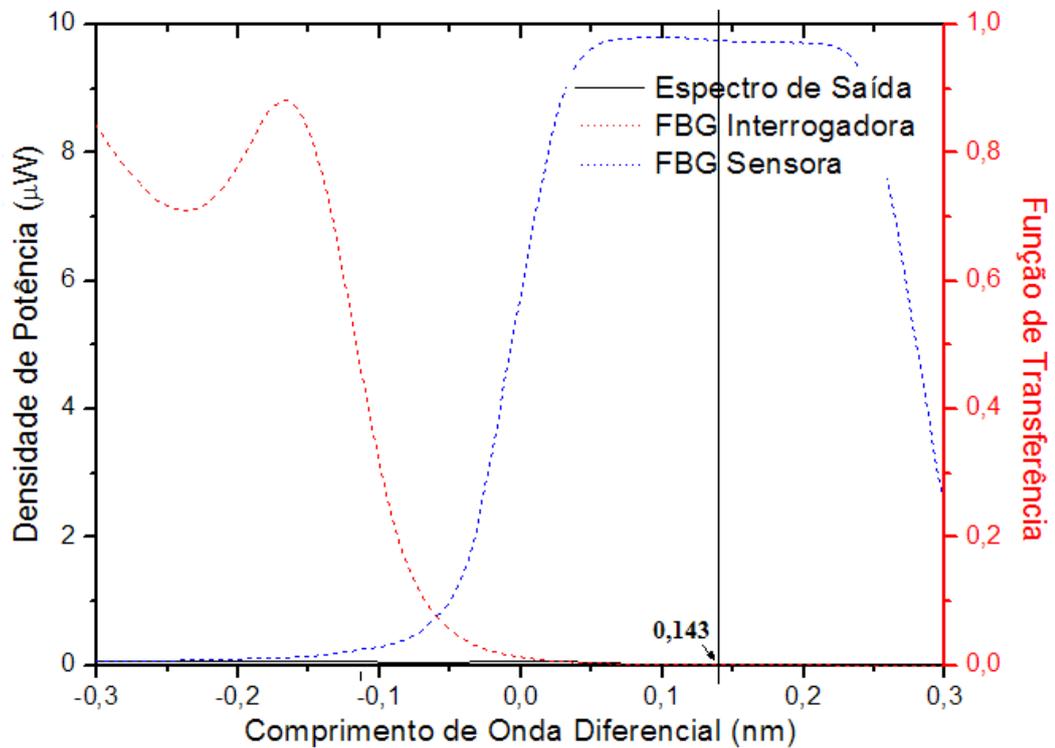


Figura 4-8: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora no caso C, no qual o comprimento de onda diferencial mede 0,143 nm.

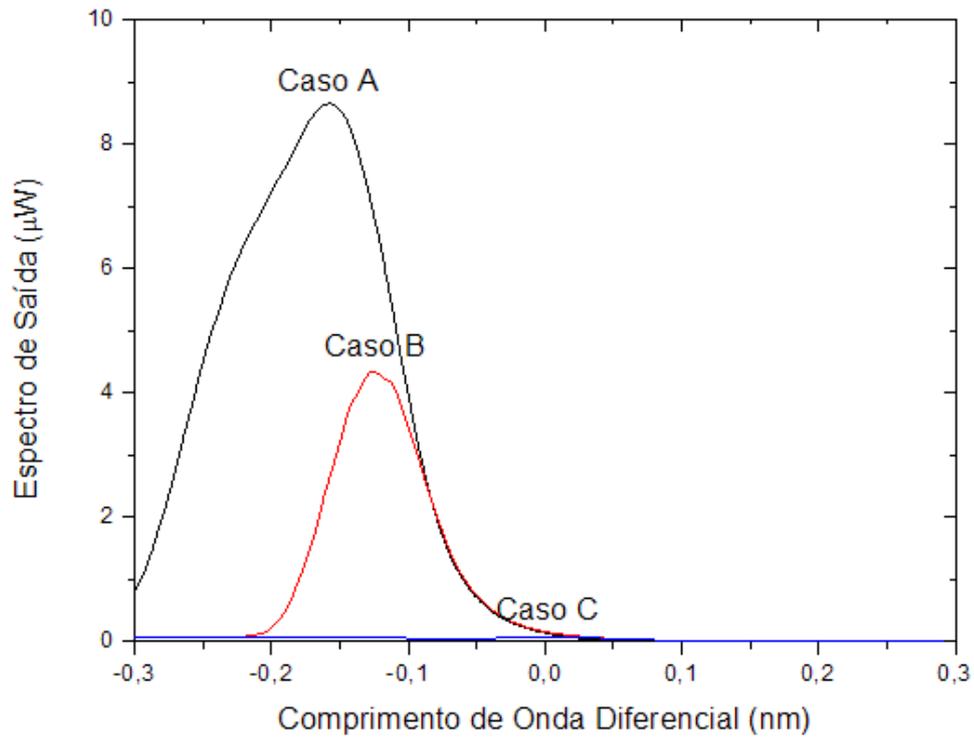


Figura 4-9: Espectro do sinal óptico na saída da FBG interrogadora nos três casos: A, B e C.

Um sinal de controle é transmitido para a FBG interrogadora a partir de um PZT na interrogação. O sinal de controle possui forma de onda senoidal com frequência de 800 Hz. A Figura 4-10 mostra o sinal de controle no domínio do tempo, que corresponde à variável g da equação (9) do item 3.3.

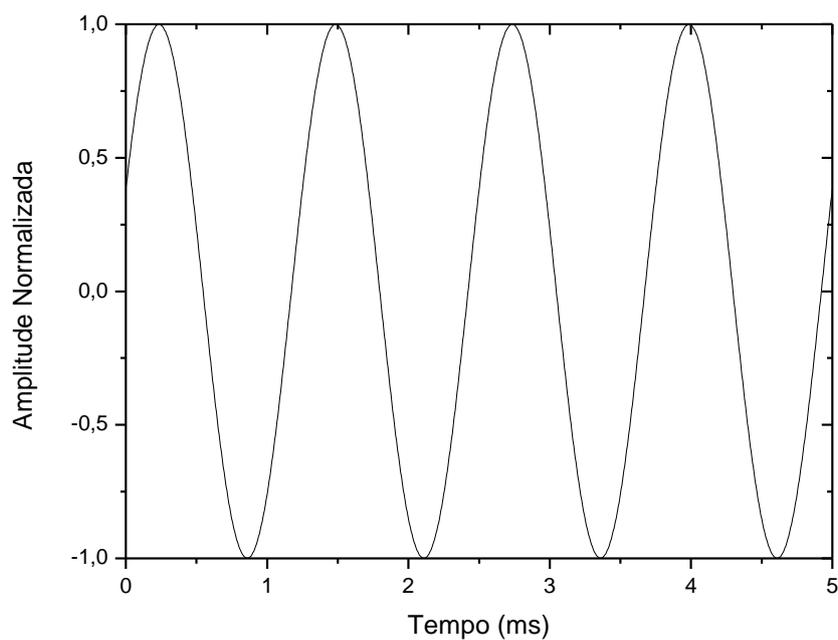


Figura 4-10: Sinal de controle no domínio do tempo.

O sinal de controle é gerado por um gerador de sinais e transmitido para o PZT na interrogação, no qual a FBG interrogadora é fixada. A vibração do PZT é transmitida para a FBG interrogadora modulando o seu espectro de transmissão, representado pela variável $\lambda_o(d)$ da equação (9) dada no item 3.3, ou seja, a vibração provoca o deslocamento no espectro de transmissão da FBG interrogadora para menores e para maiores valores de comprimento de onda com uma frequência de 800 Hz. Fixando-se o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora, a amplitude do sinal óptico na saída da FBG interrogadora aumenta conforme o espectro de transmissão da FBG interrogadora desloca para menores valores de comprimento de onda e diminui conforme ele desloca para maiores valores de comprimento de onda. Logo, o deslocamento para menores e para maiores valores de comprimento de onda do espectro de transmissão da FBG interrogadora produz uma variação no sinal óptico de saída, representado pela variável $q(t)$ da equação (10) dada no item 3.3, aumentando e diminuindo sua amplitude. Com isso, o sinal óptico possui a informação da demodulação do espectro de transmissão da FBG interrogadora, cuja forma de onda representa o sinal de controle gerado pelo gerador de sinais.

A saída do fotodetector apresenta o sinal elétrico, representado pela variável $v(t)$ do item 3.3, em resposta ao sinal óptico em sua entrada, o qual corresponde ao sinal óptico na saída da FBG interrogadora. Assim como o sinal óptico, esse sinal elétrico contém a informação da demodulação do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Portanto, quando o espectro de transmissão da FBG interrogadora é modulado segundo um sinal de controle com forma de onda senoidal e frequência de 800 Hz, o sinal elétrico na saída do fotodetector apresenta uma forma de onda senoidal com frequência de 800 Hz que representa o sinal de controle gerado pelo gerador de sinais.

A forma de onda senoidal na saída do fotodetector depende da posição do comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em relação ao comprimento de onda da região linear da FBG interrogadora, isto é, depende do valor do comprimento de onda diferencial. Considerando os casos A, B e C que foram mostrados nas Figuras 4-6, 4-7, 4-8 e 4-9, as Figuras 4-11 e 4-12 apresentam a forma de onda normalizada na saída do fotodetector no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, para o caso A, as Figuras 4-13 e 4-14 apresentam a forma de onda normalizada na saída do fotodetector no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, para o caso B e as Figuras 4-15 e 4-16 apresentam a forma de onda normalizada na saída do fotodetector no domínio do tempo e da frequência, respectivamente, para o caso C.

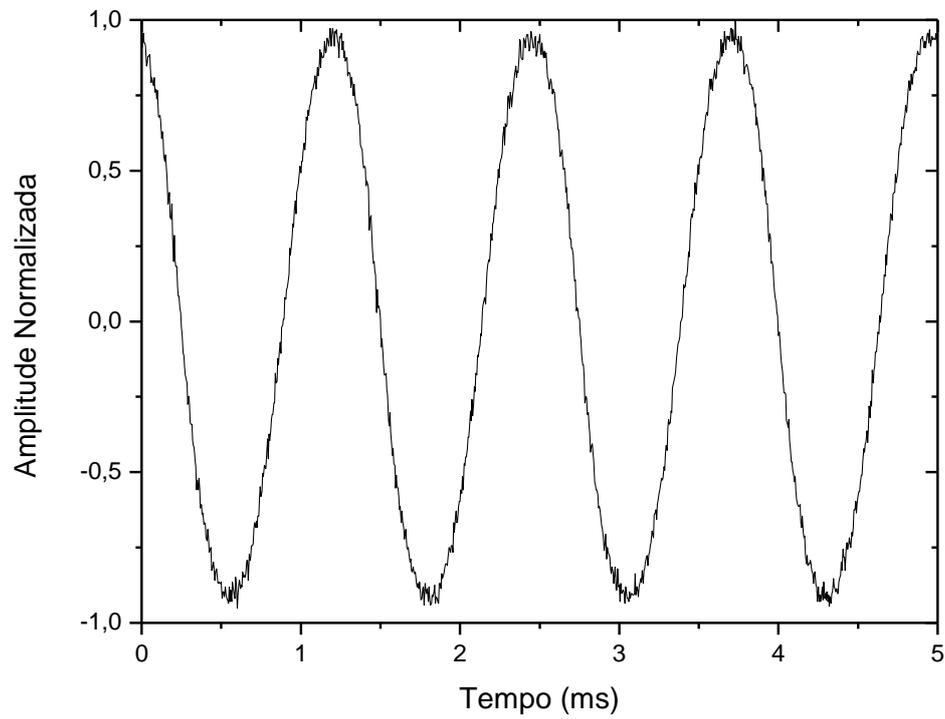


Figura 4-11: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso A.

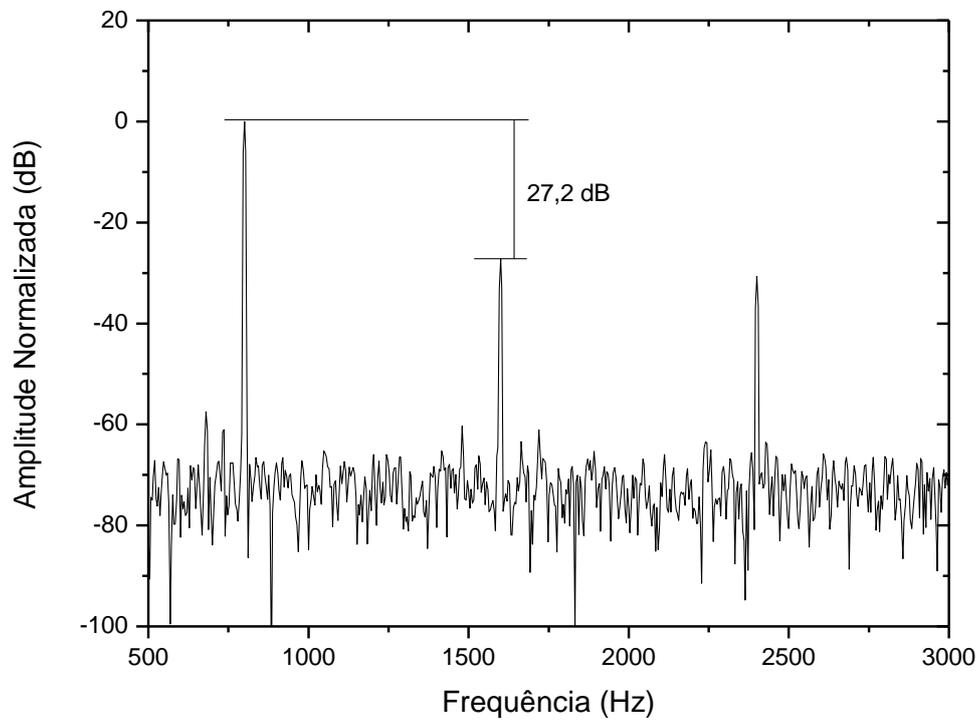


Figura 4-12: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso A.

