



Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação



Departamento de Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Uma nova técnica para caracterização de grades de Bragg em fibra óptica utilizando um método de deconvolução

Alex Dante

Orientador: Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**, na área de **Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica**.

Campinas, SP

Março de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Dante, Alex

D235n Uma nova técnica para caracterização de grades de Bragg em fibra óptica utilizando um método de deconvolução / Alex Dante. – Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Elnatan Chagas Ferreira.

Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Detectores óticos. 2. Eletrônica - Instrumentos digitais. 3. Optoeletrônica. 4. Microeletrônica. I. Ferreira, Elnatan Chagas. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Título em Inglês: A new technique for characterization of Bragg gratings in optical fiber using a deconvolution procedure

Palavras-chave em Inglês: Optical detectors, Electronics - Digital Instruments, Optoelectronics, Microelectronics

Área de concentração: Eletrônica, Microeletrônica e Optoeletrônica

Titulação: Mestre em Engenharia Elétrica

Banca examinadora: Elnatan Chagas Ferreira, Rogério Lara Leite, José Antonio Siqueira Dias

Data da defesa: 30-03-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - TESE DE MESTRADO

Candidato: Alex Dante

Data da Defesa: 30 de março de 2012

Título da Tese: "Uma nova técnica para caracterização de grades de Bragg em fibra óptica utilizando um método de deconvolução"

Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira (Presidente):

Dr. Rogério Lara Leite:

Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias:

*À minha família, à memória dos meus avós, aos meus amigos e a todos
que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui.*

Agradecimentos

Agradeço em primeiro lugar a Deus pela minha vida, minha saúde, e pelas pessoas que Ele têm colocado em meu caminho.

Aos meus pais Olga e Dirceu, por todo o trabalho, carinho e apoio incondicionais nas decisões e momentos difíceis.

Às minhas irmãs Leslie e Gisele, pelo carinho, amizade e companheirismo, sempre.

Aos professores e amigos Prof. Dr. Elnatan Chagas Ferreira e Prof. Dr. José Antonio Siqueira Dias pela oportunidade, atenção, orientação profissional e confiança. Ao professor e amigo Dr. Marco Antonio Robert Alves pelas conversas e experiências transmitidas.

Ao Eduardo e sua equipe do CPqD pelo apoio com as medidas no OSA e empréstimo de equipamentos.

Aos meus amigos do DEMIC: Felipe, Anderson “Kimi”, Jefferson, Rodrigo Bacurau, Alcides, Wellington, Flávio, Pedro, Hugo, Luís, Paulo Ávila, Paulo Soares, Sérgio e Alcino, que em maior ou menor grau, contribuíram para a realização deste trabalho.

À nossa secretária Estér, pela dedicação, carinho e apoio.

À Carmen, do IEAv – CTA, pela fabricação das grades de Bragg.

Aos meus amigos do Instituto de Física “Gleb Wataghin”, Rafael Borges Merlo, Paulo Felipe Jarschel e Aline Parreira Costa, e aos professores Dr. Iakov Veniaminovitch Kopelevitch e Dr. Hugo Luís Fragnito, pelo apoio com instalações e equipamentos e pela doação e empréstimo de materiais.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pelo financiamento.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

(Albert Einstein)

Resumo

Sensores a fibra óptica utilizando grades de Bragg em fibra (*fiber Bragg grating* - FBG) estão se tornando cada dia mais importantes, dada a quantidade de aplicações nas quais vêm sendo empregados.

Algumas das principais características dos sensores a FBG são: imunidade à interferência eletromagnética (EMI), isolamento elétrico, baixo peso, flexibilidade, e transmissão de informações a longa distância. Eles estão sendo empregados na medida de temperatura, deformação, carga, tensão mecânica e vibração. Estão presentes também em estruturas inteligentes, onde sensores a FBG distribuídos são incorporados à estrutura, permitindo a monitoração em tempo real das condições estruturais de pontes, trilhos ferroviários e aviões.

Este trabalho apresenta uma nova técnica de caracterização de FBGs utilizando deconvolução. Nesta técnica, utiliza-se uma FBG sintonizável, cujo perfil de reflexão é bem conhecido, para caracterização de outra FBG, cujo perfil é inicialmente desconhecido. Utilizando placas eletrônicas com componentes de baixo custo, e um software desenvolvido em LabVIEW®, no qual implementamos a deconvolução dos perfis das FBGs, essa técnica permite o levantamento do perfil de reflexão e outros parâmetros, como a largura espectral FWHM (do inglês *Full Width at Half Maximum*) e o comprimento de onda de Bragg λ_B , de uma FBG.

Os resultados obtidos tornaram possível a validação da técnica proposta e permitem concluir que ela é robusta e, com refinamentos matemáticos que podem ser implementados no processo de deconvolução, permite a construção de um caracterizador de FBGs preciso e de custo bem inferior a equipamentos disponíveis comercialmente.

Palavras-chave: Grades de Bragg em Fibra; FBG; Sensores a FBG; Deconvolução; Instrumentação Eletrônica.

Abstract

Optical fiber sensors using fiber Bragg gratings (FBG) are becoming increasingly important, given the amount of applications in which they are being used.

Some of the most important characteristics of FBGs are: electromagnetic interference (EMI) immunity, light weight, flexibility, and long range information transmission. FBG sensors are being used in the measurement of temperature, deformation, load, strain and vibration. They are also being used in smart structures, where several distributed sensing FBGs are embedded in materials to allow for the real-time monitoring of the structural conditions of bridges, railroad tracks and airplanes.

A new technique for the FBGs characterization using deconvolution is presented. In this technique, a tunable FBG, whose reflection spectrum is known, is used to discover another FBGs profile, which is previously unknown. Using low-cost electronic parts and software developed in LabVIEW, which performs the deconvolution of both FBGs spectra, this technique allows the measurement of the FBG reflection spectrum, its FWHM (Full Width at Half Maximum), and the Bragg center wavelength λ_B .

The obtained results enables to validate the proposed technique, allowing concluding that it is robust and, if numerical refinement is implemented, it will be possible to build a low-cost FBG characterization device, in comparison with other commercial devices used for this purpose.

Keywords: Fiber Bragg Gratings; FBG; FBG Sensors; Deconvolution; Electronics Instrumentation.

Lista de Abreviaturas

FBG _{TUN}	– <i>Fiber Bragg Grating Tunable</i> (Grade de Bragg Sintonizável)
FBG _{UT}	– <i>Fiber Bragg Grating Under Test</i> (Grade de Bragg de Teste)
P&D	– Pesquisa e Desenvolvimento
SLED	– <i>Superluminescent Light-Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz Superluminescente)
OSA	– <i>Optical Spectrum Analyzer</i> (Analisador de Espectro Óptico)
FWHM	– <i>Full Width at Half Maximum</i> (Largura Total à Meia-Altura)
EDFA	– <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> (Amplificador à Fibra Dopada com Érbio)
DWDM	– <i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i> (Multiplexação Densa por Divisão de Comprimento de Onda)
ASE	– <i>Amplified Spontaneous Emission</i> (Emissão Espontânea Amplificada)
EMI	– <i>Electromagnetic Interference</i> (Interferência Eletromagnética)
TEM	– <i>Thermoelectric Module</i> (Módulo Termoelétrico ou atuador térmico <i>Peltier</i>)
FFT	– <i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
DFT	– <i>Discrete Fourier Transform</i> (Transformada Discreta de Fourier)
IDFT	– <i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> (Transformada Discreta de Fourier Inversa)
SVD	– <i>Singular Value Decomposition</i> (Decomposição em Valores Singulares)

Lista de Constantes

- n_{eff} – Índice de refração efetivo do núcleo da fibra óptica
- λ_B – Comprimento de onda de Bragg
- Λ – Período da grade de Bragg em fibra
- k – Fator tensão-óptico ou fator de ajuste
- ε_m – Deformação mecânica
- α_s – Coeficiente de expansão térmica do substrato ao qual a FBG está colada
- α_n – Coeficiente de expansão térmica do material da fibra óptica
- α_Λ – Coeficiente termo-óptico

Lista de Figuras

Figura 1.1. Previsão de crescimento do valor global do mercado de sensores a fibra óptica no período 2010-2017 [1].	16
Figura 2.1. Representação esquemática de uma fibra óptica em corte com uma FBG gravada em seu núcleo.	20
Figura 2.2. Efeito da variação de temperatura e deformação mecânica no λ_B de uma FBG.	23
Figura 2.3. Caracterização de uma FBG utilizando uma fonte de espectro largo (SLED) e um circulador óptico ligados a um OSA ou outro dispositivo interrogador de FBGs.	25
Figura 3.1. Representação esquemática da convolução entre os espectros de duas FBGs.	30
Figura 4.1. Simulação de filtragem de sinal senoidal.	40
Figura 4.2. Transformada de Fourier de um sinal de deconvolução (a) sem filtragem, e (b) com filtragem.	41
Figura 4.3. Simulações de convolução e deconvolução com FBG_{TUN} sendo (a) $sinc(x)$, e (b) $tanh(x)$	43
Figura 5.1. Fluxograma do Bloco de Comunicação e Controle.	45
Figura 5.2. Fluxograma do Software de Controle e Aquisição.	46
Figura 5.3. Painel de controle do Software de Controle e Aquisição.	47
Figura 5.4. Módulo de interface.	49
Figura 5.5. Módulo de Controle e Aquisição.	50
Figura 5.6. Colagem da FBG no substrato de zinco.	51
Figura 5.7. Vista explodida de montagem da Caixa Térmica.	52
Figura 5.8. Módulos de Interface, Controle e Aquisição e Caixa Térmica conectados.	53
Figura 5.9. Circuito óptico utilizado na nova técnica para caracterização de FBGs.	54
Figura 5.10. Gráfico da variação $\Delta\lambda_B$ em função da temperatura com a FBG_{TUN} colada no substrato de zinco.	55
Figura 5.11. Perfis de reflexão obtidos no OSA: (a) FBG_{TUN} , e (b) FBG_{UT}	56
Figura 5.12. (a) Perfis de convolução obtidos experimentalmente; (b) Média dos perfis de convolução.	58
Figura 5.13. Painel de controle do Software de Deconvolução.	60

Figura 5.14. (a) Perfis de deconvolução obtidos experimentalmente; (b) Média dos perfis de convolução.....	61
--	----