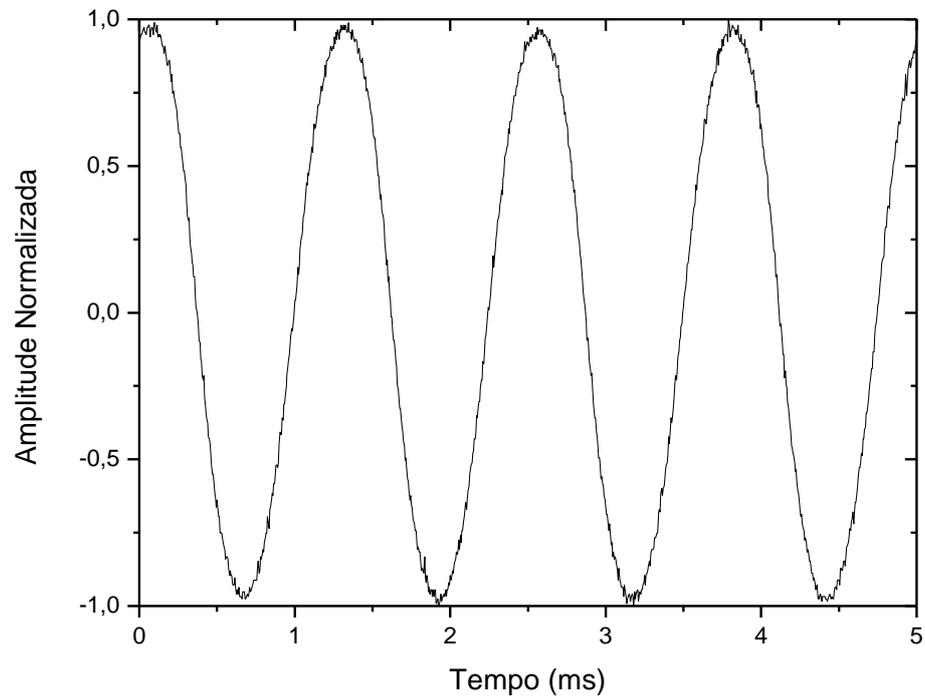


Figura 4-13: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso B.

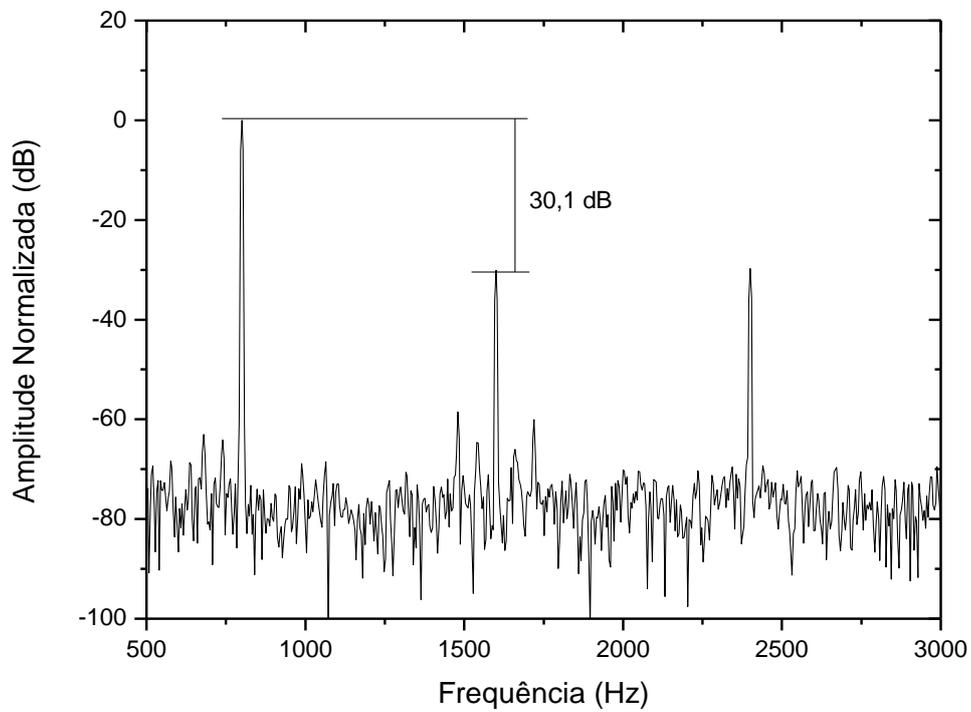


Figura 4-14: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso B.

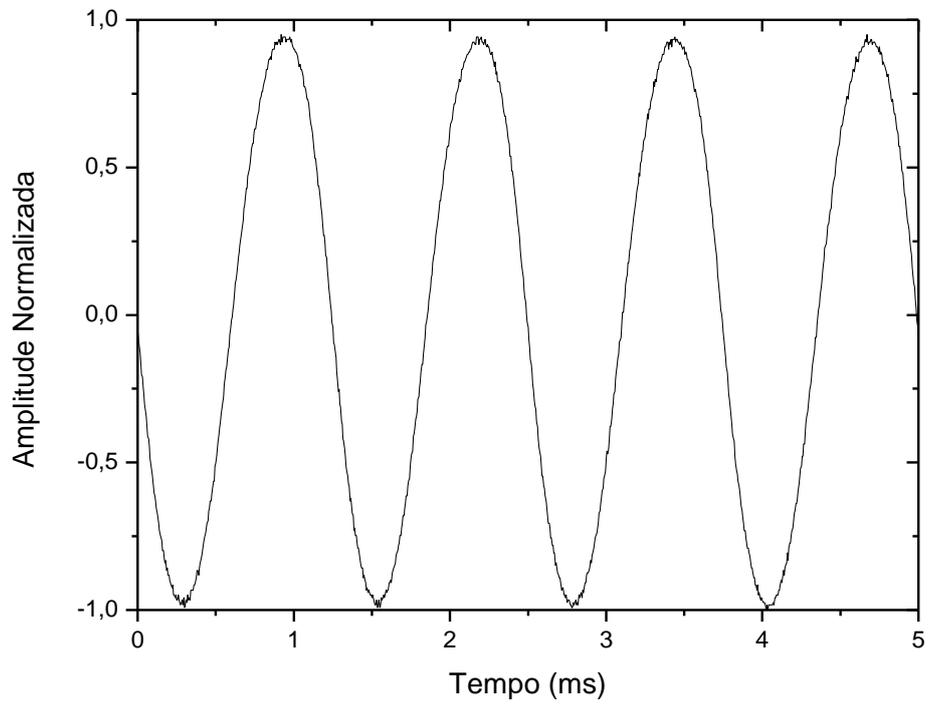


Figura 4-15: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio do tempo para o caso C.

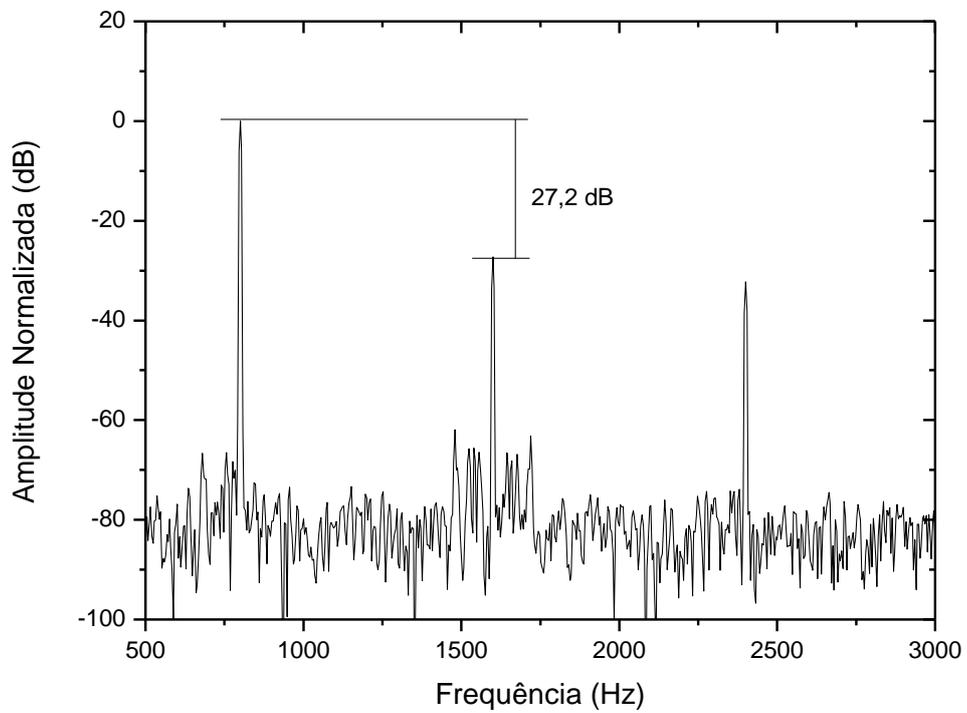


Figura 4-16: Forma de onda do sinal na saída do fotodetector no domínio da frequência para o caso C.

Nas Figuras 4-12, 4-14 e 4-16 são indicadas as relações entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, que corresponde ao parâmetro R da equação (12) do item 3.3, para cada caso. A maior relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico ocorre no caso B, no qual o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. A Figura 4-17 mostra o gráfico da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico em função do comprimento de onda diferencial. Foi feita a média entre dez amostras em cada ponto medido. Essa medição foi feita deslocando-se o espectro de transmissão da FBG interrogadora em relação ao espectro de reflexão da FBG sensora para cada ponto medido. O ganho do fotodetector foi fixado em 20 dB, resultando em um ganho de 20 dB no sinal elétrico na saída do fotodetector.

O gráfico apresentado na Figura 4-17 é o mais importante desse item. A partir dele comprova-se a existência de um ponto em que a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico é máxima. Esse ponto foi definido como comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Apesar de ter sido apresentado anteriormente na Figura 4-3, o comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora só foi definido após a construção do gráfico da Figura 4-17. O comprimento de onda diferencial é igual a zero quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora mede 1550,321 nm.

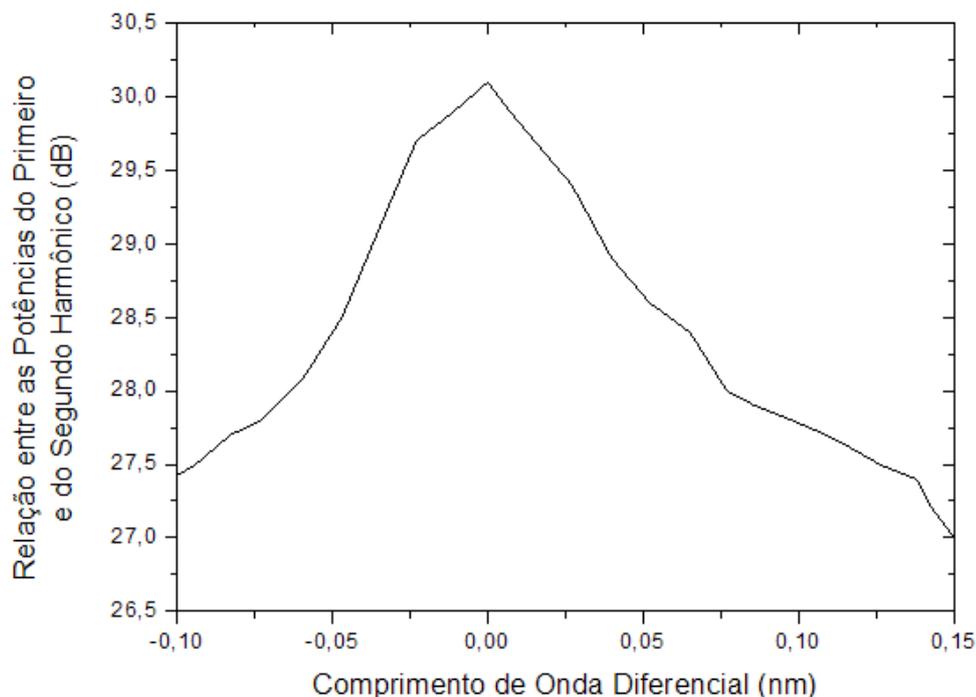


Figura 4-17: Relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico em função do comprimento de onda diferencial.

A Figura 4-18 mostra o pico do gráfico da Figura 4-17 com maior número de pontos. Além disso, foi feita a média entre vinte e cinco amostras em cada ponto medido.

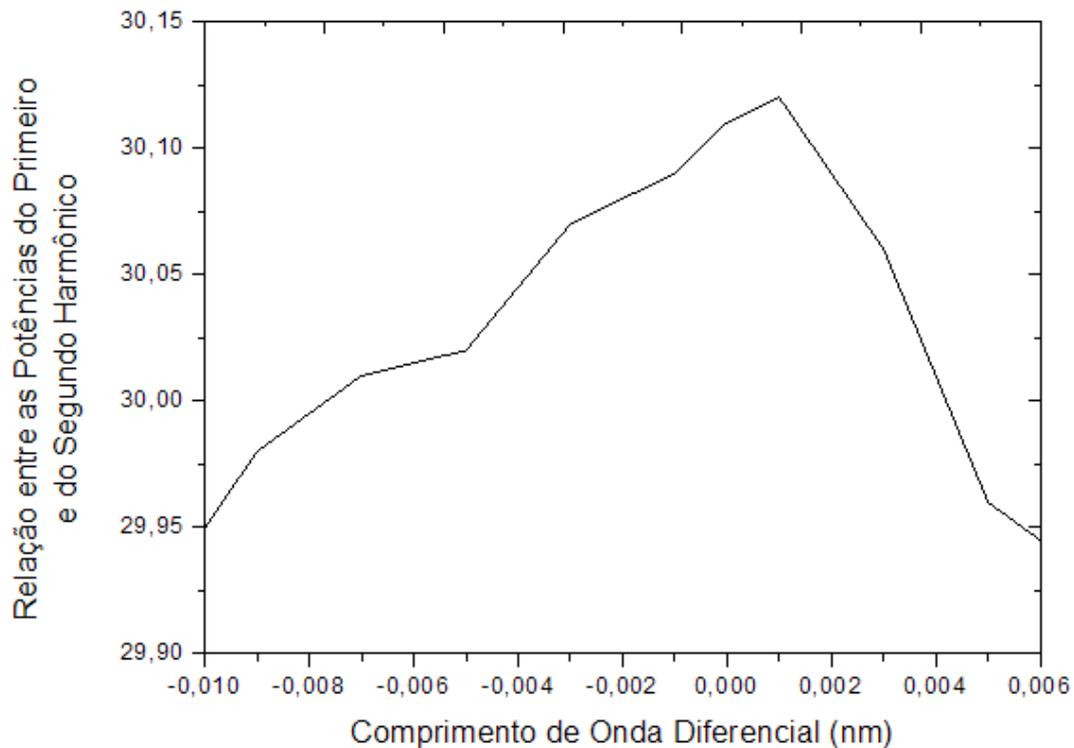


Figura 4-18: Pico do gráfico da Figura 4-17.

4.3. Análise dos resultados obtidos para a fase de sintonia

A partir da Figura 4-17, foi definido o valor de 30 dB como limiar para decisão se o sistema está operando na região linear ou não. A rotina RL executada em um computador, mostrada na Figura 3-22 do item 3.2.6, calcula a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal elétrico, digitalizado pela placa de aquisição, cuja forma de onda é senoidal e a frequência mede 800 Hz. Quando a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico desse sinal elétrico está abaixo de 30 dB, a rotina RL entra em fase de sintonia.

O objetivo da fase de sintonia é deslocar o espectro de transmissão da FBG interrogadora até que o espectro de reflexão da FBG sensora volte a operar na região linear, ou seja, até o comprimento de onda diferencial medir zero. Nesse caso, a rotina RL entra em fase de medição, na qual são medidas as vibrações e a variação de temperatura que a FBG sensora está sujeita. A Figura 4-19 apresenta o gráfico do comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico.

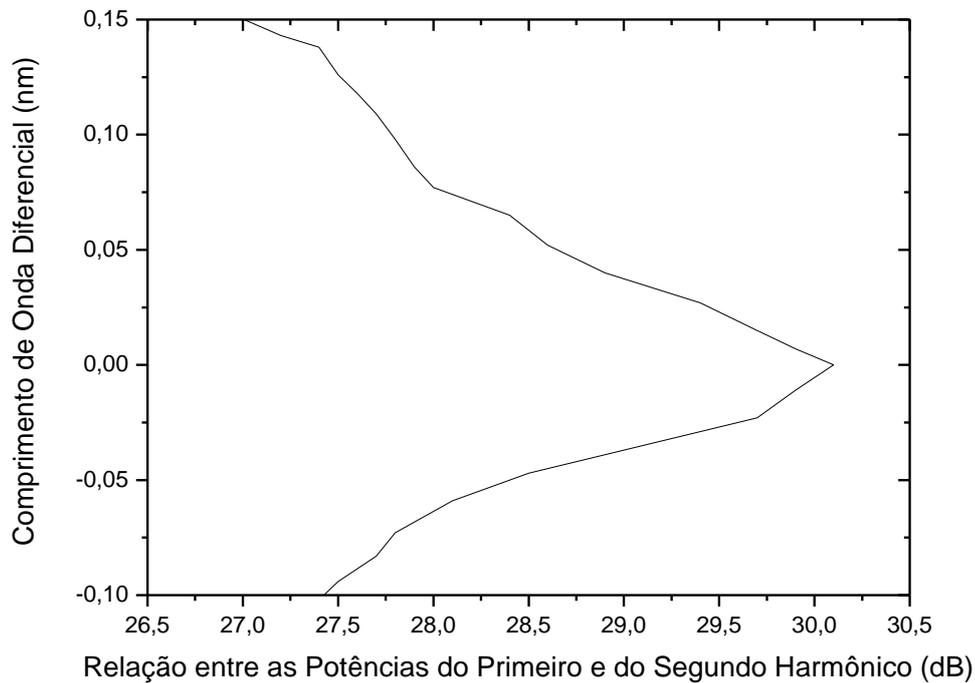


Figura 4-19: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico.

O gráfico da Figura 4-19 é dividido em dois gráficos mostrados nas Figuras 4-20 e 4-21. Quando o espectro de reflexão da FBG sensora está à esquerda do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, isto é, quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora é menor do que comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, o comprimento de onda diferencial é negativo. Por outro lado, quando o espectro de reflexão da FBG sensora está à direita do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, isto é, quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora é maior do que comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, o comprimento de onda diferencial é positivo. Dessa forma, a Figura 4-20 apresenta a parte do gráfico da Figura 4-19 em que o comprimento de onda diferencial é negativo ou igual à zero. Já a Figura 4-21 apresenta a parte do gráfico da Figura 4-19 em que o comprimento de onda diferencial é positivo ou igual à zero. Além disso, a variação do ganho do fotodetector ou a modificação de quaisquer conexões dos dispositivos não alteraram a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico. Logo, esse mecanismo é auto-referenciável.

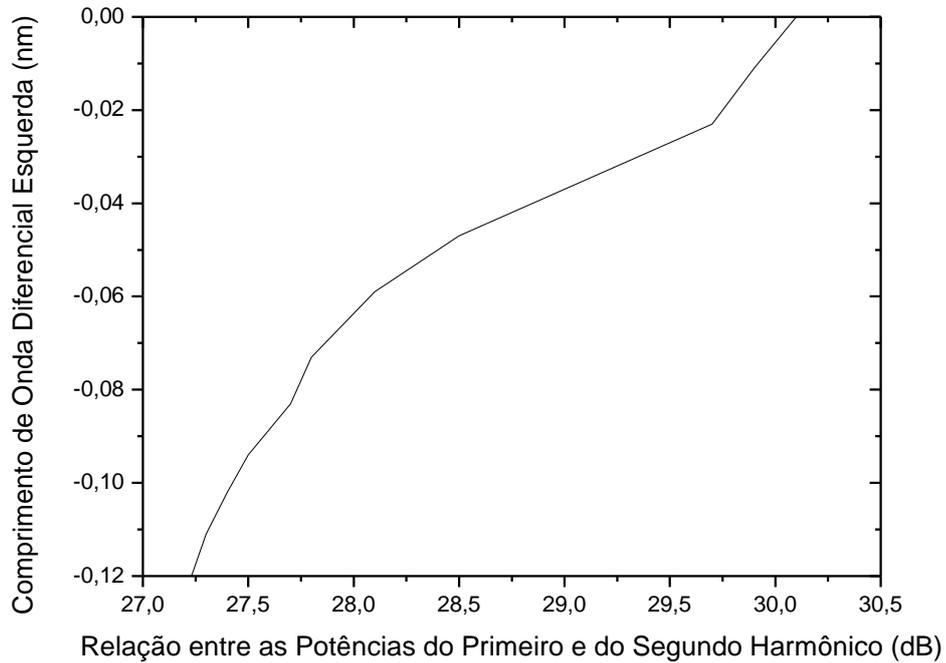


Figura 4-20: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora esta à esquerda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

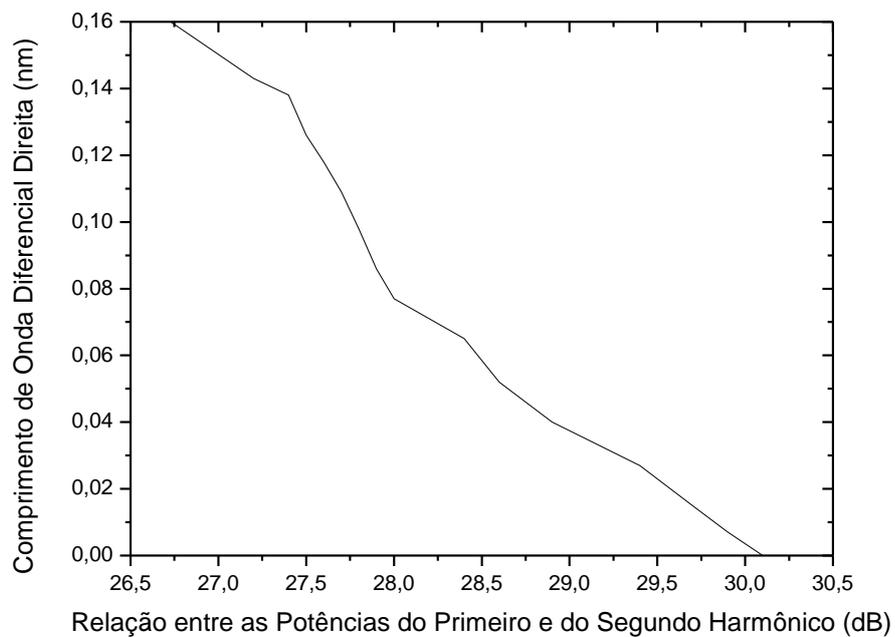


Figura 4-21: Comprimento de onda diferencial em função da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora esta à direita da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

Portanto, o gráfico da Figura 4-20 é válido quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à esquerda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, como ocorre no caso A mostrado na Figura 4-6. Enquanto isso, o gráfico da Figura 4-21 é válido quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à direita da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, como ocorre no caso C mostrado na Figura 4-8.

Considere $\Phi^-(h)$ [APÊNDICE D] a função que representa o gráfico da Figura 4-20, isto é, a função $\Phi^-(h)$ é o valor do comprimento de onda diferencial para uma dada relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico (h) quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à esquerda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Além disso, considere $\Phi^+(h)$ [APÊNDICE D] a função que representa o gráfico da Figura 4-21, ou seja, $\Phi^+(h)$ é o valor do comprimento de onda diferencial para uma dada relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico (h) quando o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está à direita da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

A Figura 4-22 mostra o gráfico do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação. O gráfico da Figura 4-22 foi gerado a partir dos gráficos da Figura 3-19 do item 3.2.4 e da Figura 4-5.

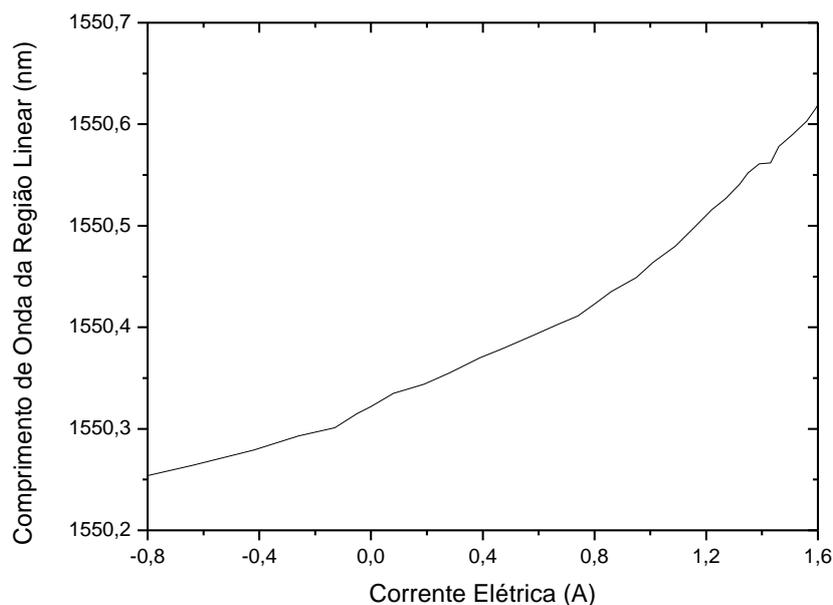


Figura 4-22: Comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora em função da corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação.

A Figura 4-23 apresenta o gráfico da corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação em função do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Enquanto o gráfico da Figura 4-22 mostra o comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora para uma dada corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação, o gráfico da Figura 4-23 mostra o valor da corrente elétrica que deve ser aplicada à junção peltier na interrogação a partir da posição estimada do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

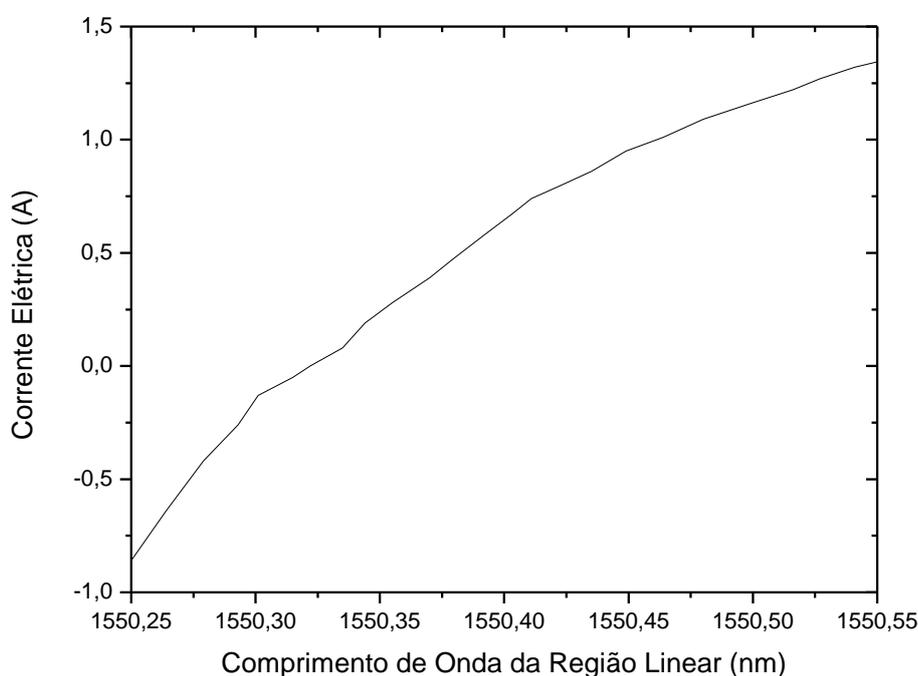


Figura 4-23: Corrente elétrica aplicada na junção peltier na interrogação em função do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora.