Sumário

Capítulo 1 - Introdução.....	15
1.1 Contextualização.....	15
1.2 Objetivos e motivações	17
1.3 Estrutura da Dissertação	18
Capítulo 2 - Grade de Bragg em Fibra (FBG)	19
2.1 A FBG e seu funcionamento.....	19
2.1.1 Gravação de FBGs em fibras ópticas	21
2.1.2 Variação do λ_B em função da temperatura e deformação mecânica	22
2.2 Aplicações da FBG ao sensoriamento	24
2.3 Método usual de caracterização de FBGs	25
2.4 Nova técnica proposta para caracterização de FBGs	25
Capítulo 3 - Convolução e Deconvolução de Sinais Ópticos	27
3.1 Convolução e deconvolução	27
3.2 Convolução e deconvolução de sinais ópticos.....	29
3.3 Os problemas de instabilidade da deconvolução	30
3.4 Algumas técnicas de deconvolução no domínio do tempo	32
3.4.1 Análise dos valores singulares da matriz A	33
3.4.2 Regularização da solução por SVD truncada.....	34
3.4.3 Regularização de Tikhonov.....	35
3.4.4 Deconvolução com matrizes Toeplitz	35
3.5 Algumas técnicas de deconvolução no domínio da frequência	36
3.5.1 Filtro passa-baixas.....	36
3.5.2 Filtro Wiener	37
Capítulo 4 - Simulações em LabVIEW®	39
4.1 Visão geral do ambiente de programação	39
4.2 Simulação de filtragem no domínio da frequência	39
4.3 Simulações de convolução e deconvolução	42

Capítulo 5 - Procedimentos e Resultados Experimentais	45
5.1 Bloco de Comunicação e Controle	45
5.1.1 Software de Controle e Aquisição.....	46
5.1.2 Módulo de Interface	48
5.1.3 Módulo de Controle e Aquisição	49
5.1.4 Caixa Térmica	50
5.2 Bloco óptico	53
5.3 Medida do $\Delta\lambda_B$ da FBG _{TUN} colada no substrato de zinco	54
5.4 Levantamento dos perfis de reflexão da FBG _{TUN} e FBG _{UT}	55
5.5 Medidas de convolução	57
5.6 Software de Deconvolução e Resultados	59
Capítulo 6 - Conclusões e Trabalhos Futuros.....	63
6.1 Conclusões	63
6.2 Perspectivas de trabalhos futuros.....	64
Apêndice A – Esquemáticos das placas eletrônicas	65
A1 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Alimentação.....	65
A2 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Parte Analógica.	66
A3 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Parte Digital.....	67
A4 – Esquemático do Módulo de Interface.....	68
Referências Bibliográficas.....	69

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

A concepção e implementação de sistemas complexos adaptados às condições variáveis do ambiente que os cerca, é uma tendência importante no desenvolvimento tecnológico atual. A viabilidade de tais sistemas pressupõe a existência de estruturas de sensoriamento capazes de fornecer informações numa ampla gama de parâmetros e interações.

Como consequência, diversos aspectos relacionados com o estudo de sensores, como novos conceitos de medição, materiais transdutores, sistemas de multiplexação, processamento de sinais e integração, são considerados pilares fundamentais para um progresso tecnológico sustentável.

Há uma grande variedade de princípios físicos e tecnologias que têm sido cada vez mais usados em sensoriamento. Sensores ópticos, principalmente aqueles baseados em fibra óptica, estão se tornando uma referência importante, quando o objetivo é conseguir alto desempenho, operação remota e monitoramento em larga escala. Em muitos casos essa é a única tecnologia aplicável em ambientes com condições severas de operação. É o caso, por exemplo, de ambientes eletromagneticamente ruidosos, aos quais as fibras ópticas são imunes.

Portanto, é natural que em atividades de P&D em sensoriamento a utilização de fibra óptica esteja crescendo a um ritmo acelerado, aumentando dessa forma as oportunidades de exploração comercial.

Segundo dados da empresa *BCC Research Market Forecasting*, o valor global do mercado de sensores intrínsecos a fibra óptica, como os sensores a FBG, tem previsão de crescimento para o ano de 2012 de quase \$ 1,5 bilhões [1]. A Figura 1.1 mostra a projeção para o período 2010-2017.

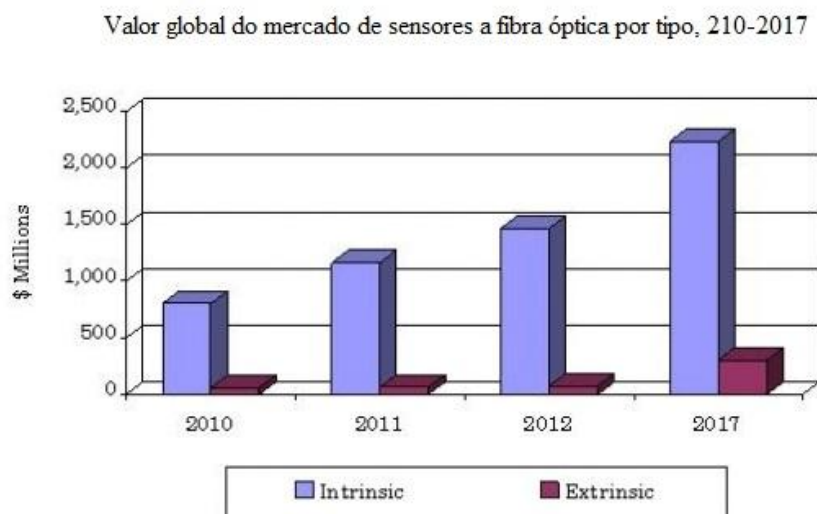


Figura 1.1. Previsão de crescimento do valor global do mercado de sensores a fibra óptica no período 2010-2017 [1].

Dentre as várias classes de sensores a fibra óptica, aqueles baseados em FBG se destacam em aplicações onde sistemas de sensoriamento convencionais têm se mostrado ineficientes. Os principais motivos para aplicação de tais sensores são algumas características inerentes às fibras ópticas, tais como baixo peso, flexibilidade, longa distância de transmissão de informações, baixa reatividade do material, isolamento elétrico e imunidade eletromagnética, sendo essas duas últimas de extrema importância na motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Sensores a FBG são vantajosos em relação aos convencionais principalmente porque a informação medida está contida no comprimento de onda de Bragg (λ_B), que independe de flutuações na intensidade da luz da fonte utilizada, tampouco de perdas ocasionadas por conectores ou outros fatores.

Outra vantagem é que sensores a FBG não requerem alimentação elétrica, portanto podem ser utilizados em locais onde há risco de explosão. Além disso, seu baixo índice de perda por inserção (IL) e banda estreita de reflexão (FBGs com FWHM de 0,2 nm estão disponíveis

comercialmente) permitem a multiplexação de vários sensores na mesma fibra óptica, inclusive cada um medindo grandezas diferentes ao longo da mesma fibra sensora. Outras vantagens, como imunidade à interferência eletromagnética (EMI), leveza, flexibilidade, estabilidade e tolerância a altas temperaturas tornam possível a reprodutibilidade e confiabilidade das medidas.

1.2 Objetivos e motivações

Quando se necessita caracterizar uma FBG, a fim de determinar parâmetros como seu o perfil de reflexão, FWHM, refletividade, λ_B , entre outros, diversas técnicas podem ser empregadas [2].

Na maioria dos casos, o procedimento mais comum é a utilização de uma fonte luminosa de espectro largo (ASE, SLED, etc.), acoplada à FBG e a um OSA. Porém este último é um equipamento que conta com eletrônica de grande precisão e utiliza técnicas sofisticadas de interferometria, além de ser um equipamento de uso muito mais geral, tornando-o caro para esse tipo de aplicação específica.

Há também no mercado instrumentos especificamente destinados à caracterização de componentes ópticos passivos, como FBGs. Tais instrumentos contam também, em sua maioria, com fontes de luz baseadas em lasers e interferometria de alta tecnologia e precisão, o que também os torna caros.

Nesse sentido, propomos neste trabalho uma nova técnica de caracterização de FBGs baseada na convolução entre os perfis de reflexão de duas FBGs, uma cujo perfil deve ser bem conhecido, e outra cujo perfil se quer descobrir. O perfil dessa última é determinado fazendo-se a deconvolução dos perfis, utilizando para isso técnicas de processamento de sinais. A implementação dessa técnica possibilita a construção de um protótipo de caracterizador e interrogador de FBGs muito preciso, que pode eliminar a utilização de equipamentos comerciais específicos para esse fim, a um custo dezenas de vezes menor, o que o torna uma excelente alternativa para uso em laboratórios de fotônica e optoeletrônica. Além disso, pode ser útil também em laboratórios de ensino, onde os recursos são geralmente limitados.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 é feita uma breve introdução à FBG e à teoria acerca de seu funcionamento. É feita também uma revisão da técnica mais usual de determinação do perfil de reflexão e caracterização de uma FBG. Em seguida é apresentada a nova técnica proposta neste trabalho.

No Capítulo 3 é apresentado o embasamento teórico acerca de FBGs necessário para uma melhor compreensão deste trabalho. Nesse capítulo o leitor verá também como se dá a convolução entre sinais ópticos dos perfis de reflexão de duas FBGs e terá uma visão da problemática da deconvolução numérica e das técnicas usadas na supressão dos problemas encontrados.

No Capítulo 4 é apresentado ao leitor o ambiente de programação gráfica em LabVIEW®, e são apresentadas simulações de uma técnica de filtragem de sinais e a aplicação do filtro simulado a um problema real de deconvolução numérica utilizando dados experimentais.

No Capítulo 5 são apresentados os procedimentos experimentais utilizados, desde o manuseio e preparação das FBGs utilizadas até a aquisição, processamento e análise dos resultados.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões baseadas nos resultados experimentais obtidos e são dados os caminhos que serão seguidos para a continuidade da pesquisa nesse assunto em trabalhos futuros.

Nos Apêndices, o leitor terá acesso a um material complementar que foi indispensável à realização deste trabalho de pesquisa.

Capítulo 2

Grade de Bragg em Fibra (FBG)

2.1 A FBG e seu funcionamento

A fotossensibilidade de fibras ópticas foi descoberta por Ken Hill *et al.* no Centro Canadense de Pesquisas em Comunicações em 1978 durante experimentos usando fibras ópticas de sílica dopadas com germânio e usando laser de íons de argônio como radiação.

Na época, notou-se que a intensidade da luz refletida no fim da fibra, que representava 4% da luz emitida pela fonte, formava com a luz incidente um padrão de interferência estacionário no núcleo da fibra. Esse fenômeno provocava a formação de um padrão de modulação do índice de refração do núcleo da fibra, o que caracteriza uma FBG.

Em sua forma mais simples, portanto, uma FBG consiste de uma modulação periódica no índice de refração do núcleo da fibra óptica, conforme ilustrado na Figura 2.1 [3].

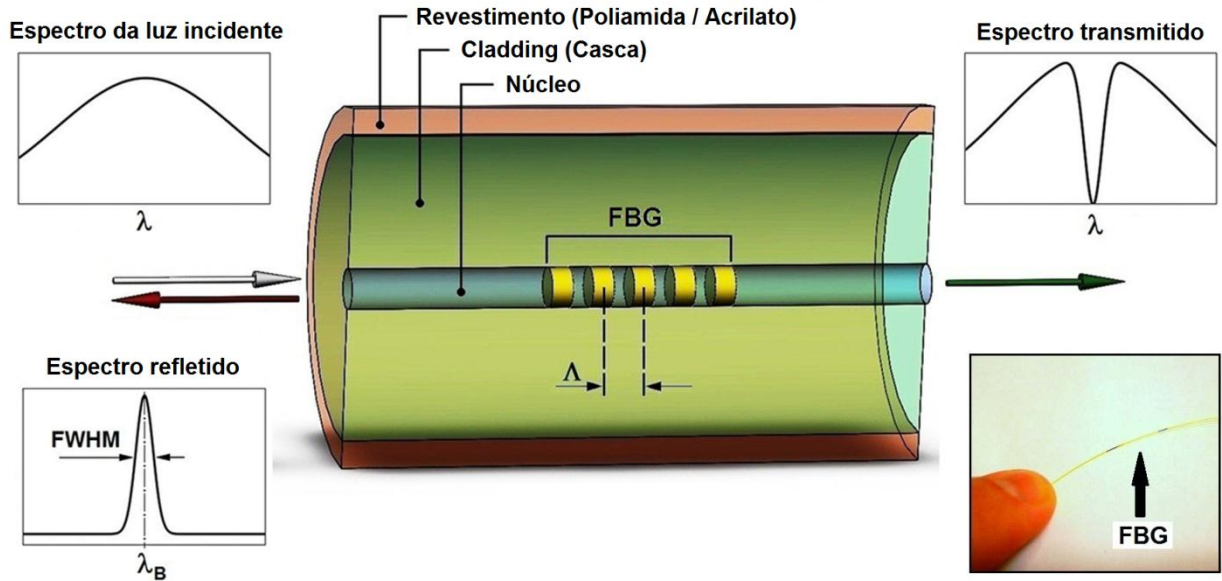


Figura 2.1. Representação esquemática de uma fibra óptica em corte com uma FBG gravada em seu núcleo.

A Figura 2.1 mostra esquematicamente uma fibra óptica em corte, seu núcleo com a FBG nele inscrita, a casca e o revestimento. São também mostrados espectros típicos de reflexão e transmissão de uma FBG a partir de um dado espectro de luz incidente. No detalhe, uma FBG comercial geralmente fica entre duas marcações indicadas na fibra óptica.

O índice de refração de uma FBG uniforme em uma fibra óptica cujo núcleo possui índice de refração n_0 é dado pela Equação (2.1) [4]:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.1)$$

onde:

Δn é a variação no índice de refração do núcleo da fibra (valores típicos de 10^{-5} a 10^{-3});

z é a distância ao longo do eixo longitudinal da fibra;

Λ é o período da grade (distância física entre os planos).

Para cada pico de intensidade na modulação do índice de refração (n_{\max}) do núcleo da fibra óptica, dada pela Equação (2.1), há um plano da grade. A luz, guiada através do núcleo da fibra, é parcialmente refletida em cada um desses planos.

Ao aplicar as condições de conservação de energia e *momentum* na reflexão das frentes de onda em cada plano da grade (condição de Bragg), há dois resultados possíveis: quando a condição de Bragg não é satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente da grade progressivamente se cancela por interferência destrutiva; quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições das reflexões em cada plano se interferem construtivamente, gerando um pico de reflexão em um determinado comprimento de onda λ_B (comprimento de onda de Bragg), que é definido pelos parâmetros de construção da FBG, conforme a Equação (2.2) [3], [4]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.2)$$

onde:

λ_B é o comprimento de onda central da luz refletida pela FBG;

Λ é o espaçamento físico entre os planos da grade (período da grade);

n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra para o comprimento de onda central da luz incidente.

2.1.1 Gravação de FBGs em fibras ópticas

FBGs são gravadas no núcleo de fibras ópticas monomodo, que possuem diâmetro externo (*cladding*) de 125 μm e diâmetro do núcleo de aproximadamente 9 μm , ambos de SiO_2 de alta pureza.

O núcleo da fibra possui índice de refração mais alto que o da casca devido à dopagem com germânio. Essa diferença entre os índices de refração faz com que a luz se propague somente pelo núcleo da fibra. Externamente há ainda um revestimento, geralmente de acrilato ou poliamida, que protege a fibra especialmente contra água e hidrogênio, que causam a degradação mecânica do material.

A gravação da FBG no núcleo da fibra requer a remoção deste revestimento, o que torna o processo lento e delicado [3], [5].

As FBGs podem ser classificadas em dois tipos com relação à forma como são gravadas no núcleo da fibra: interna e externamente gravadas. Técnicas de gravação interna são mais

antigas e pouco práticas. Atualmente as técnicas mais empregadas são as de gravação externa, dentre as quais se destacam: técnica de gravação interferométrica, técnica de gravação ponto a ponto, e técnica de gravação por máscara de fase.

É importante destacar que a FBG pode ser gravada no núcleo da fibra sem prejuízo para a resistência mecânica do material. Isso permite a gravação de várias FBGs numa mesma fibra, permitindo a construção de uma rede de sensores quasi-distribuídos para sensoriamento com relativa facilidade e baixo custo [4].

É possível obter FBGs com refletividade de quase 100%, e com FWHM entre 0,1 nm a 100 nm. Essas características fazem com que a FBG seja adequada à aplicação em telecomunicações, onde são usadas para refletir, filtrar ou dispersar a luz [4].

2.1.2 Variação do λ_B em função da temperatura e deformação mecânica

Os planos de uma FBG bem como o material do núcleo da fibra são sensíveis a variações de temperatura e deformação mecânica, o que provoca a dependência de λ_B com tais grandezas.

Uma variação externa na condição mecânica ou térmica imposta à fibra óptica, especificamente no local onde se encontra a FBG, pode ser medida com a variação do λ_B através de técnicas de interrogação.

A fim de verificar o deslocamento $\Delta\lambda_B$ devido à influência da variação de temperatura e de estresse mecânico na FBG, aplica-se o operador diferencial na Equação (2.2), e chega-se à Equação (2.3):

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2.3)$$

onde n_{eff} e Λ são funções da temperatura e do comprimento¹.

O primeiro e segundo termos da Equação (2.3) representam os efeitos da deformação mecânica e da temperatura, respectivamente, na variação de $\Delta\lambda_B$.

¹ Tanto n_{eff} como Λ são variáveis de deformação mecânica (tração ou compressão), que resulta em variação do

Portanto, um aumento na temperatura da FBG faz com que seu λ_B seja deslocado para a direita no espectro, enquanto uma diminuição na temperatura provoca um deslocamento de λ_B para a esquerda. O mesmo fenômeno ocorre para tração e compressão mecânicas no sentido longitudinal da fibra, conforme ilustrado na Figura 2.2.

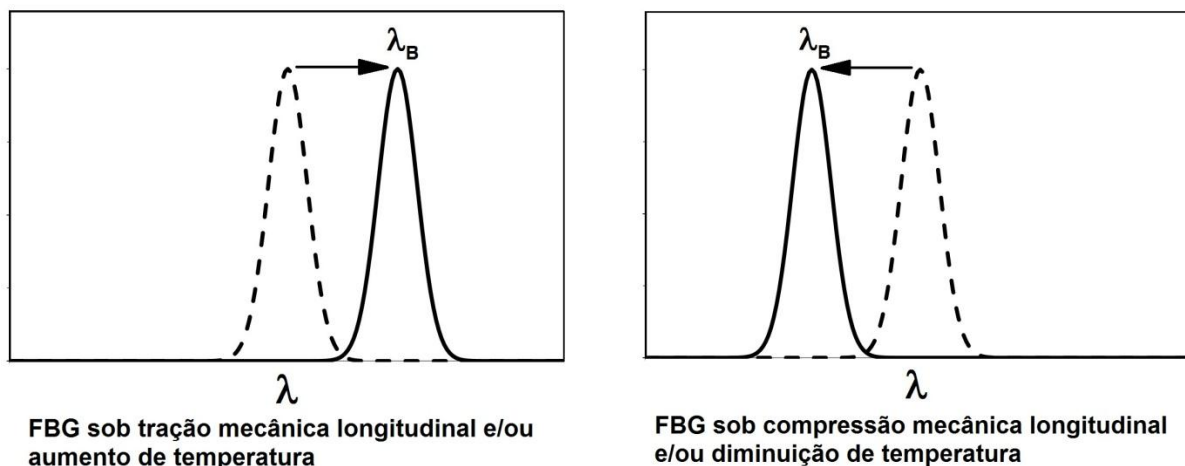


Figura 2.2. Efeito da variação de temperatura e deformação mecânica no λ_B de uma FBG.

Para uma FBG com padrão de modulação uniforme do índice de refração do núcleo, inscrita numa fibra óptica monomodo típica [6], as contribuições da variação de temperatura e deformação mecânica longitudinal para um valor de λ_B centrado em 1550 nm são de aproximadamente $13,7 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$ e $1,2 \text{ pm } \mu\epsilon^{-1}$, respectivamente [4].

Para valores maiores de variação do λ_B de uma FBG é necessário recorrer a outros métodos. Um deles é fixar rigidamente a FBG a um material cujo coeficiente de expansão térmica é maior que o da própria fibra óptica. A medida e controle precisos de temperatura são relativamente fáceis de conseguir, porém esta abordagem tem a desvantagem de ser lenta, pois o conjunto FBG + substrato de expansão térmica + sensor de temperatura deve estar em equilíbrio térmico a cada medida.

Outra forma, mais rápida, é empregar transdutores piezoelétricos multicamadas [7] na deformação longitudinal da FBG, com a consequente variação no seu λ_B . Esta abordagem, por sua vez, apresenta um custo elevado em relação à abordagem térmica.

Portanto, embora uma resposta mais rápida do sistema possa ser conseguida com a utilização de transdutores piezoelétricos, optou-se neste trabalho por utilizar o método térmico de excursão do λ_B da FBG_{TUN}.

A partir da Equação (2.3) pode-se obter a variação $\Delta\lambda_B$ para o caso específico em que uma FBG está rigidamente fixa a um substrato, que pode sofrer expansão térmica ou mecânica levando consigo a FBG [4], [5]:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k\varepsilon_m + (k\alpha_s + \alpha_\delta)\Delta T \quad (2.4)$$

onde:

$k \cong 0,78$ é o fator tensão-óptico (também chamado constante de ajuste);

ε_m é a deformação mecânica da FBG;

α_s é o coeficiente de expansão térmica do substrato ao qual a FBG está colada;

$\alpha_\delta = \alpha_n + \alpha_\Lambda$, onde α_n e α_Λ são os coeficientes de expansão térmica da fibra óptica e o coeficiente termo-óptico, respectivamente, com $\alpha_n = 8,6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, e $\alpha_\Lambda = 0,55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ [4], e ΔT é a variação de temperatura em Kelvin.