Considere $I(\lambda_L)$ [APÊNDICE D] a função que representa o gráfico da Figura 4-23, isto é, $I(\lambda_L)$ é o valor da corrente elétrica que deve ser aplicada na junção peltier na interrogação a partir do valor do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora estimado.

Os itens 4.3.1 e 4.3.2 apresentam as etapas que compõem a fase de sintonia no caso de o comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG sensora estar à esquerda e à direita, respectivamente, do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. A fase de sintonia é composta por duas etapas, de verificação e de ajuste, que são apresentadas nesses itens.

4.3.1. Análise da fase de sintonia a partir do lado esquerdo

Nesse item é apresentada a análise da fase de sintonia para o caso em que o comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG sensora está à esquerda do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora a partir de um ensaio.

O primeiro passo consiste na medição da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico por parte da rotina RL. A rotina RL recebe o sinal elétrico digitalizado da placa de aquisição. Esse sinal elétrico representa o sinal de controle cuja forma de onda é senoidal e a frequência mede 800 Hz. Em seguida, a rotina RL mede a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico desse sinal elétrico recebido. O primeiro valor medido foi 28,53 dB. Como esse valor é menor do que o limiar de 30 dB, a rotina RL entra em fase de sintonia.

Na inicialização, antes da primeira medição da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, a rotina RL transmite um valor binário 000 para a rotina RC e transmite o resultado da operação lógica *and* entre esse valor binário, no caso 0, para a rotina RM. A Tabela 4-1 mostra os valores binários transmitidos da rotina RL para a rotina RC e para a rotina RM, em cada caso.

Tabela 4-1: Valores binários transmitidos da rotina para a medição de linearidade (RL) para a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) e para a rotina de medição (RM), em cada caso.

	RC	RM
Inicialização	000	0
Fase de Sintonia: Etapa de Verificação	001	0
Fase de Sintonia: Etapa de Ajuste	010 e 011	0
Fase de Medição	111	1

Após calcular a primeira relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal elétrico recebido, a rotina RL muda da inicialização para a etapa de verificação da fase de sintonia, no caso de o valor da relação estar abaixo do limiar, ou para a fase de medição, no caso de o valor da relação estar acima do limiar. Como o primeiro valor

medido foi 28,53 dB, a rotina RL entra na etapa de verificação da fase de sintonia. Nesse caso, é transmitido o valor binário 001 para a rotina RC e é transmitido o resultado da operação lógica *and* entre esse valor binário, no caso 0, para a rotina RM, conforme mostrado na Tabela 4-1. Além disso, a rotina RL transmite o valor 28,53 dB para a rotina RC. A rotina RL guarda esse valor de 28,53 dB.

O objetivo da etapa de verificação é descobrir se o comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG sensora esta à esquerda ou à direita do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. Ao receber o valor binário 001, a rotina RC entra na etapa de verificação. Nessa etapa é calculado o valor de $\Phi^-(h)$ e $\Phi^+(h)$, que correspondem aos gráficos das Figuras 4-20 e 4-21, respectivamente, escolhendo o menor módulo do valor calculado. O valor de $\Phi^-(28,53)$ é -0,0464 enquanto o valor de $\Phi^+(28,53)$ é 0,0603. Como o valor 0,0464 é menor do que 0,0603, a rotina RC escolhe o valor -0,0464 e a função $\Phi^-(h)$. A corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação inicialmente vale 0, que corresponde ao comprimento de onda da região linear da FBG interrogadora de 1550,322 nm, conforme o gráfico da Figura 4-22. A rotina RC divide o valor escolhido por 3, resultando em -0,0155, e o soma ao comprimento de onda da região linear da FBG interrogadora, resultando em um comprimento de onda de 1550,306 nm. Em seguida, é calculado o valor de $I(1550,306)$, do gráfico da Figura 4-23, que mede -0,11 A. A rotina RC transmite esse valor para a placa de aquisição e da placa para o circuito de controle da corrente elétrica sobre a junção peltier na interrogação, de forma que o circuito de controle aplique a corrente elétrica de -0,11 A sobre a junção peltier na interrogação. Quando esse valor de corrente elétrica é estabelecido, a rotina RC transmite um valor binário 01 para a rotina RL em resposta ao valor binário 001 que havia recebido. O valor binário 01 significa que a rotina RC escolheu a função $\Phi^-(h)$. A Tabela 4-2 mostra os valores binários transmitidos da rotina RC para a rotina RL e para a rotina RM, em cada caso.

Tabela 4-2: Valores binários transmitidos da rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) para a rotina para medição da linearidade (RL) e para a rotina de medição (RM), em cada caso.

	RL	RM
Inicialização	00	0
Função $\Phi^-(h)$	01	0
Função $\Phi^+(h)$	10	0
Fase de Medição	11	1

Ao receber o valor binário 01, a rotina RL mede a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, novamente. O novo valor medido foi 28,78 dB. Em seguida, a rotina RL compara esse valor de 28,78 com o valor 28,53 que havia guardado. Se o novo valor for maior do que o valor guardado, significa que a função escolhida pela rotina RC estava correta. Quando o novo valor é menor do que o valor guardado, a função escolhida pela rotina RC deve ser trocada. Como o valor 28,78 é maior do que 28,53, a função $\Phi^-(h)$ é escolhida pela rotina RC. Nesse caso, a rotina RL transmite o valor binário 010 para a rotina RC. Esse valor binário significa que o sistema entrou na etapa de ajuste e a função que deve ser usada pela rotina RC é a $\Phi^-(h)$. Além disso, ela transmite o valor 28,78 obtido.

Na etapa de ajuste, a rotina RC varia a corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação a partir do valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico que recebeu da rotina RL. A rotina RC calcula o valor de $\Phi^-(28,78)$, que vale -0,041. Em seguida, esse valor é dividido por 3, resultando em -0,013, e somado ao comprimento de onda da região linear atual, que mede 1550,306 nm, resultando em 1550,293 nm. Depois é feito o cálculo de $I(1550,293)$, o qual resulta em uma corrente elétrica de -0,24 A aplicada à junção peltier na interrogação. A rotina RL transmitiu outro valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico para a rotina RC medindo 29,21 dB, resultando em $\Phi^-(29,21)$ igual a -0,033. Dividindo esse valor por 3 e somando ao comprimento de onda de 1550,293, chega-se ao comprimento de onda estimado de 1550,282 nm. Em seguida é calculado $I(1550,282)$ que vale -0,38 A. A rotina RL transmitiu mais quatro valores da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico antes de receber um valor de 30,07 dB. A corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier se estabilizou em -0,61

A, o que indica o valor do comprimento de onda da região linear de 1550,262 nm, de acordo com o gráfico da Figura 4-22.

Como a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico está acima do limiar de 30 dB, o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, ou seja, o comprimento de onda diferencial vale zero. Além disso, a rotina RL entra em fase de medição. A fase de medição é descrita no item 4.4.

4.3.2. Análise da fase de sintonia a partir do lado direito

Outro ensaio foi feito para o comprimento de onda do espectro de reflexão da FBG sensora à direita do comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora. A rotina RL recebeu o sinal elétrico da placa de aquisição cujo valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico era 28,31 dB. A rotina RL transmitiu o valor de 28,31 dB e o valor binário 001 para a rotina RC. Além disso, a rotina RL armazena esse valor de 28,31 dB.

Na etapa de verificação, a rotina RC calcula o valor de $\Phi^-(28,31)$, que mede -0,0529 e o valor de $\Phi^+(28,31)$, que mede 0,0695. Como o valor 0,0529 é menor do que 0,0695, a rotina RC escolhe o valor -0,0529 e a função $\Phi^-(h)$. Esse valor é dividido por três e somado ao comprimento de onda da região linear resultando em um comprimento de onda de 1550,305. Em seguida, é calculado o valor de $I(1550,305)$, que vale -0,12 A. Quando esse valor de corrente elétrica é estabelecido, a rotina RC transmite um valor binário 01 para a rotina RL.

Ao receber o valor binário 01, a rotina RL mede a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, novamente. O novo valor medido foi 28,05 dB. Como o valor 28,05 é menor do que 28,31, a função $\Phi^-(h)$ escolhida pela rotina RC estava incorreta. Nesse caso, a rotina RL transmite o valor binário 011 para a rotina RC, significando que o sistema entrou na etapa de ajuste e a função que deve ser usada pela rotina RC é a $\Phi^+(h)$. Além disso, ela transmite o valor 28,05 obtido.

Na etapa de ajuste, a rotina RC muda o valor binário transmitido para a rotina RL para 10 e calcula $\Phi^+(28,05)$, que vale 0,0743. Em seguida, divide esse valor por 3, resultando em 0,025, e o soma ao comprimento de onda da região linear atual, que mede 1550,305 nm, resultando em 1550,330 nm. Depois é feito o cálculo de $I(1550,330)$, o qual resulta em uma corrente elétrica de 0,06 A aplicada à junção peltier na interrogação. A rotina RL transmitiu o valor 28,40 para a rotina RC, resultando em $\Phi^+(28,40)$ igual a 0,0678. Em seguida, dividiu-se

esse valor por 3, resultando em 0,023, e somou-se esse valor ao comprimento de onda da região linear atual, que mede 1550,330 nm, resultando em 1550,353 nm. Em seguida é calculado $I(1550,353)$ que vale 0,25 A. A rotina RL transmitiu mais seis valores da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico antes de receber um valor de 30,11 dB. A corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier se estabilizou em 0,69 A, o que indica o valor do comprimento de onda da região linear de 1550,405 nm, de acordo com o gráfico da Figura 4-22.

Como a relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico está acima do limiar de 30 dB, o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, ou seja, o comprimento de onda diferencial vale zero. Além disso, a rotina RL entra em fase de medição. A fase de medição é descrita no item 4.4.

4.4. Análise dos resultados obtidos para a fase de medição

A fase de medição é iniciada quando a rotina RL recebe um sinal elétrico cujo valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico está acima do valor limiar de 30 dB. Nesse caso, a rotina RL transmite o valor binário 111 para a rotina RC e, conseqüentemente, transmite o valor binário 1 para a rotina RM.

Ao receber o valor binário 111, a rotina RC entra em fase de medição, transmitindo o valor da corrente elétrica que está sendo aplicada à junção peltier na interrogação à rotina RM. Além disso, a rotina RC transmite o valor binário 1 para a rotina RM indicando que o valor de corrente elétrica que ela está recebendo é válido, e o valor binário 11 para a rotina RL. Em seguida, a rotina RM transmite o valor binário 1 para as rotinas RC e RL. Isso significa que a rotina RM também está em fase de medição e possui o valor da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação. A Tabela 4-3 mostra os valores binários transmitidos da rotina RM para a rotina RL e para rotina RC, em cada caso.

Tabela 4-3: Valores binários transmitidos da rotina de medição (RM) para a rotina para medição da linearidade (RL) e para a rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC), em cada caso.

	RL	RC
Em Espera	0	0
Fase de Medição	1	1

Visto que o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, o gráfico da Figura 4-22 pode ser interpretado como sendo o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora em função da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação. Com isso, a função $\Lambda_L(i)$ passa a representar o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora para um dado valor de corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação. Como é conhecida a relação entre o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora e a temperatura da FBG sensora, mostrada no gráfico da Figura 4-2, a temperatura da FBG sensora pode ser obtida através da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação. Portanto, a partir da relação entre o comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora e a temperatura da FBG sensora, dada no gráfico da Figura 4-2, e considerando o comprimento de onda da região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora igual ao comprimento de onda de ressonância do espectro de reflexão da FBG sensora, mostrada no gráfico da Figura 4-22, chega-se ao gráfico da Figura 4-24, no qual é dada a temperatura da FBG sensora em função da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação. Dessa forma, a rotina RM pode medir a temperatura à qual a FBG sensora está sujeita a partir do valor da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação, transmitido pela rotina RC.