2.2 Aplicações da FBG ao sensoriamento

Sensores a fibra óptica, especialmente aqueles utilizando FBG, têm se tornado uma ótima escolha para a grande variedade de aplicações em sensoriamento devido à vantagem de serem imunes à interferência eletromagnética (EMI).

Sensores a FBG são atualmente empregados na medida de temperatura [4], [8], deformação, carga/força², tração e compressão mecânicas, vibração, aceleração, ondas ultrassônicas, pressão e campos magnéticos dinâmicos [4]. São também empregados em medidas indiretas de tensão [9] e corrente elétrica [10].

² Para medidas de aceleração, ondas ultrassônicas e força, em todas as aplicações estas grandezas são convertidas em estresse mecânico da FBG, que então é medido levando-se em conta a Equação (2.4) [4].

Estão presentes também em estruturas inteligentes, onde sensores a FBG distribuídos e incorporados à estrutura permitem a monitoração em tempo real das condições estruturais de pontes, trilhos ferroviários e aviões. Tais sensores baseiam-se em sua maioria na detecção do deslocamento $\Delta\lambda_B$, induzido pela variação das grandezas físicas medidas.

2.3 Método usual de caracterização de FBGs

Para caracterizar uma FBG determinando seu perfil de reflexão, λ_B , FWHM, entre outros parâmetros, utiliza-se em geral uma fonte óptica de banda larga acoplada a um circulador óptico e a um OSA, conforme esquematizado na Figura 2.3.

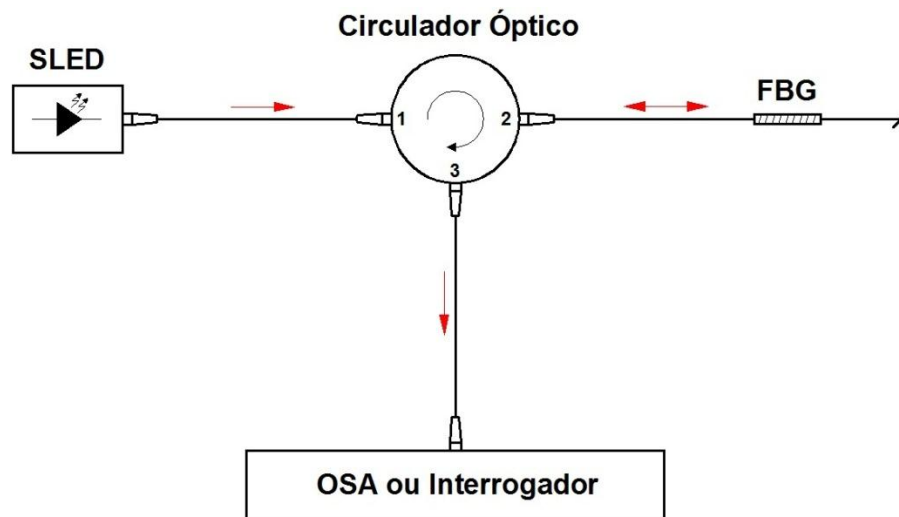


Figura 2.3. Caracterização de uma FBG utilizando uma fonte de espectro largo (SLED) e um circulador óptico ligados a um OSA ou outro dispositivo interrogador de FBGs.

O OSA é um aparelho destinado à caracterização de fontes ópticas, FBGs, amplificadores ópticos, análise de redes DWDM, caracterização de EDFAs, entre outras funções. Com uma grande gama de recursos, trata-se de um aparelho de elevado custo (da ordem de US\$ 30 mil) quando comparado aos demais componentes da montagem.

2.4 Nova técnica proposta para caracterização de FBGs

A fim de caracterizar uma FBG eliminando o componente de maior custo (OSA ou interrogadores comerciais), propõe-se aqui uma técnica para caracterização de FBGs baseada no uso de uma FBG de referência sintonizável, cujas características são bem conhecidas, e outra

desconhecida, acopladas a uma eletrônica de aquisição de dados através de um circuito óptico, que será mostrado e detalhado nos próximos capítulos.

O princípio de funcionamento dessa topologia é baseado na deconvolução dos perfis ópticos de reflexão das duas FBGs.

Nesta técnica, o feixe de luz proveniente de uma fonte de espectro largo é refletido por uma FBG, cujo perfil de reflexão deseja-se obter (FBG_{UT} – *under test*). O espectro de reflexão da FBG_{UT} é então usado como fonte luminosa para outra FBG, cujo perfil é bem conhecido (FBG_{TUN} – *tunable*). Fazendo com que o espectro de reflexão da FBG_{TUN} excursione através do espectro da FBG_{UT} , cujo λ_B é mantido fixo, obtém-se a convolução de ambos os perfis de reflexão [2]. Faz-se a aquisição desses dados, que são então processados em um PC, e obtém-se pela deconvolução o espectro de reflexão da FBG_{UT} , antes desconhecido.

Essa abordagem experimental diminui em dezenas de vezes o custo da aquisição do perfil de uma FBG.

Mais detalhes acerca desta proposta são discutidos nos capítulos seguintes.

Capítulo 3

Convolução e Deconvolução de Sinais Ópticos

3.1 Convolução e deconvolução

Quando um feixe de luz incide numa FBG, se a condição de Bragg é satisfeita, há a reflexão de parte do espectro de volta na fibra, com um perfil de reflexão específico. Se fizermos esse perfil de reflexão incidir em outra FBG, cujo λ_B esteja sintonizado com o da primeira, o perfil de reflexão final obtido será a convolução dos perfis de reflexão de ambas [2].

A convolução é uma operação matemática entre duas funções que gera uma terceira função. É a técnica mais importante em processamento digital de sinais e é muito empregada no processamento digital de imagens [11], [12].

Dadas duas funções contínuas $x(t)$ e $h(t)$, com transformadas de Fourier $X(j\omega)$ e $H(j\omega)$, respectivamente, a convolução $y(t) \equiv x(t) * h(t)$ é definida pela Equação (3.1) [13], [14]:

$$x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (3.1)$$

onde t e τ são variáveis temporais.

Uma propriedade importante da convolução é a comutatividade, ou seja, $x(t) * h(t) = h(t) * x(t)$.

A partir de manipulação matemática da Equação (3.1) com a aplicação da definição da transformada de Fourier [13], [14], conclui-se que:

$$x(t) * h(t) = \mathcal{F}^{-1}[X(j\omega)H(j\omega)] \quad (3.2)$$

onde $j^2 = -1$.

Em outras palavras, a convolução de duas funções é igual à transformada de Fourier inversa do produto das suas transformadas de Fourier. Podemos manipular a Equação (3.2) e obter o importante resultado [13]:

$$h(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[x(t) * h(t)]}{X(j\omega)} \right] \quad (3.3)$$

Isto é, podemos obter $h(t)$ conhecendo a convolução $x(t) * h(t)$ e a função $X(j\omega)$, que é a transformada de Fourier de $x(t)$. A operação dada pela Equação (3.3) é uma das formas de se obter $h(t)$ pela deconvolução³.

A convolução também está definida para funções discretas. Dados dois sinais discretos $x[n]$ com N pontos de 1 a N , e $h[n]$ com M pontos de 1 a M , a convolução $y[n] = x[n] * h[n]$ é um terceiro sinal discreto com $N + M - 1$ pontos dado por [12]:

$$y[i] = \sum_{j=1}^M x[i-j]h[j] \quad (3.4)$$

Em outras palavras, cada ponto $y[i]$ da convolução é dado pelo somatório do produto $h[j]x[i-j]$, com j variando de 1 a M . A cada novo incremento em i , portanto, o resultado é um novo somatório dos produtos dos pontos das funções $x[n]$ e $h[n]$.

Utilizando a transformada discreta de Fourier (DFT) de $y[n]$, que indicaremos por $\text{DFT}(y)$, pode-se manipular a Equação (3.4) e chegar ao seguinte resultado [15]:

³ Ao contrário da convolução, a operação de deconvolução não tem definição matemática direta que não seja o inverso da Equação (3.1) ou da Equação (3.2), o que é dado pela Equação (3.3) [17].

$$\text{DFT}(y) = \text{DFT}(x) \otimes \text{DFT}(h) \quad (3.5)$$

onde o símbolo “ \otimes ” denota o *produto ponto-a-ponto*⁴ dos vetores $\text{DFT}(x)$ e $\text{DFT}(h)$, tal que os elementos resultantes sejam $\text{DFT}(y_i) = \text{DFT}(x_i)\text{DFT}(h_i)$.

A partir da Equação (3.5) pode-se então determinar a sequência discreta $h[n]$ através da transformada discreta de Fourier inversa (IDFT) [15]:

$$h = \text{IDFT}(\text{DFT}(y) \oslash \text{DFT}(x)) \quad (3.6)$$

onde o símbolo “ \oslash ” denota a *divisão ponto-a-ponto* dos vetores $\text{DFT}(y)$ e $\text{DFT}(x)$, tal que os elementos resultantes sejam $h_i = \text{IDFT} [\text{DFT}(y_i) / \text{DFT}(x_i)]$. A Equação (3.6) é a forma discreta, portanto, da Equação (3.3). Ambas descrevem a deconvolução no domínio da frequência.

As transformadas de Fourier e suas inversas podem ser calculadas numericamente com grande eficiência utilizando FFT (*Fast Fourier Transform*) [15].

Apesar de as Equações (3.3) e (3.6) definirem formalmente a deconvolução de sinais contínuos e discretos, respectivamente, não existe esquema computacional para o cálculo dessas equações e obtenção das soluções exatas de forma trivial, como será discutido mais adiante [15].

3.2 Convolução e deconvolução de sinais ópticos

Vamos agora aplicar a teoria acima ao propósito deste trabalho. Suponhamos que os espectros de reflexão de duas FBGs sejam teoricamente dados pelas funções $x(\lambda)$ e $h(\lambda)$, e a convolução entre eles seja $y(\lambda) \equiv x(\lambda) * h(\lambda)$, onde a variável temporal t foi substituída pela variável espacial λ (comprimento de onda da luz no núcleo da fibra óptica). Suponhamos também que $x(\lambda)$ e a convolução $y(\lambda)$ sejam conhecidas. Podemos então aplicar a operação de deconvolução dada pela Equação (3.3) para encontrar $h(\lambda)$.

⁴ O *produto ponto-a-ponto* (em inglês *pointwise product* ou *element-wise product*) não deve ser confundido com o *produto escalar* entre dois vetores, comumente denotado pelo símbolo “ \cdot ”, tampouco com o *produto vetorial* entre dois vetores, comumente denotado pelos símbolos “ \times ” ou “ \wedge ”.

Em outras palavras, basta conhecer o espectro de reflexão de uma FBG e a convolução dos dois espectros e aplicar a operação de deconvolução para obter o espectro de reflexão da outra FBG.

Conforme mostrado esquematicamente na sequência da Figura 3.1, mantendo uma FBG (chamada FBG de teste, FBG_{UT}), com o λ_B fixo, e variando o λ_B da outra FBG (chamada FBG sintonizável, FBG_{TUN}), ao longo de todo o espectro da FBG_{UT} , a luz refletida por esta última corresponde à convolução entre ambos os espectros. O λ_B da FBG_{UT} pode ser mantido fixo através de um preciso controle da temperatura da FBG_{UT} .

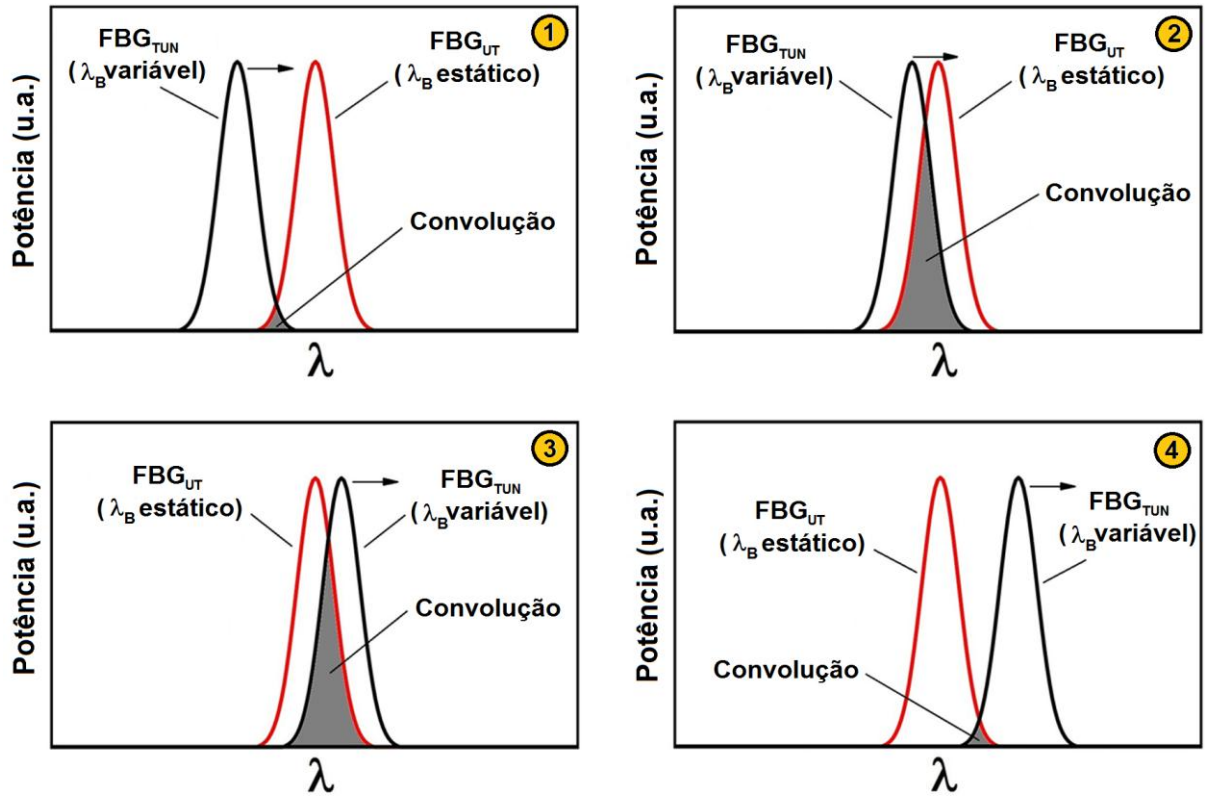


Figura 3.1. Representação esquemática da convolução entre os espectros de duas FBGs.

3.3 Os problemas de instabilidade da deconvolução

A Equação (3.1) é uma equação integral de Fredholm linear do primeiro tipo com *kernel* $K(t, \tau) = x(t - \tau)$ e que possui propriedades pouco agradáveis do ponto de vista de sua solução. Uma solução para este tipo de equações raramente pode ser encontrada analiticamente.

Frequentemente, em situações práticas, uma aproximação confiável tampouco pode ser encontrada, uma consequência de suas propriedades [16].

Na prática, a função $y(t)$ na Equação (3.1) frequentemente representa dados experimentais obtidos como um pequeno conjunto de medidas que contém erros experimentais. O *kernel* $K(t, \tau)$ geralmente representa a resposta do equipamento experimental e em muitos casos é conhecido analiticamente a partir de um modelo teórico proveniente da teoria por trás do experimento; em outros, é também obtido experimentalmente e contém erros experimentais, mas em geral é uma função bem conhecida com alto grau de precisão e com muitos pontos.

Uma das propriedades das equações integrais de Fredholm do primeiro tipo é que a integração de $x(t - \tau)$ com $h(t)$ é uma operação de “suavização”, isto é, $y(t)$ é em geral mais lisa (ou mais bem comportada) que $h(t)$. No procedimento inverso, isto é, o cálculo de $h(t)$ a partir de $y(t)$ – cálculo da deconvolução – pode-se esperar uma amplificação das componentes em altas frequências de $h(t)$ [15], [16].

Na prática, isso significa que uma pequena variação nos dados causada por erros experimentais provoca uma grande variação na solução do problema. Daí a instabilidade da solução para $h(t)$ e sua classificação como um problema que em matemática é chamado “mal-posto” e cujo estudo pertence à teoria de “Problemas Inversos” [16].

Idealmente, com o conhecimento exato e completo das funções contínuas $y(t)$ e $x(t)$ a deconvolução pode ser obtida de forma exata para encontrar $h(t)$. O mesmo vale para os sinais discretos $y[n]$, $x[n]$ e $h[n]$. Entretanto, os erros experimentais e aproximações numéricas que contribuem com erros de arredondamento pequenos, mas não nulos, tornam o processo de deconvolução instável e praticamente impossível de se obter de forma direta.

Isso pode ser constatado observando que a deconvolução a partir das Equações (3.3) e (3.6) envolve uma operação de divisão extremamente sensível, principalmente nos pontos em que o valor de $X(j\omega)$ é muito pequeno no caso da Equação (3.3), ou quando $\text{DFT}(x_i)$ é muito pequeno no caso da Equação (3.6), o que torna seu cálculo extremamente instável.

A Equação (3.3) traz a deconvolução no domínio da frequência fazendo uso da transformada de Fourier. No domínio do tempo (ou do comprimento de onda λ) a deconvolução é calculada diretamente a partir da Equação (3.4) na forma matricial pela solução de um sistema de

equações lineares. Em ambos, os problemas numéricos descritos acima estão igualmente presentes, e para soluções numéricas, somente uma solução aproximada para $h(t)$ pode ser encontrada. Isso é feito através de várias técnicas diferentes [17].

Há uma vasta literatura tratando do problema da instabilidade da deconvolução [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Alguns trabalhos empregam técnicas de filtragem que visam à redução dos erros introduzidos pelo cálculo no domínio da frequência [22]. Tais técnicas são muito empregadas no processamento digital de imagens [11].

3.4 Algumas técnicas de deconvolução no domínio do tempo⁵

A fim de tratar numericamente uma equação integral de Fredholm do primeiro tipo, tal como a Equação (3.5), há vários métodos de discretização disponíveis. Para mostrar algumas técnicas de deconvolução no domínio do tempo, exemplificamos aqui usando um método da quadratura.

A regra da quadratura para cálculo de uma integral definida tem a forma [15]:

$$\int_0^1 \varphi(\tau) d\tau \simeq \sum_{j=1}^n w_j \varphi(\tau_j) \quad (3.7)$$

onde τ_1, \dots, τ_n são as abscissas e w_1, \dots, w_n são seus respectivos pesos para uma dada regra da quadratura.

Desta forma, podemos aproximar a integral da equação integral de Fredholm do primeiro tipo da seguinte forma [15]:

$$\int_0^1 K(t, \tau) h(\tau) d\tau \simeq \sum_{j=1}^n w_j K(t, \tau_j) \tilde{f}(\tau_j) \quad (3.8)$$

onde $\tilde{f}(t_j) = f(t_j) + e_j$ é a função exata $f(t_j)$ acrescida do respectivo erro experimental e_j de aproximação na j -ésima amostra.

⁵ Todo o tratamento desenvolvido para o domínio do tempo (na variável t) é igualmente válido para o domínio do espaço (na variável λ).

A fim de chegar a um sistema de equações lineares, o lado direito da Equação (3.8) precisa se igualar a cada um dos pontos da função $y(t)$ para cada t_1, \dots, t_m :

$$\sum_{j=1}^n w_j K(t_i, \tau_j) \tilde{f}(\tau_j) = y(t_i) \quad (3.9)$$

com $i, j = 1, \dots, n$.

Reescrevendo a Equação (3.9) em forma matricial ⁶ temos:

$$\begin{bmatrix} w_1 K(s_1, t_1) & \cdots & w_n K(s_1, t_n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 K(s_n, t_1) & \cdots & w_n K(s_n, t_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{f}(\tau_1) \\ \vdots \\ \tilde{f}(\tau_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(t_1) \\ \vdots \\ y(t_n) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ou simplesmente $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, onde \mathbf{A} é a matriz $n \times n$ da Equação (3.10).

A solução para \mathbf{x} é obtida então por $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$.

Entretanto, a simples inversão da matriz \mathbf{A} não garante que a solução desse sistema seja sequer parecida com a solução correta, quando o vetor \mathbf{b} , cujos elementos constituem os pontos experimentais da função $y(t)$, está sujeito a perturbações provenientes de erros experimentais.

A seguir são descritas algumas técnicas de estabilização de soluções de equações integrais de Fredholm do primeiro tipo.

3.4.1 Análise dos valores singulares da matriz \mathbf{A}

A decomposição em valores singulares (SVD) é muito utilizada na análise dos elementos da matriz \mathbf{A} e da solução de uma equação integral de Fredholm do primeiro tipo [15].

A SVD é definida para qualquer matriz $n \times m$ da seguinte forma:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T = \sum_{i=1}^n u_i s_i v_i^T \quad (3.11)$$

onde as matrizes $\mathbf{U}_{m \times m}$ e $\mathbf{V}_{n \times n}$ são ortogonais ⁷ e $\mathbf{S}_{m \times n}$ é diagonal, cujos elementos s_i são os valores singulares de \mathbf{A} . Além disso, tais elementos são unicamente determinados e satisfazem a relação $s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_n \geq 0$.

⁶ Usamos aqui a seguinte notação: letras maiúsculas para matrizes e minúsculas para vetores, ambos em negrito.