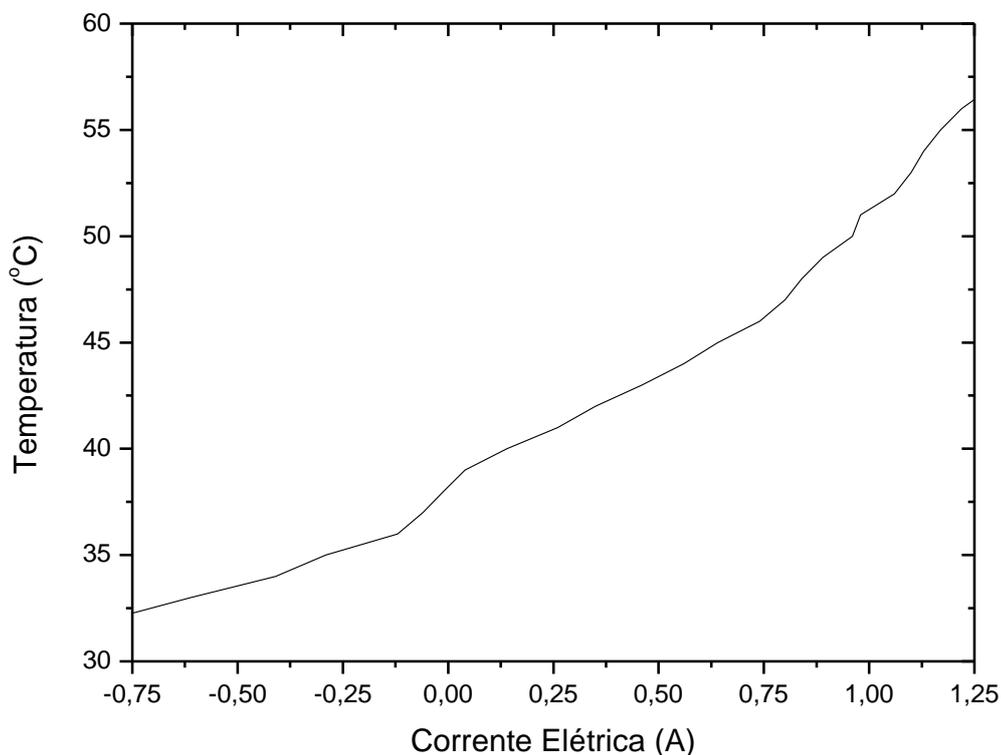


Figura 4-24: Temperatura da FBG sensora em função da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação.

Considere $T(i)$ [APÊNDICE D] a função que representa o gráfico da Figura 4-24, isto é, $T(i)$ é o valor da temperatura à qual a FBG sensora está sujeita em função da corrente elétrica (i) aplicada à junção peltier na interrogação.

Quando a rotina RM recebe o valor da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação da rotina RC, ela calcula a temperatura a partir da função $T(i)$. No caso da corrente elétrica de -0,61 A do item 4.3.1, a temperatura medida, ou seja, o valor de $T(-0,61)$ é 33 °C. Para a corrente elétrica de 0,69 A do item 4.3.2, o valor da temperatura é 45,4 °C.

Além da variação da temperatura, a FBG sensora é sujeita a vibrações a partir de um PZT no qual ela é fixada. O PZT no sensoriamento vibra modulando o espectro de reflexão da FBG sensora. Com isso, o sinal óptico na saída da FBG interrogadora possui a informação da demodulação do espectro de reflexão da FBG sensora, que representa as vibrações às quais a FBG sensora está sujeita.

Na saída do fotodetector é possível medir o sinal elétrico resultante da vibração da FBG sensora. As Figuras 4-25, 4-26 e 4-27 mostram o sinal elétrico na saída do fotodetector, quando a FBG sensora é sujeita a uma forma de onda senoidal de frequência 134 kHz, nos

casos A, B e C, respectivamente, apresentados na Figura 4-6 à Figura 4-9 do item 4.2. No caso A, o comprimento de onda diferencial mede $-0,124$ nm, no caso B mede 0 nm e no caso C $0,143$ nm.

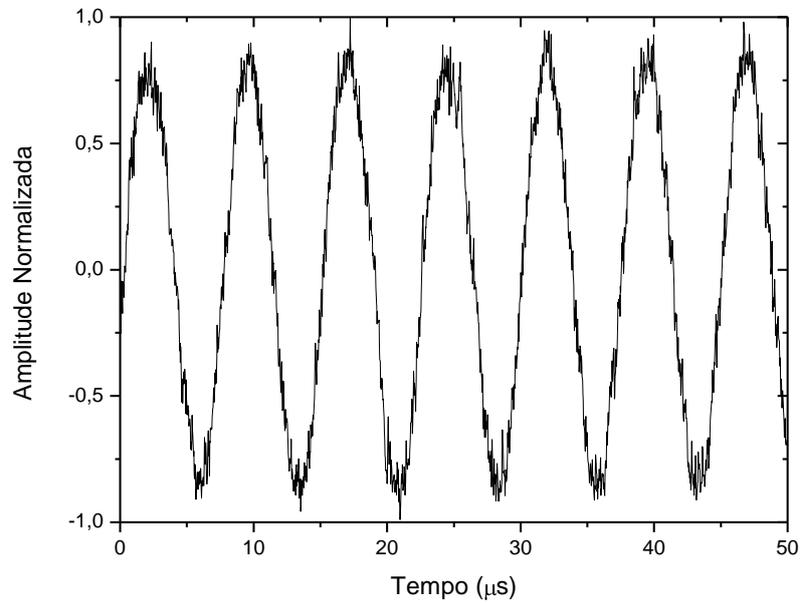


Figura 4-25: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso A.

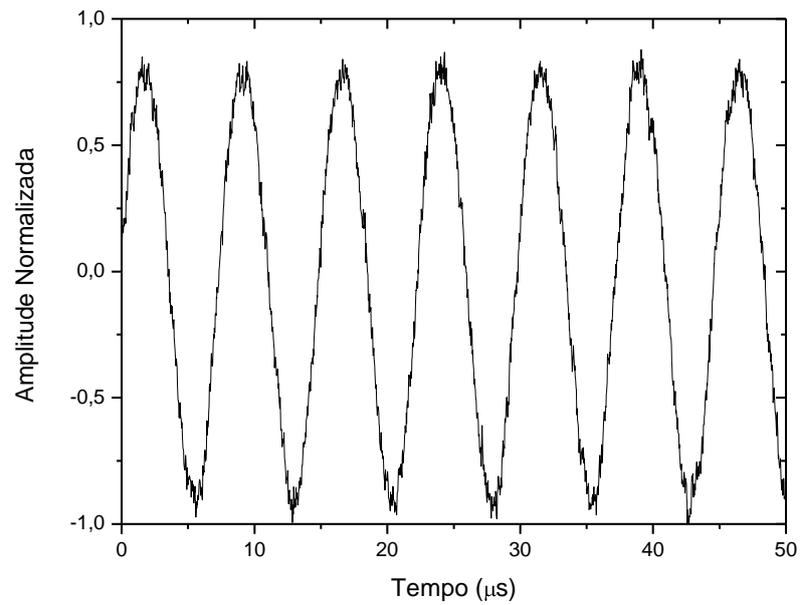


Figura 4-26: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso B.

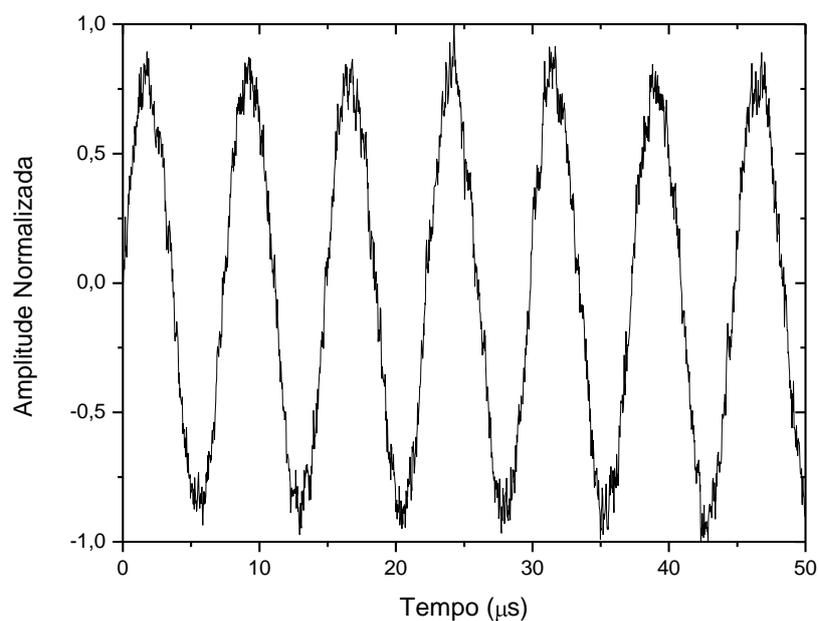


Figura 4-27: Forma de onda senoidal que representa as vibrações da FBG sensora para o caso C.

As Figuras 4-28, 4-29 e 4-30 mostram o sinal elétrico na saída do fotodetector, nos casos A, B e C, respectivamente, apresentados na Figura 4-6 à Figura 4-9 do item 4.2, quando a FBG sensora é sujeita a uma forma de onda típica de uma descarga parcial que consiste em pulsos de frequência 131 Hz.

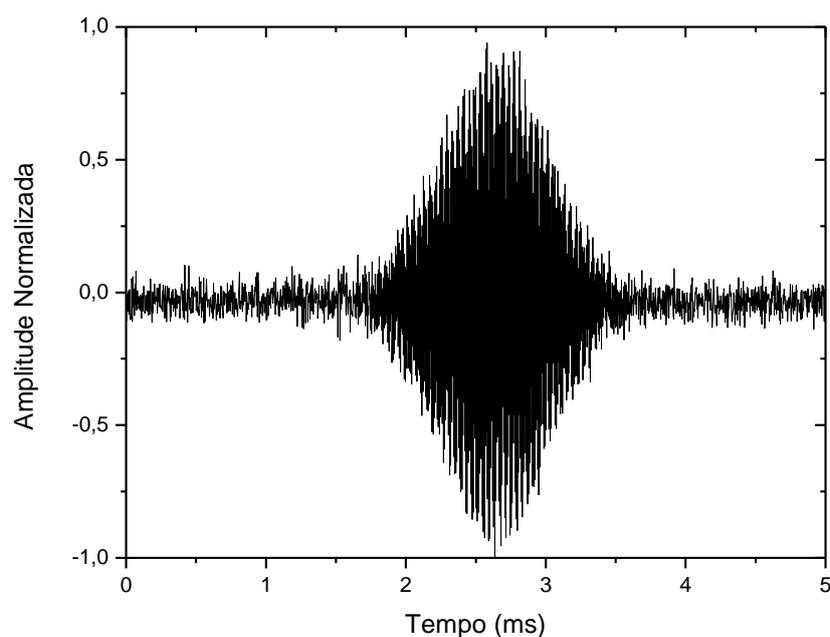


Figura 4-28: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso A.

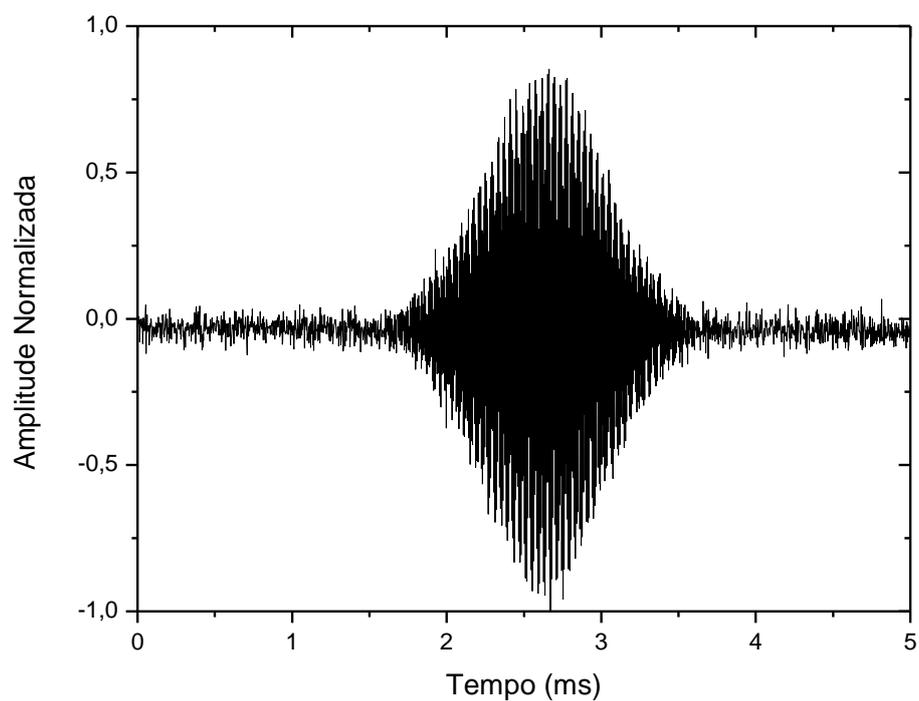


Figura 4-29: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso B.

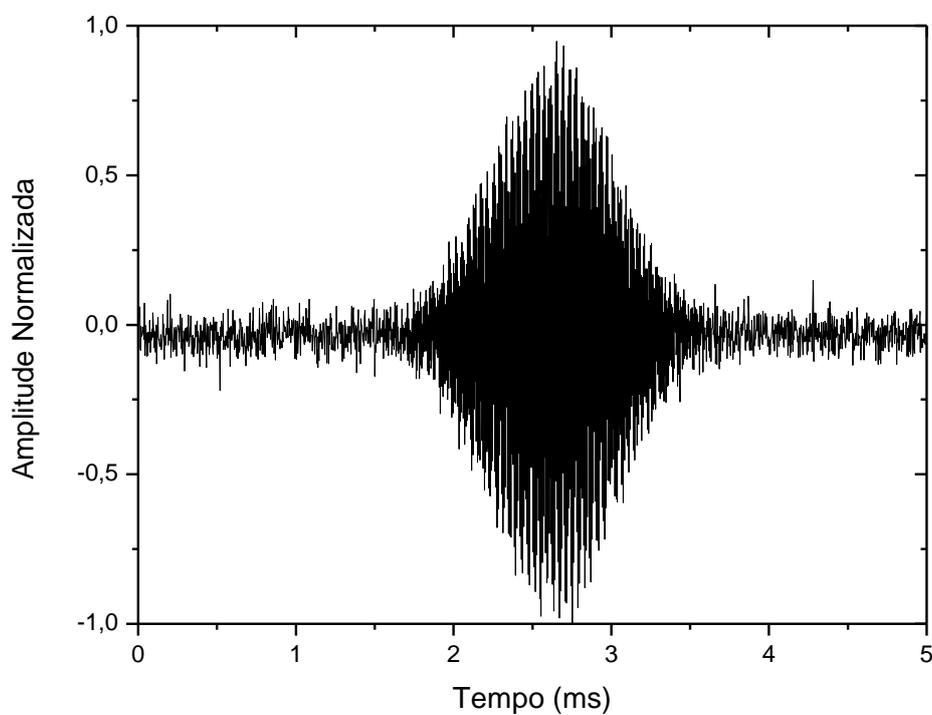


Figura 4-30: Forma de onda de um pulso que representa as vibrações da FBG sensora para o caso C.