Pode ser mostrado que, a partir da SVD da matriz \mathbf{A} , a solução “direta” (no sentido de ser mais facilmente implementada) para a equação $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$ é dada por [15]:

$$\mathbf{x}_{direta} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^T \mathbf{b}}{s_i} v_i \quad (3.12)$$

Exemplos numéricos estudados em [15] mostram que para valores menores dos índices i , os componentes $u_i^T \tilde{\mathbf{b}}$ (onde $\tilde{\mathbf{b}} = \mathbf{b} + \mathbf{e}$, onde \mathbf{e} é o vetor contendo os erros experimentais) são dominados pelos componentes exatos $u_i^T \mathbf{b}$, enquanto que para índices i maiores ocorre o inverso, isto é, os erros dominam os valores exatos da solução na Equação (3.12). Nesta região, portanto, a informação acerca da solução é perdida, devido ao ruído gerado. Além disso, o número de componentes do vetor \mathbf{b} sobrepostas por ruído aumenta com o aumento do nível de ruído.

Consequentemente, somente uma parte inicial das componentes $u_i^T \tilde{\mathbf{b}}/s_i$ da solução “direta” dada pela Equação (3.12) carrega informação correta sobre a solução desejada [15].

3.4.2 Regularização da solução por SVD truncada

A fim de estabilizar a solução da equação integral, uma abordagem simples utilizada é a SVD truncada, isto é, a decomposição em valores singulares da matriz \mathbf{A} é truncada a fim de eliminar parte das componentes $u_i^T \tilde{\mathbf{b}}/s_i$ que contém mais ruído do que informação acerca da solução desejada. Desta forma, a solução é dada por [15]:

$$\mathbf{x}_k = \sum_{i=1}^n \frac{u_i^T \mathbf{b}}{s_i} v_i \quad (3.13)$$

onde o parâmetro de truncamento k deve ser escolhido adequadamente a fim de aproximar ao máximo a solução \mathbf{x}_k da solução exata \mathbf{x} .

É importante salientar, no entanto, que essa técnica é útil somente quando é viável a obtenção da SVD da matriz \mathbf{A} , o que ocorre para problemas de pequeno porte. Conforme a matriz se torna maior, torna-se impraticável a aplicação desta técnica.

⁷ Uma matriz \mathbf{M} é ortogonal se $\mathbf{M}^T \mathbf{M} = \mathbf{I}$.

3.4.3 Regularização de Tikhonov

A ideia por trás desta técnica é aceitar valores residuais não nulos de $\mathbf{Ax} - \mathbf{b}$, ao contrário da técnica de SVD truncada, e em troca obter uma norma menor da solução, isto é, os valores residuais que antes eram descartados, agora são considerados, mas com uma norma menor, dada por [15]:

$$\min\{\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{x}\|_2^2\}, \quad (3.14)$$

onde o parâmetro de regularização λ controla o peso dado para a minimização da norma⁸ da solução $\|\mathbf{x}\|_2$ relativa à minimização da norma residual $\|\mathbf{Ax} - \mathbf{b}\|_2$. Conforme o parâmetro λ se aproxima de zero, a solução de Tikhonov se aproxima da solução “direta” dada pela Equação (3.12).

Um estudo numérico mais detalhado desta técnica é feito em [15] e [16].

3.4.4 Deconvolução com matrizes Toeplitz

A deconvolução constitui uma equação integral de Fredholm do primeiro tipo com *kernel* $K(t, \tau) = x(t - \tau)$. A matriz \mathbf{A} correspondente obtida dessa equação possui elementos $a_{ij} = w_j x(t_i - \tau_j)$ e pode ser escrita da forma $\mathbf{A} = \mathbf{XW}$, onde $\mathbf{W} = \text{diag}(w_1, \dots, w_n)$ é a matriz diagonal dos pesos de cada elemento correspondente aos elementos da matriz \mathbf{X} , $x_{ij} = x(t_i - \tau_j)$.

Se os pontos t_i e τ_j forem idênticos e igualmente espaçados (o que pode ser feito por interpolação da função $x(t - \tau)$ ou dos pontos experimentais que a constituem, se este for o caso), então a matriz \mathbf{X} é uma matriz *Toeplitz circulante*, cuja estrutura especial de seus coeficientes é usada na implementação de algoritmos eficientes para o cálculo da deconvolução [15], [20] e [21].

⁸ Um tipo muito usado de norma de funções é a norma L_2 . Dada uma função $f(x)$ limitada em $a \leq x \leq b$, a norma L_2 de $f(x)$ é dada por [16]:

$$\|f\|_2 = \left\{ \int_a^b |f(x)|^2 dx \right\}^{1/2}$$

3.5 Algumas técnicas de deconvolução no domínio da frequência

No domínio da frequência, a deconvolução pode ser calculada diretamente a partir da Equação (3.3). Porém, a instabilidade provocada pela operação de divisão não permite a reconstrução satisfatória da função $h(t)$ sem um tratamento numérico que elimine ao menos parcialmente os erros introduzidos no espectro de frequência.

Para o problema da deconvolução no domínio da frequência há uma variedade de técnicas disponíveis [11], [17], [18], [19] e [22]. Em sua maioria, as técnicas consistem na aplicação de filtros para eliminar as componentes em altas frequências do sinal deconvoluído.

A seguir são descritas algumas técnicas de deconvolução no domínio da frequência.

3.5.1 Filtro passa-baixas

A tentativa mais simples e direta de resolver o problema da deconvolução é a aplicação de um filtro passa-baixas sobre a função $H(j\omega)$ no domínio da frequência, a fim de eliminar parcialmente as instabilidades provenientes dos erros nos dados experimentais.

Um filtro simples utilizado é dado por [17]:

$$F(\omega) = \frac{1}{(\omega/p)^k} \quad (3.15)$$

onde p e k são parâmetros ajustáveis.

Com isso, uma solução estimada $\hat{h}(t)$ é dada por:

$$\hat{h}(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\mathcal{F}[x(t) * h(t)]}{X(j\omega)} F(\omega) \right] \quad (3.16)$$

Esse filtro possui um baixo desempenho devido ao fato de que, ao eliminar as informações nas altas frequências, acaba eliminando também componentes do próprio sinal em questão, modificando assim o resultado final, como será mostrado com simulações numéricas no próximo capítulo.

Uma classe mais sofisticada de filtros é dada pela forma [17]:

$$F(j\omega) = \frac{1}{\left[1 + \frac{\phi(\omega)}{|X(j\omega)|^2}\right]} \quad (3.17)$$

onde $\phi(\omega)$ é uma função positiva da frequência.

Com esse filtro, a estimativa $\hat{h}(t)$ é dada por:

$$\hat{h}(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{X(j\omega)} \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{\phi(\omega)}{|X(j\omega)|^2}\right)} \right] Y(j\omega) \right] \quad (3.18)$$

Basicamente, esse filtro é projetado para fazer com que a quantidade $\phi(\omega)/|X(j\omega)|^2$ seja muito pequena, e consequentemente $F(j\omega)$ seja quase um nas regiões em que $X(j\omega)$ não é muito pequena. Entretanto, nas regiões nas quais $X(j\omega)$ exibe valores muito pequenos, a quantidade $\phi(\omega)/|X(j\omega)|^2$ deve se tornar significativa e provocar uma atenuação adequada.

3.5.2 Filtro Wiener

O filtro Wiener é uma das mais antigas e eficientes técnicas de filtragem no domínio da frequência muito utilizado na restauração de imagens [11].

Dada uma função $h(t)$ que queremos encontrar pela deconvolução, um filtro Wiener procura uma estimativa $\hat{h}(t)$ que minimiza a função de erro estatístico $e^2 = E\{(h - \hat{h})^2\}$, onde E é o operador valor esperado.

A estimativa $\hat{h}(t)$ é então dada por [11]:

$$\hat{h}(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{1}{X(j\omega)} \left(\frac{|H(j\omega)|^2}{|H(j\omega)|^2 + S_\eta/S_h} \right) Y(j\omega) \right] \quad (3.19)$$

onde:

$H(j\omega)$ é a transformada de Fourier de $h(t)$;

$|H(j\omega)|^2 = H(j\omega)^* H(j\omega)$, onde o asterisco significa o conjugado complexo;

S_η / S_h é razão sinal-ruído entre a potência do ruído (introduzido pelos erros experimentais) e a potência do sinal de entrada $x(t)$.

Podemos ver que se o espectro de potência do ruído S_η é zero para todos os valores frequência, a Equação (3.19) se resume à Equação (3.3), que é a forma direta de deconvolução, como esperado. Entretanto, com o aumento do nível de ruído em certas frequências, a razão sinal-ruído diminui, levando consigo o termo dentro dos parênteses. Isto significa que o filtro Wiener atenua frequências dependentes com a razão sinal-ruído do problema.

Deve-se, entretanto, conhecer a natureza espectral do ruído introduzido no problema para o bom funcionamento do filtro Wiener.

Capítulo 4

Simulações em LabVIEW®

4.1 Visão geral do ambiente de programação

O LabVIEW® (do inglês *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é um ambiente de programação gráfica voltado para aquisição de dados e processamento de sinais, bem como para atividades mais complexas de monitoração e controle.

Toda a aquisição de dados e comunicação com o PC feitos neste trabalho foi programada e desenvolvida nesta plataforma por ela ser uma ferramenta de fácil aprendizagem, prática e possuir muitas funções de processamento de sinais úteis aos propósitos deste trabalho.

4.2 Simulação de filtragem no domínio da frequência

Sabe-se que a operação de deconvolução através da Equação (3.3) se dá no domínio da frequência, e que o uso de técnicas de filtragem na deconvolução utilizando dados experimentais é imprescindível na eliminação, ao menos parcial, das instabilidades produzidas no seu cálculo [17].

A transformada de Fourier de uma função como o perfil de reflexão de uma FBG exhibe picos de intensidade concentrados nas baixas frequências, isto é, a maior parte da informação acerca do sinal está concentrada em baixas frequências.

Sabendo que a operação de deconvolução utilizando dados experimentais produz instabilidades espalhadas por todo o espectro, e que a maior parte do sinal está contida nas baixas

frequências, uma simulação utilizando o filtro passa-baixas dado pela Equação (3.15) foi feita a fim de verificar o comportamento do filtro em um sinal senoidal como exemplo.

A Figura 4.1 mostra o resultado dessa simulação, onde se podem ver plotados o sinal original, o filtro utilizado, e o sinal filtrado.

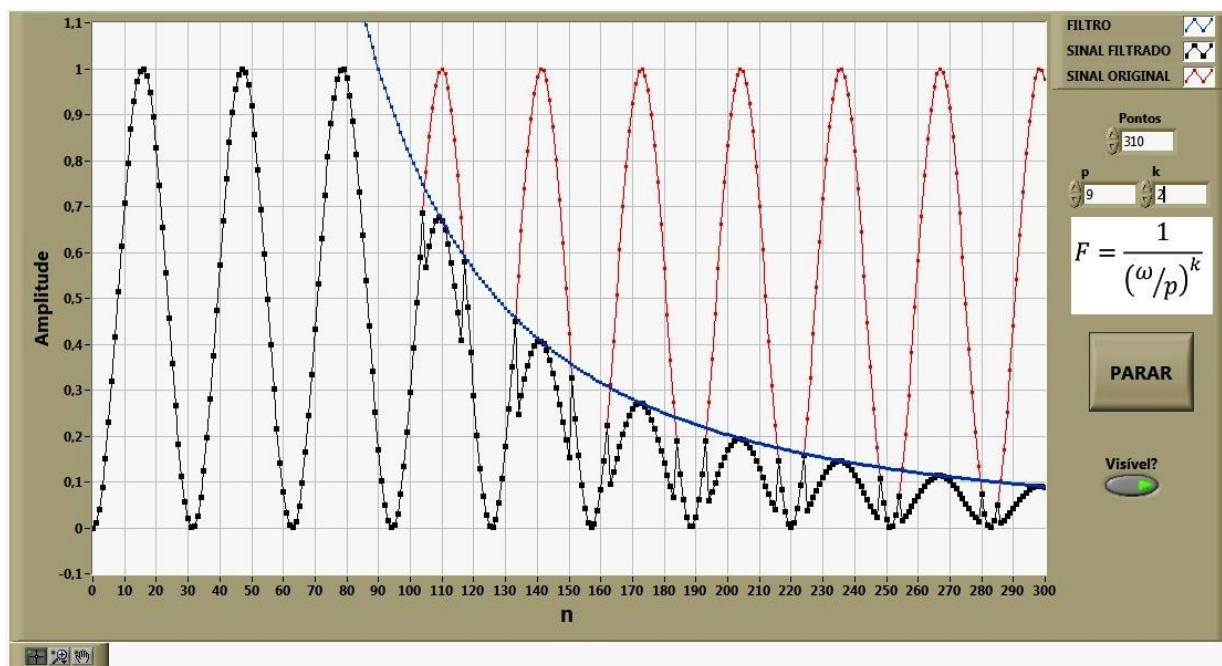


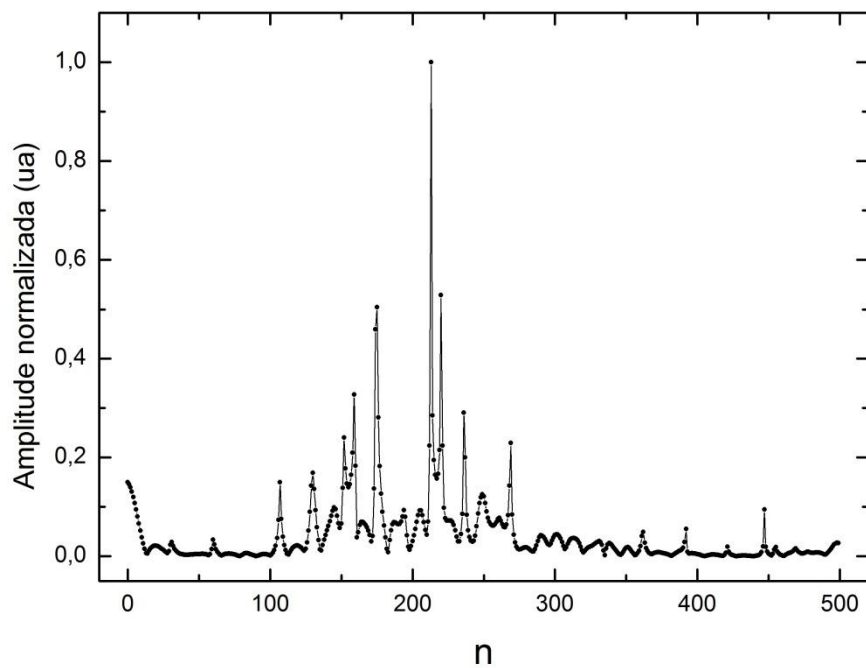
Figura 4.1. Simulação de filtragem de sinal senoidal.

O filtro utilizado atenua as componentes de alta frequência, deixando passar as de baixa frequência, o que pode ser útil na filtragem do sinal obtido na deconvolução.

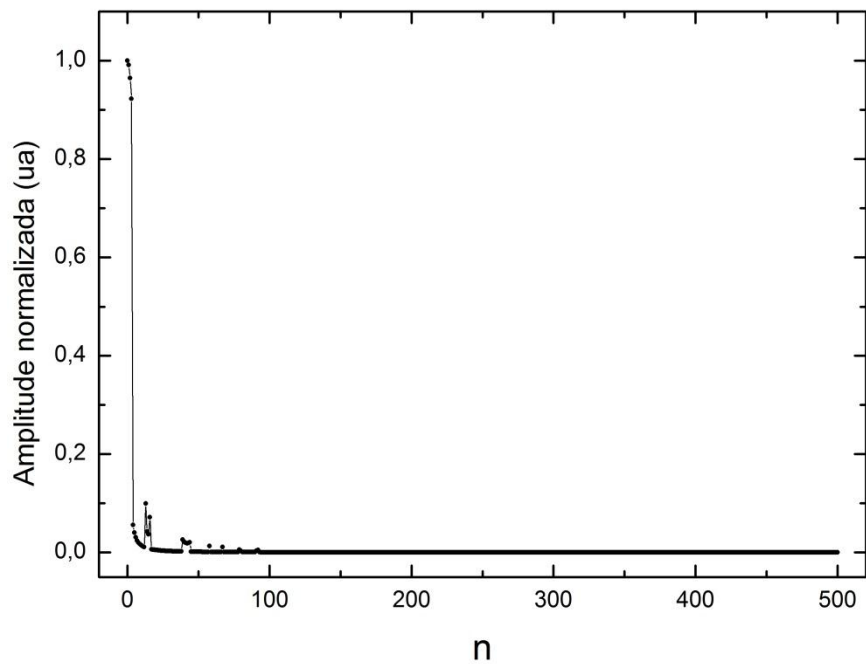
A Figura 4.2 (a) mostra um espectro típico no domínio da frequência do resultado de uma operação de deconvolução feita em laboratório utilizando sinais ópticos, obtidos em um OSA, de duas FBGs, onde nenhum tipo de filtro foi usado.

Podem-se ver muitos picos de grande intensidade espalhados pelo espectro de frequência. Tais picos não fazem parte da transformada de Fourier do sinal deconvoluido, como esperado, mas surgem da operação de divisão na Equação (3.3) quando valores muito pequenos de $X(j\omega)$ estão presentes. Como consequência, a transformada inversa de Fourier desse sinal retorna um sinal extremamente ruidoso devido àqueles picos no domínio da frequência.

Na Figura 4.2 (b) o mesmo sinal é mostrado com a aplicação do filtro no domínio da frequência dado pela Equação (3.15).



(a)



(b)

Figura 4.2. Transformada de Fourier de um sinal de deconvolução (a) sem filtragem, e (b) com filtragem.

Apesar da remoção dos picos oriundos da operação de divisão no processo de deconvolução, a filtragem removeu também componentes do sinal, o que resultou em alteração

da sua forma, como se pode ver na Figura 4.2 (b). Ao calcular a transformada inversa de Fourier a fim de recuperar o perfil de reflexão de uma FBG, essas alterações introduzidas no processo de filtragem inevitavelmente modificaram o resultado final, como será mostrado adiante.

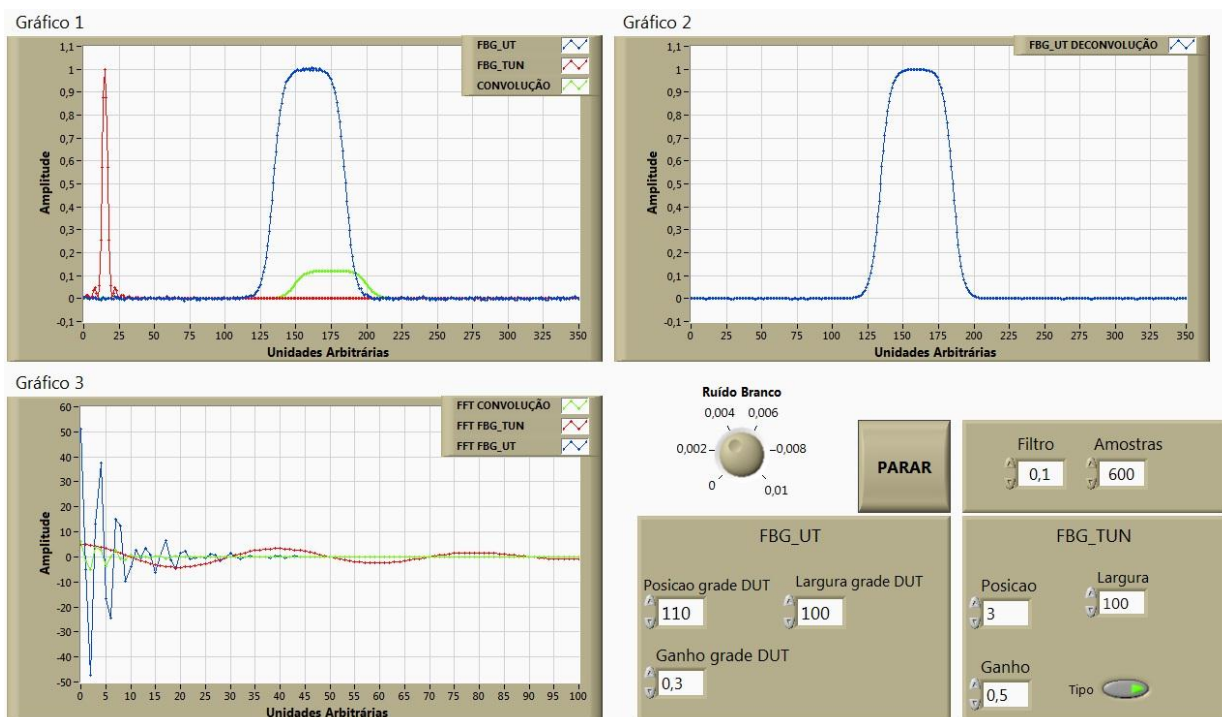
Apenas com o propósito de validar a técnica proposta neste trabalho, foi implementado o filtro dado pela Equação (3.15) para a correção, ao menos parcial, das instabilidades causadas na deconvolução.