Na fase de medição, a rotina RM extrai do sinal elétrico, digitalizado pela placa de aquisição, a informação correspondente às vibrações da FBG sensora. No caso B, mostrados nas Figuras 4-26 e 4-29, o espectro de reflexão da FBG sensora está na região linear do espectro de transmissão da FBG interrogadora, pois o comprimento de onda diferencial é igual à zero. Dessa forma, as Figuras 4-26 e 4-29 são exemplos de sinais que podem ser apresentados pela rotina RM.

A rotina RM calcula a temperatura à qual a FBG sensora está sujeita a partir do valor da corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação, e pode apresentar a forma de onda que representa as vibrações às quais a FBG sensora está sujeita extraída do sinal elétrico na saída do fotodetector, o qual é digitalizado pela placa de aquisição.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Nesse trabalho foi apresentada uma nova técnica de interrogação de FBG, quando esta é sujeita a vibrações e à variação de temperatura, simultaneamente. Para isso, foi utilizada uma FBG funcionando como elemento interrogador. A FBG interrogadora sintonizava o espectro de reflexão da FBG sensora à região linear do seu espectro de transmissão através do valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG interrogadora vibrando em baixa frequência. Na região linear, o espectro de reflexão da FBG sensora é demodulado, resultando em um sinal elétrico que representa as vibrações às quais a FBG sensora está sujeita, na saída do fotodetector. Além disso, a temperatura pode ser medida a partir do valor da corrente elétrica aplicada sobre a junção peltier na interrogação. Como a variação da temperatura provoca o deslocamento no espectro da FBG, a utilização de uma junção peltier na interrogação permitiu o deslocamento do espectro de transmissão da FBG interrogadora para compensar o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora devido à temperatura, isto é, a variação do espectro de transmissão da FBG interrogadora deve ser a mesma do espectro de reflexão da FBG sensora de forma que o sistema continue operando na região linear. Visto que existe uma relação entre a corrente elétrica aplicada à junção peltier na interrogação e a temperatura da junção peltier na interrogação, entre a temperatura da junção peltier na interrogação e o deslocamento do espectro de transmissão e entre o deslocamento do espectro de reflexão da FBG sensora e a temperatura à qual ela está sujeita, é possível medir a temperatura da FBG sensora através do valor da corrente aplicada

sobre a junção peltier na interrogação, quando o deslocamento do espectro de transmissão da FBG interrogadora e do espectro de reflexão da FBG sensora são os mesmos.

Dessa forma, foi possível realizar uma técnica de interrogação capaz de monitorar uma FBG sujeita a dois parâmetros, simultaneamente. Como elemento interrogador, pode ser utilizada uma FBG funcionando como filtro sintonizável auto-referenciado. Um mecanismo de referência permite que o sinal de saída independa de flutuações de potência da fonte e das perdas de transmissão provocadas pelos componentes dos circuitos. Com isso, o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico ficava constante, mesmo com a substituição dos conectores ou com a variação do ganho do fotodetector. A sintonia permite que as flutuações de temperatura não interfiram na medição das vibrações em sistemas que requerem apenas a medição desse parâmetro. Além disso, através dessa técnica é possível monitorar ondas acústicas, ultrassom e descargas parciais, no lugar de vibrações.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como apresentado, a técnica de interrogação de FBG proposta nessa dissertação pode ser utilizada para medir descargas parciais, como as produzidas por equipamentos de alta tensão, no lugar de vibrações. Para isso, é preciso medir a intensidade da deformação mecânica sobre a FBG sensora provocada pelas ondas acústicas resultantes das descargas parciais. Em seguida, é necessário elaborar um meio para fixação dos componentes à superfície externa do equipamento de alta tensão e um adaptador acústico com a função de maximizar o acoplamento mecânico entre o equipamento e a FBG sensora, os quais elevam a eficiência do processo de detecção de descargas parciais.

No lugar de uma FBG sensora pode ser utilizada uma LPG sensora de índice de refração. Nesse caso, ao invés de medir o deslocamento do espectro da FBG sensora provocado pela variação da temperatura, é possível medir o deslocamento do espectro da LPG sensora resultante da variação do índice de refração do meio no qual ela está submersa. Com isso, o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico do sinal resultante da FBG interrogadora vibrando em baixa frequência se torna um parâmetro para obter o comprimento de onda de ressonância do espectro de transmissão da LPG sensora, cujo valor pode ser atribuído ao índice de refração do meio externo.

APÊNDICE A – Medição da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico

A Figura A-1 mostra o circuito para aquisição dos dados do sinal elétrico digitalizados pela placa de aquisição a partir do software LabVIEW.

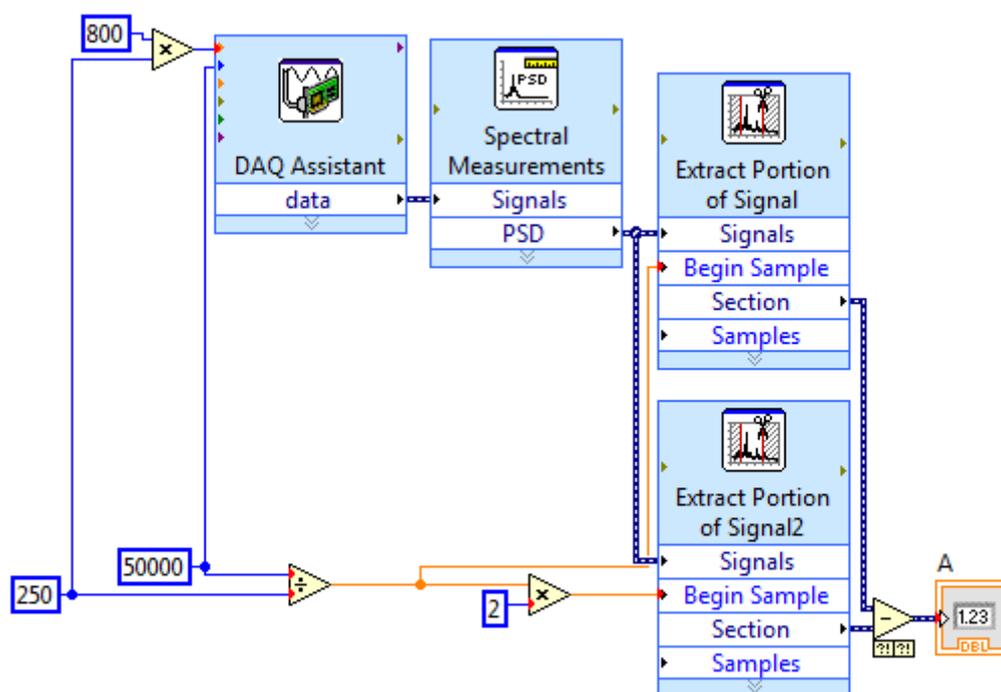


Figura A-1: Cálculo da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico.

Na Figura A-1, o valor 800 corresponde à frequência do sinal elétrico, 50000 é o número de amostras aquisitadas, 250 é o valor multiplicado por 800 resultando na taxa de amostragem e o valor A, que corresponde ao valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico.

APÊNDICE B – Rotina para a medição da linearidade

A Figura B-1 mostra a rotina RL no LabVIEW. Nela, B1 e B2 correspondem aos valores binários recebidos da rotina RC conforme a Tabela 4-2 do item 4.3.1, C1 é o bit recebido da rotina RM conforme a Tabela 4-3 do item 4.4, A é o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico, armaz é o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico armazenado, A1, A2 e A3 são os bits transmitidos da rotina RL para a rotina RM conforme a Tabela 4-1 do item 4.3.1. Na Figura B-1 é mostrada a condição em que ocorre a etapa de verificação da fase de sintonia. Na Figura B-2 é mostrada a transição entre a etapa de verificação e a etapa de ajuste. Na Figura B-2 foi escolhida a função $\Phi^-(h)$ que corresponde ao valor binário 010. A Figura B-3 apresenta a rotina RL na etapa de ajuste. Na Figura B-3, o valor binário 010 indica que a função usada pela rotina RC é $\Phi^-(h)$. A Figura B-4 apresenta a condição em que a RL entra em fase de medição, na qual o valor binário é 111.

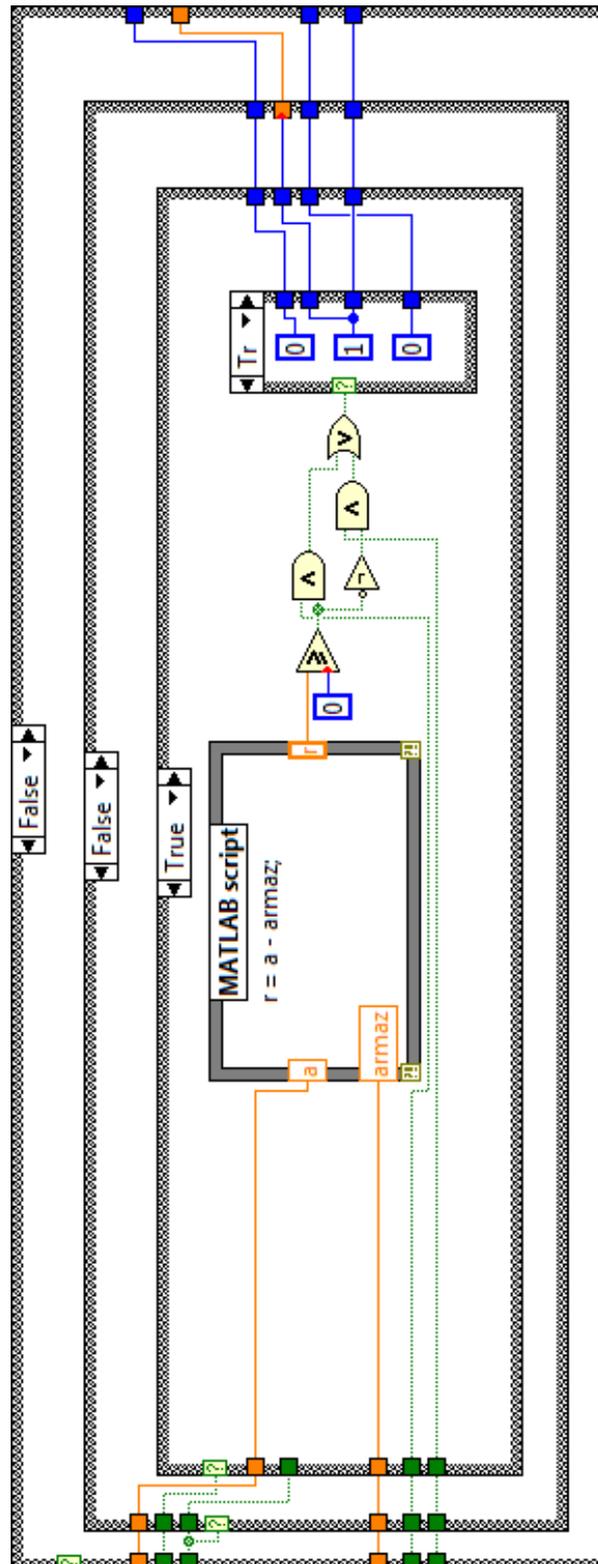


Figura B-2: Rotina para medição da linearidade (RL) na transição entre a etapa de verificação e ajuste da fase de sintonia.

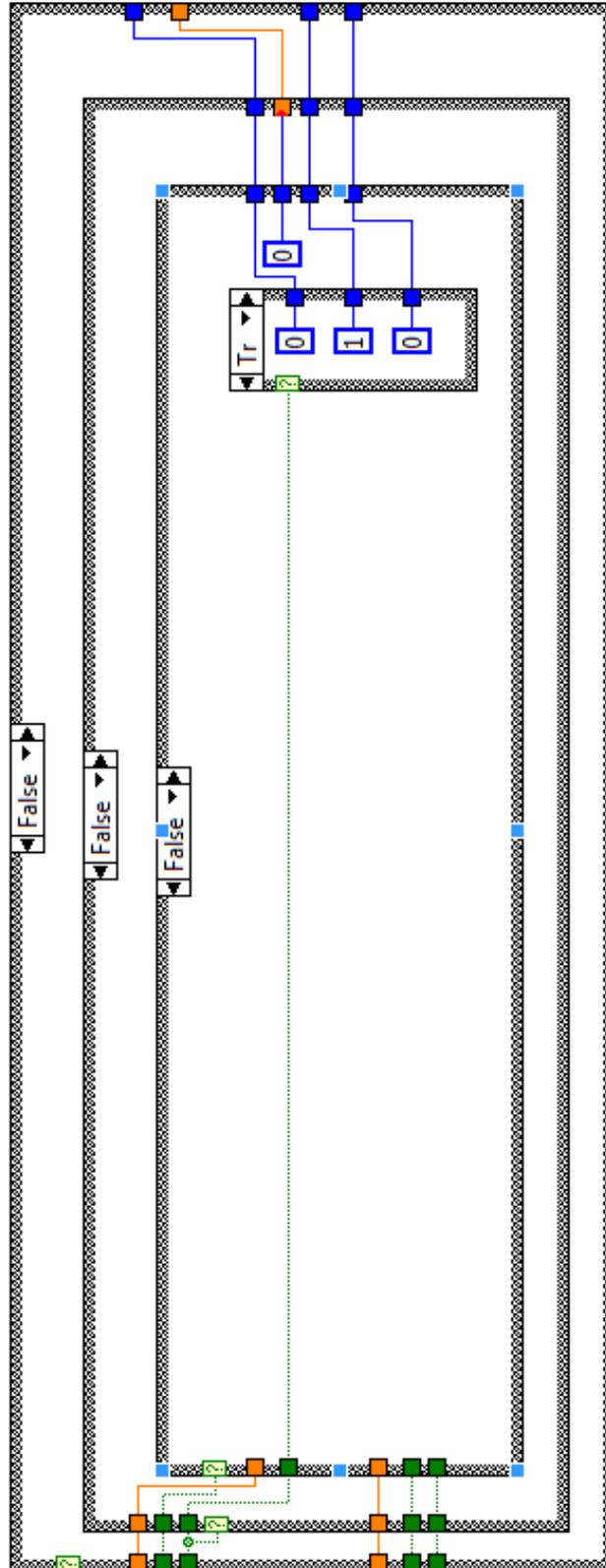


Figura B-3: Rotina para medição da linearidade (RL) na etapa ajuste da fase de sintonia.

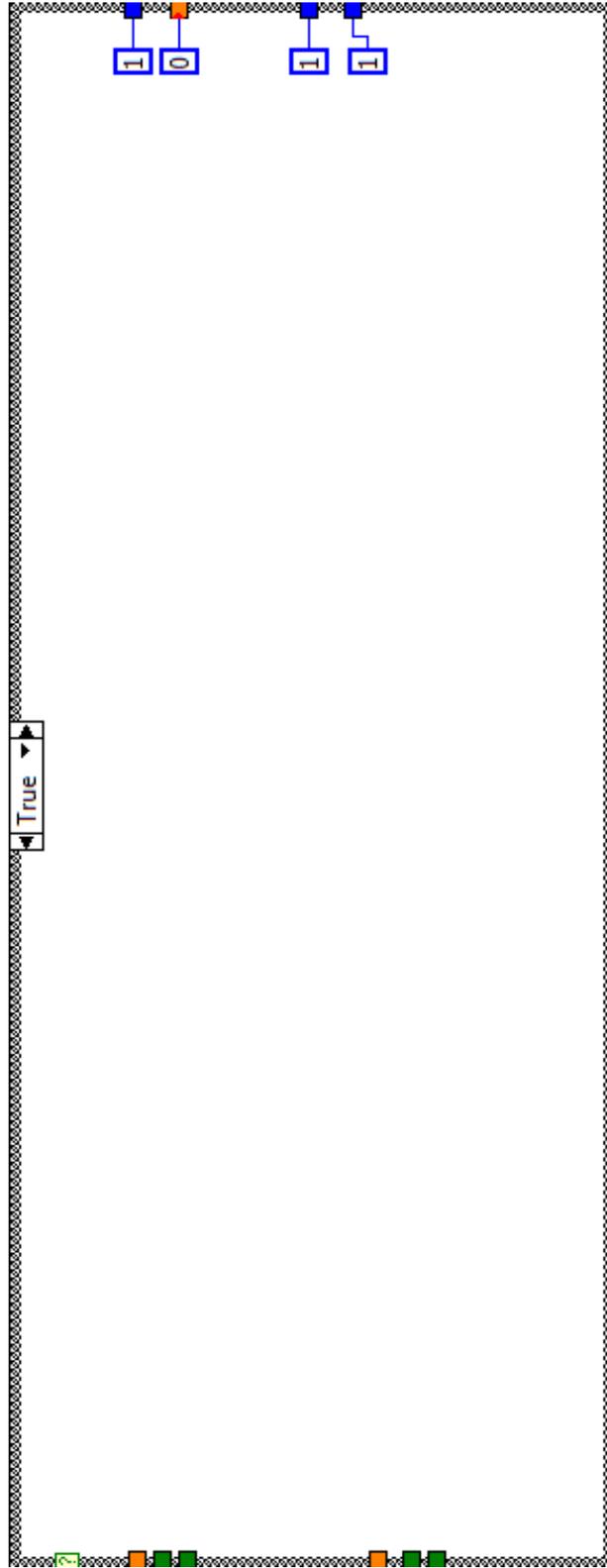


Figura B-4: Rotina para medição da linearidade (RL) na fase de medição.

APÊNDICE C – Rotina para o controle da corrente da junção peltier

As Figuras C-1 e C-2 apresentam a rotina RC. Na Figura C-1, B1 e B2 correspondem aos valores binários atuais da rotina RC conforme a Tabela 4-2 do item 4.3.1, A é o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico transmitido pela rotina RL, A1, A2 e A3 são os bits transmitidos da rotina RL para a rotina RC conforme a Tabela 4-1 do item 4.3.1, harm é o valor da relação entre as potências do primeiro e do segundo harmônico na entrada do script em Matlab para o cálculo de $\Phi^-(h)$. Além disso, é transmitido o valor binário 01 à rotina RL, que corresponde à escolha da função $\Phi^-(h)$. Na Figura C-2, B1- e B2- são os bits calculados, que correspondem ao valor 01, os quais são transmitidos pela rotina RC para a rotina RL. O script em Matlab corresponde ao cálculo da corrente elétrica que deve ser aplicada à junção peltier na interrogação a partir do valor de $\Phi^-(h)$ calculado.

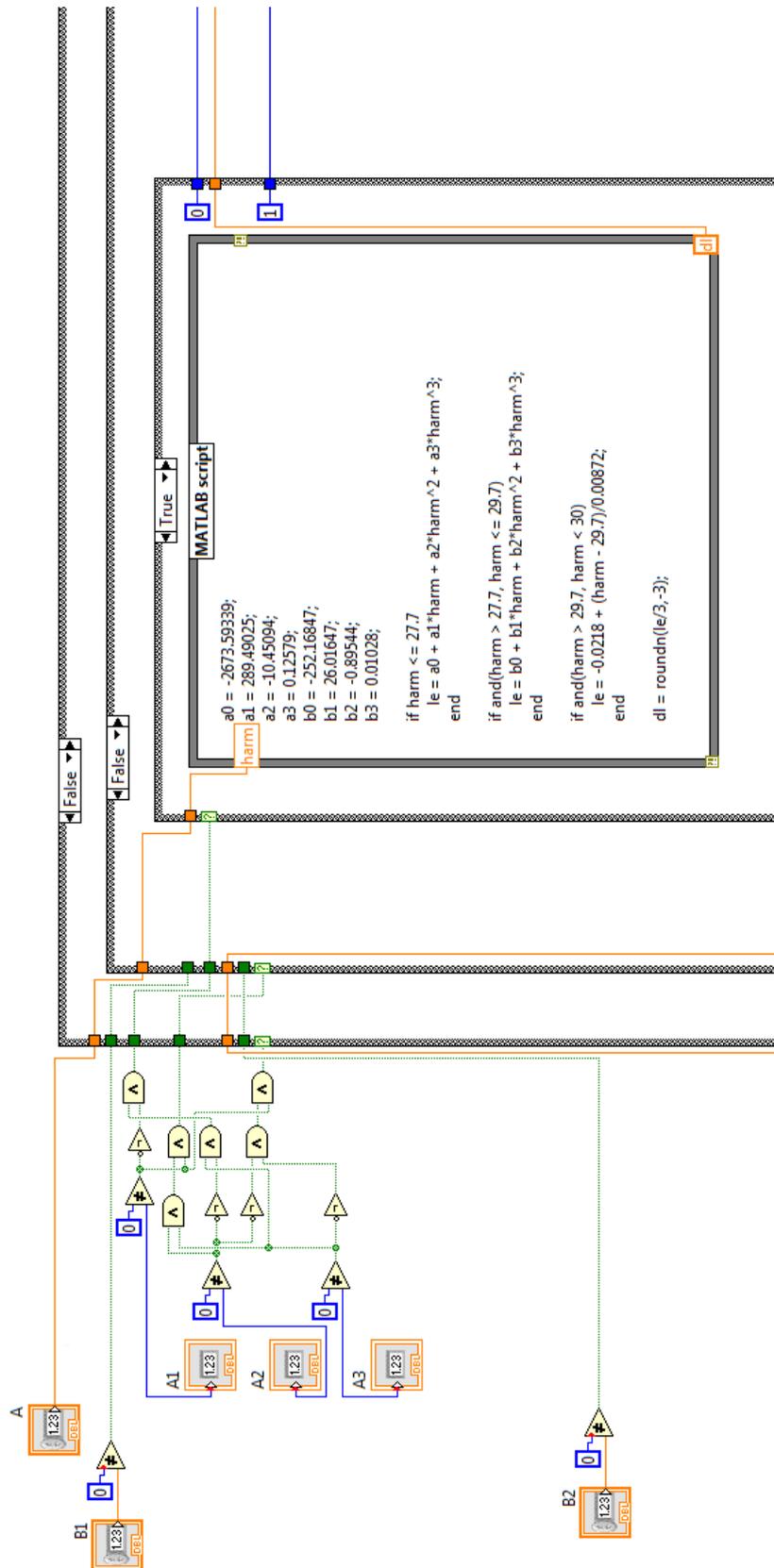


Figura C-1: Rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) – parte 1.

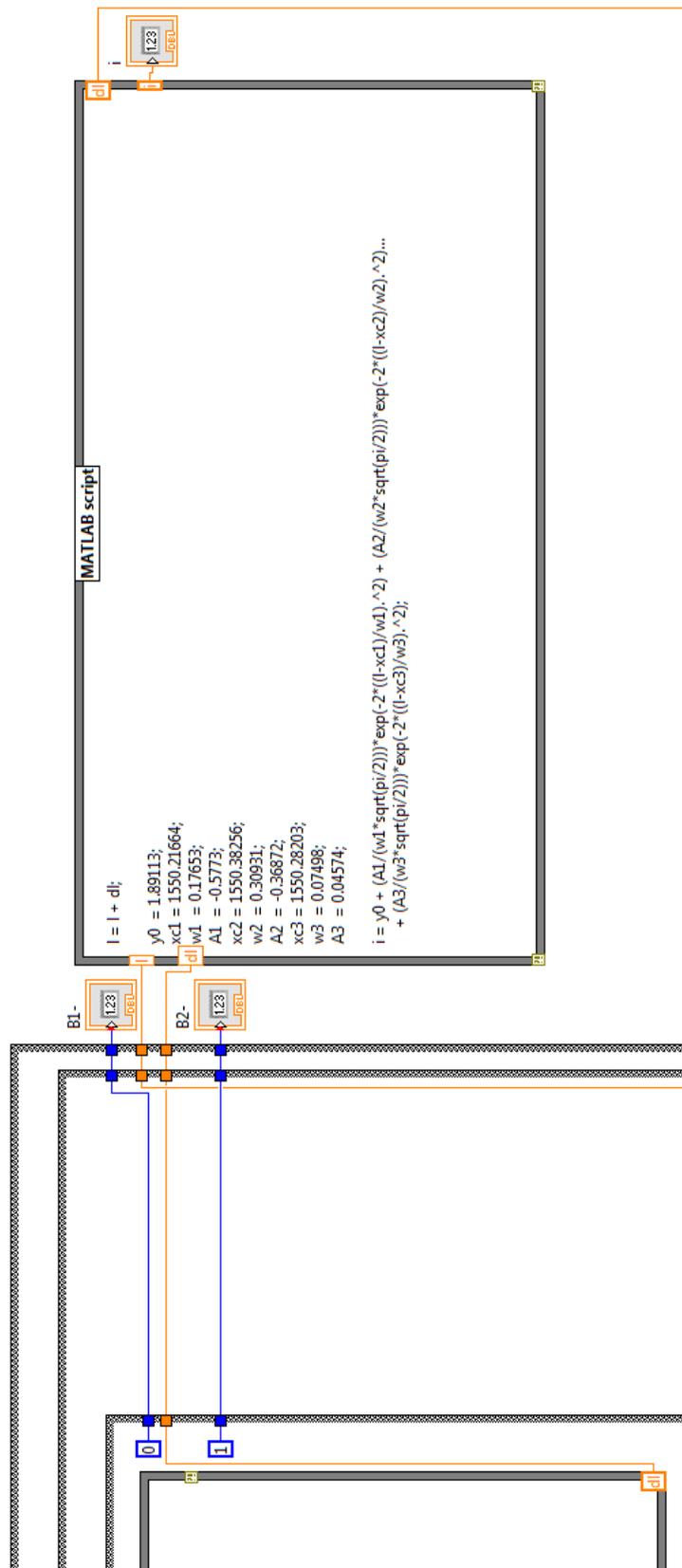


Figura C-2: Rotina para o controle da corrente da junção peltier (RC) – parte 2.

APÊNDICE D – Funções obtidas a partir de gráficos

D1) Função $\Phi(h)$

A função $\Phi(h)$ é representada na equação polinomial:

$$\Phi(h) = \begin{cases} a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3; & 27,2 \leq h \leq 27,7 \\ b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3; & 27,7 < h \leq 29,7 \\ c_0 + c_1h; & 29,2 < h < 30 \end{cases}$$

Dado:

$$\begin{array}{llll} a_0 = -2673,5934 & a_1 = 289,49025 & a_2 = -10,45094 & a_3 = 0,12579 \\ b_0 = -252,16847 & b_1 = 26,01647 & b_2 = -0,89544 & b_3 = 0,01028 \\ c_0 = -3428,9209 & c_1 = 114,6789 & & \end{array}$$

O gráfico da função $\Phi(h)$ é mostrado na Figura D-1.

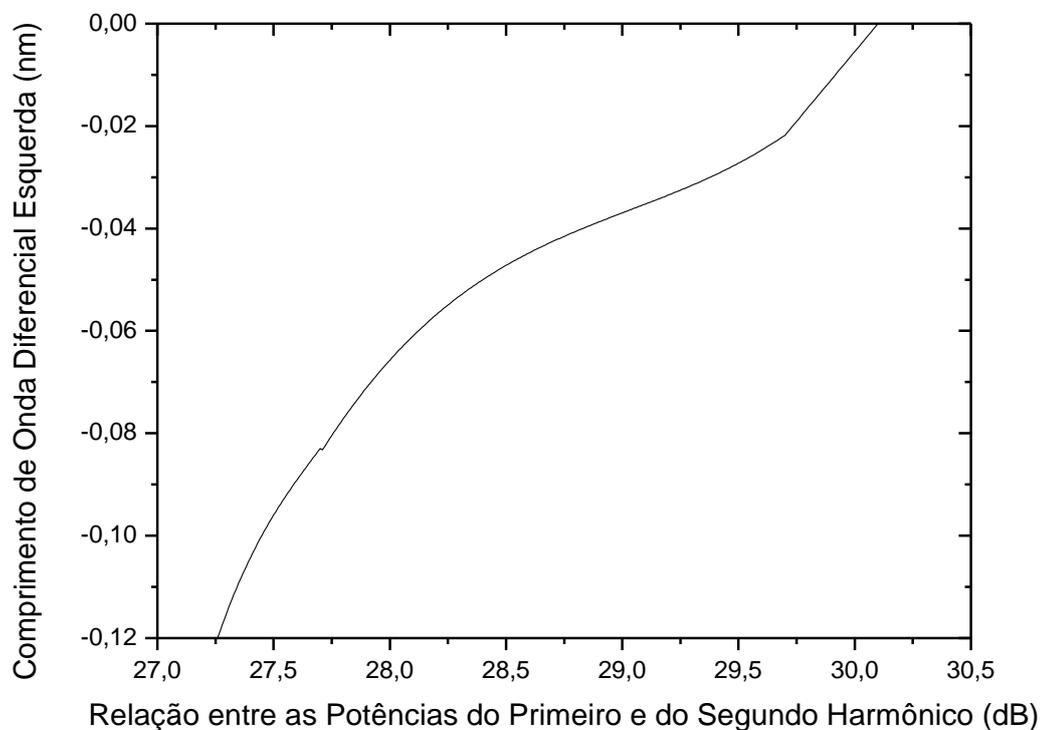


Figura D-1: Função $\Phi(h)$, que corresponde ao gráfico da Figura 4-20 do item 4.3.

D2) Função $\Phi^+(h)$

A função $\Phi^+(h)$ é representada na equação polinomial:

$$\Phi^+(h) = \begin{cases} a_0 + a_1h + a_2h^2 + a_3h^3; & 26,4 \leq h \leq 27,4 \\ b_0 + b_1h + b_2h^2 + b_3h^3; & 27,4 < h \leq 28 \\ c_0 + c_1h; & 28 < h \leq 28,4 \\ d_0 + d_1h + d_2h^2 + d_3h^3; & 28,4 < h < 30 \end{cases}$$

Dado:

$a_0 = -532,29593$	$a_1 = 59,43998$	$a_2 = -2,21036$	$a_3 = 0,02738$
$b_0 = 585,066626$	$b_1 = -63,44639$	$b_2 = 2,29762$	$b_3 = -0,02778$
$c_0 = 9459,53466$	$c_1 = -337,8378$		
$d_0 = 341,252890$	$d_1 = -34,84015$	$d_2 = 1,18687$	$d_3 = -0,01349$

O gráfico da função $\Phi^+(h)$ é mostrado na Figura D-2.

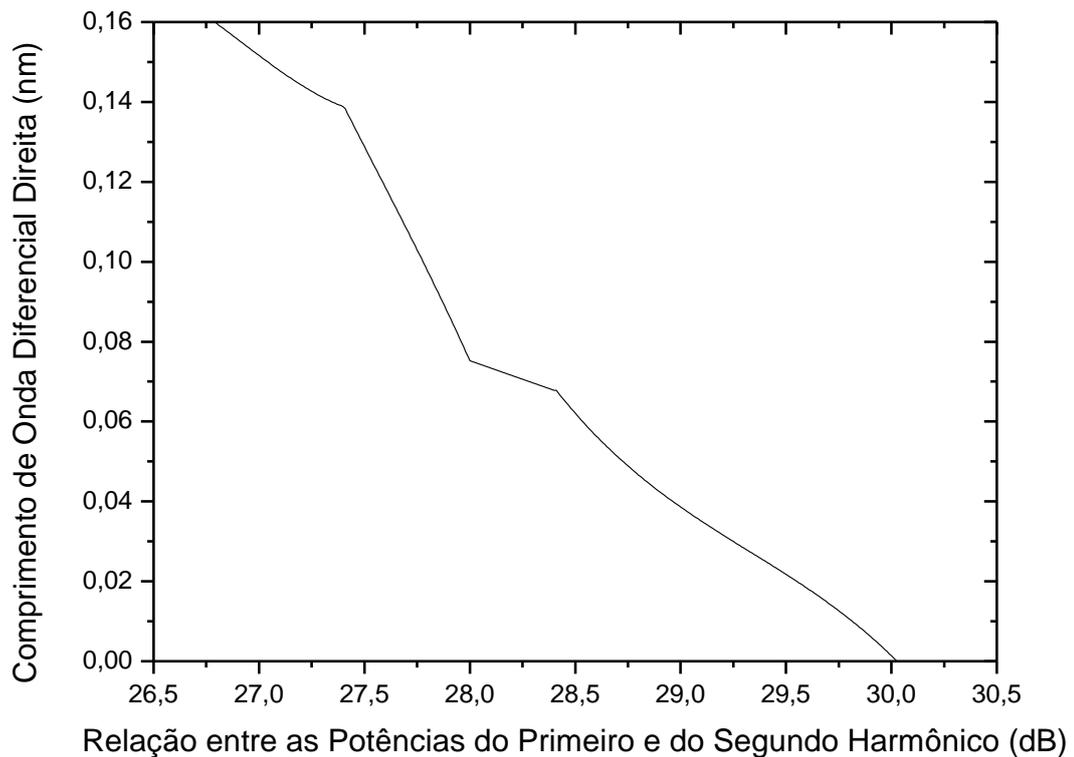


Figura D-2: Função $\Phi^+(h)$, que corresponde ao gráfico da Figura 4-21 do item 4.3.

D3) Função $I(\lambda_L)$

A função $I(\lambda_L)$ é representada na equação:

$$I(\lambda_L) = y_0 + \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{\lambda_L - x_{c1}}{w_1}\right)^2\right] + \frac{A_2}{w_2 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{\lambda_L - x_{c2}}{w_2}\right)^2\right] + \frac{A_3}{w_3 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{\lambda_L - x_{c3}}{w_3}\right)^2\right]$$

$$1550,25 \leq \lambda_L \leq 1550,55$$

Dado:

$y_0 = 1,89113$	$x_{c1} = 1550,21664$	$w_1 = 0,17653$	$A_1 = -0,5773$
	$x_{c2} = 1550,38256$	$w_2 = 0,30931$	$A_2 = -0,36872$
	$x_{c3} = 1550,28203$	$w_3 = 0,07498$	$A_3 = 0,04574$

O gráfico da função $I(\lambda_L)$ é mostrado na Figura D-3.

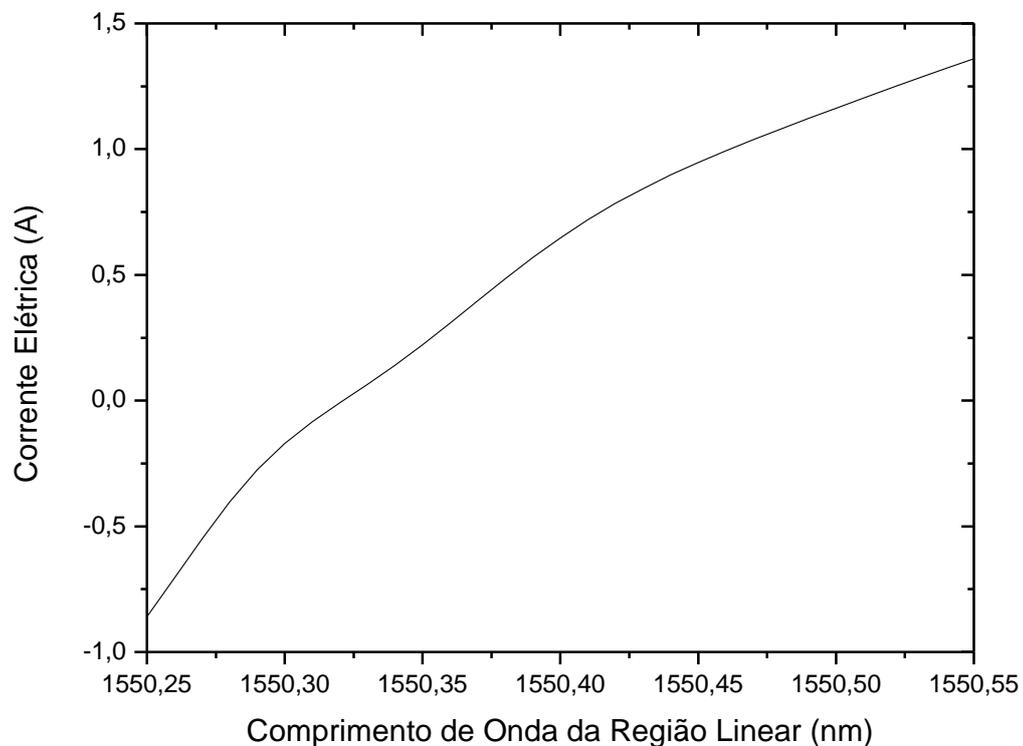


Figura D-3: Função $I(\lambda_L)$, que corresponde ao gráfico da Figura 4-23 do item 4.3.

D4) Função T(i)

A função T(i) é representada na equação:

$$T(i) = \begin{cases} a_0 + a_1 i + a_2 i^2; & -0,8 \leq i \leq -0,12 \\ b_0 + b_1 i; & -0,12 < i \leq 0,04 \\ y_0 + \frac{A_1}{w_1 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{i - x_{c1}}{w_1}\right)^2\right] + \frac{A_2}{w_2 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{i - x_{c2}}{w_2}\right)^2\right] + \frac{A_3}{w_3 \sqrt{\pi/2}} \exp\left[-2 \cdot \left(\frac{i - x_{c3}}{w_3}\right)^2\right]; & 0,04 < i \leq 1,45 \end{cases}$$

Dado:

$a_0 = 36,9$	$b_0 = 38,24281$	$x_{c1} = 0,40382831$	$w_1 = 0,50922$	$A_1 = 1,314985$
$a_1 = 7,499$	$b_1 = 18,48429$	$x_{c2} = 0,89938916$	$w_2 = 0,11631$	$A_2 = 0,05083$
$a_2 = 1,709$	$y_0 = 37,62397$	$x_{c3} = 1,63620835$	$w_3 = 1,20433$	$A_3 = 34,7740$

O gráfico da função T(i) é mostrado na Figura D-4.

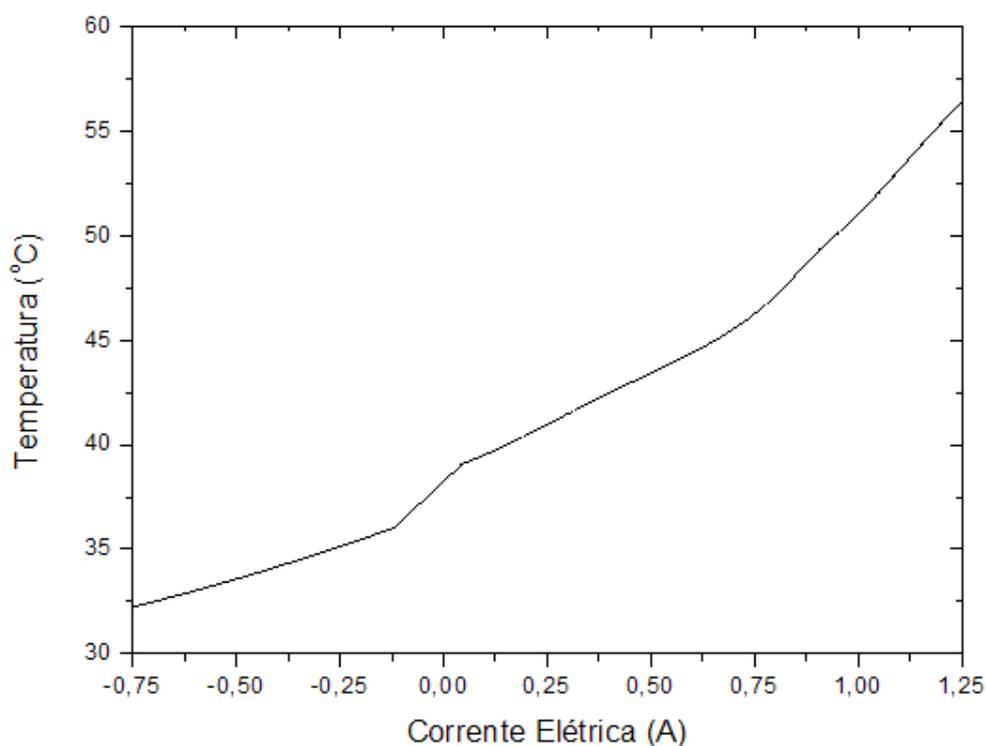


Figura D-4: Função T(i), que corresponde ao gráfico da Figura 4-24 do item 4.4.