4.3 Simulações de convolução e deconvolução

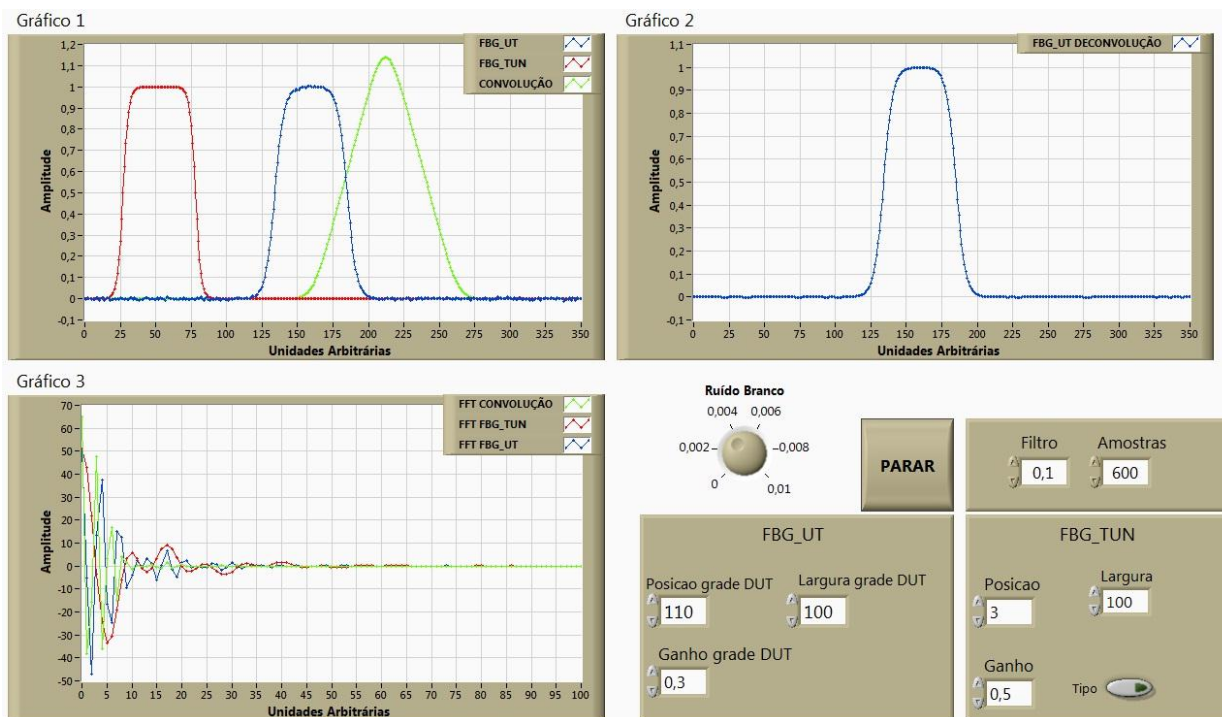
A fim de verificar a viabilidade da técnica proposta, foram feitas simulações preliminares de convolução e deconvolução de funções arbitrárias, simulando perfis de reflexão de FBGs.

A Figura 4.3 mostra o painel de controle do software de simulação criado com a finalidade de se estudar o comportamento da deconvolução com dois tipos de funções.

Na Figura 4.3 (a), a função que simula a FBG_{TUN} é do tipo $\text{sinc}(\lambda)$. Na Figura 4.3 (b), a função que simula a FBG_{TUN} é do tipo $\tanh(\lambda)$.



(a)



(b)

Figura 4.3. Simulações de convolução e deconvolução com FBG_{TUN} sendo (a) $\text{sinc}(x)$, e (b) $\text{tanh}(x)$.

Nas Figura 4.3 (a) e (b), o Gráfico 1 mostra as simulações dos perfis de reflexão da FBG_{UT} , da FBG_{TUN} e da convolução calculada a partir dos perfis de ambas. O Gráfico 2 mostra o perfil de reflexão da FBG_{UT} obtido a partir da deconvolução. O Gráfico 3 mostra as transformadas de Fourier das funções do Gráfico 1.

Analizando os gráficos 1, 2 e 3 da Figura 4.3 (a) e (b), pode-se ver que a alteração da FBG_{TUN} de $\text{sinc}(\lambda)$ para $\text{tanh}(\lambda)$ produz alterações significativas nas transformadas de Fourier da deconvolução, apesar de a forma do perfil de deconvolução ter sido reconstituída perfeitamente para ambas as funções. Isso indica que é possível que determinados perfis de FBG_{TUN} possam dar melhores resultados na implementação da técnica proposta.

A simulação mostrou, assim, que um estudo mais aprofundado em relação ao tipo de perfil da FBG mais adequado à aplicação da técnica proposta deve ser conduzido, o que será feito numa etapa posterior a este trabalho.

Capítulo 5

Procedimentos e Resultados Experimentais

A montagem experimental utilizada está dividida em dois blocos: bloco de Comunicação e Controle, e bloco Óptico.

5.1 Bloco de Comunicação e Controle

Foram desenvolvidos e implementados para o bloco de Comunicação e Controle, módulos eletrônicos para interfaceamento e controle, juntamente com software desenvolvido em LabVIEW® para aquisição e processamento dos dados. Este subsistema está dividido em quatro módulos: Software de Controle e Aquisição, Módulo de Interface, Módulo de Controle e Aquisição e Caixa Térmica.

Na Figura 5.1 é mostrado esquematicamente o fluxo de dados no bloco de Comunicação e Controle.

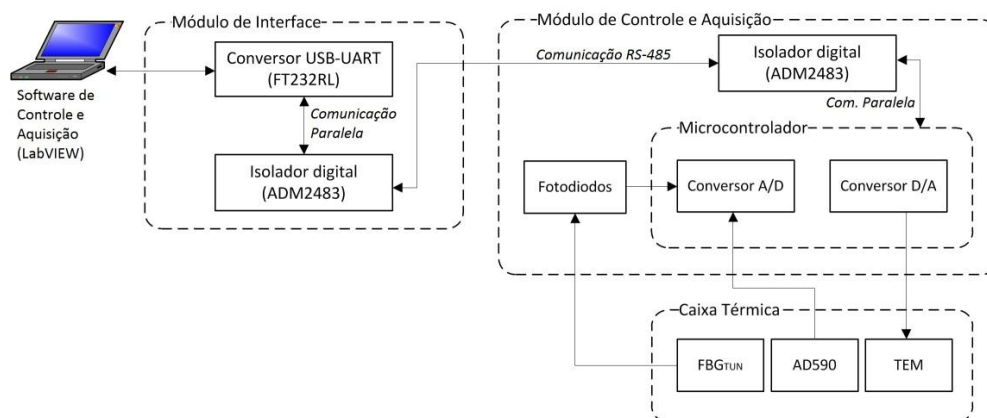


Figura 5.1. Fluxograma do Bloco de Comunicação e Controle.

5.1.1 Software de Controle e Aquisição

Foi desenvolvido um aplicativo em LabVIEW[®] para fazer a interface, aquisição e processamento dos dados da convolução e controle de temperatura das FBGs, através dos módulos de interface e de controle e aquisição.

Na Figura 5.2 é mostrado o fluxograma do Software de Controle e Aquisição.

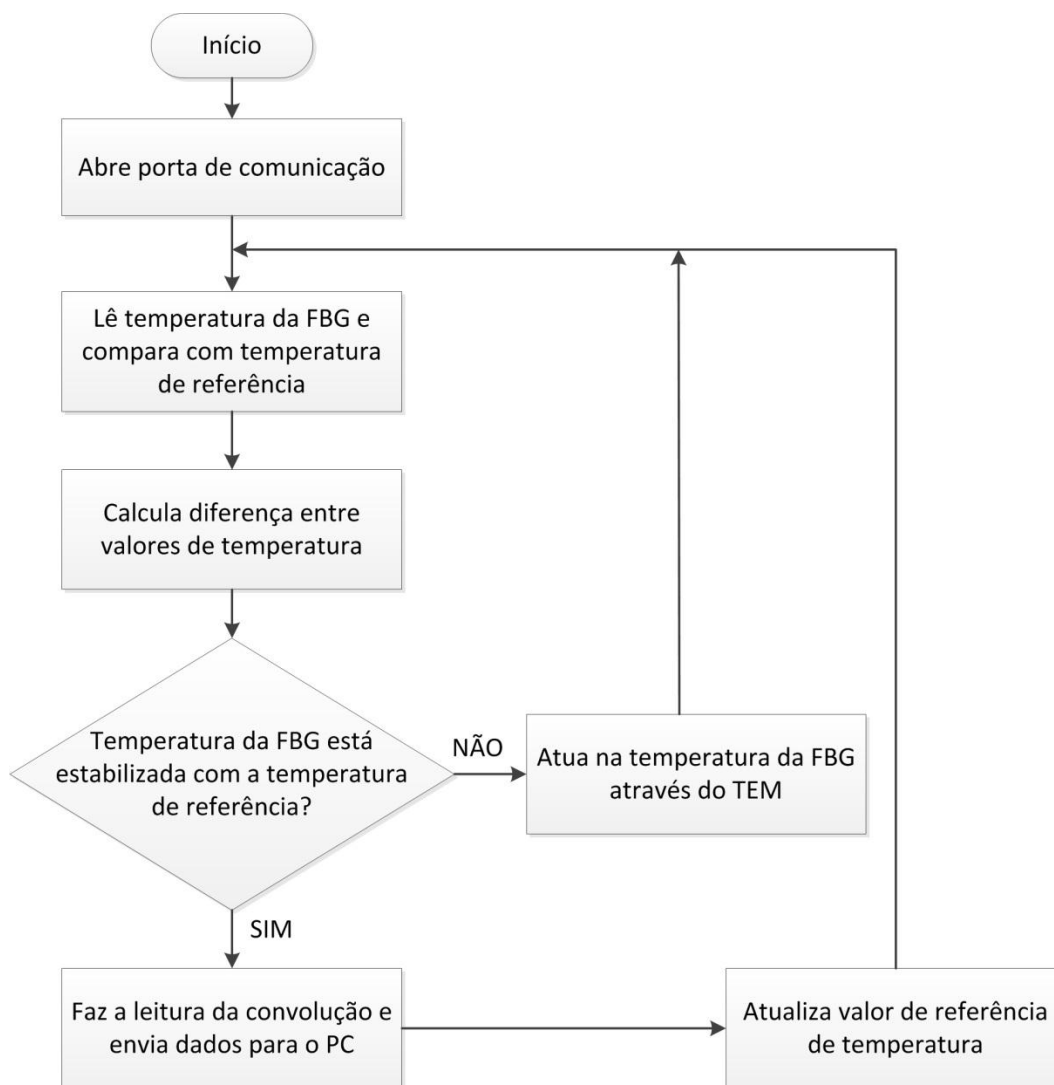


Figura 5.2. Fluxograma do Software de Controle e Aquisição.

A Figura 5.3 mostra o painel de controle desse aplicativo, onde se pode ver também um perfil de convolução mostrado no gráfico, além dos controles que possibilitam o ajuste do

controle PID (Proporcional – Integral – Diferencial) da potência do TEM, obtendo-se dessa forma o controle da temperatura da FBGs dentro das respectivas caixas térmicas.

Esse controle fez-se necessário devido à sensibilidade das FBGs com as variações de temperatura do ambiente. Com isso, a medida da convolução é mais precisa, tendo em vista que variações na temperatura da FBG se traduzem em variações no seu λ_B .

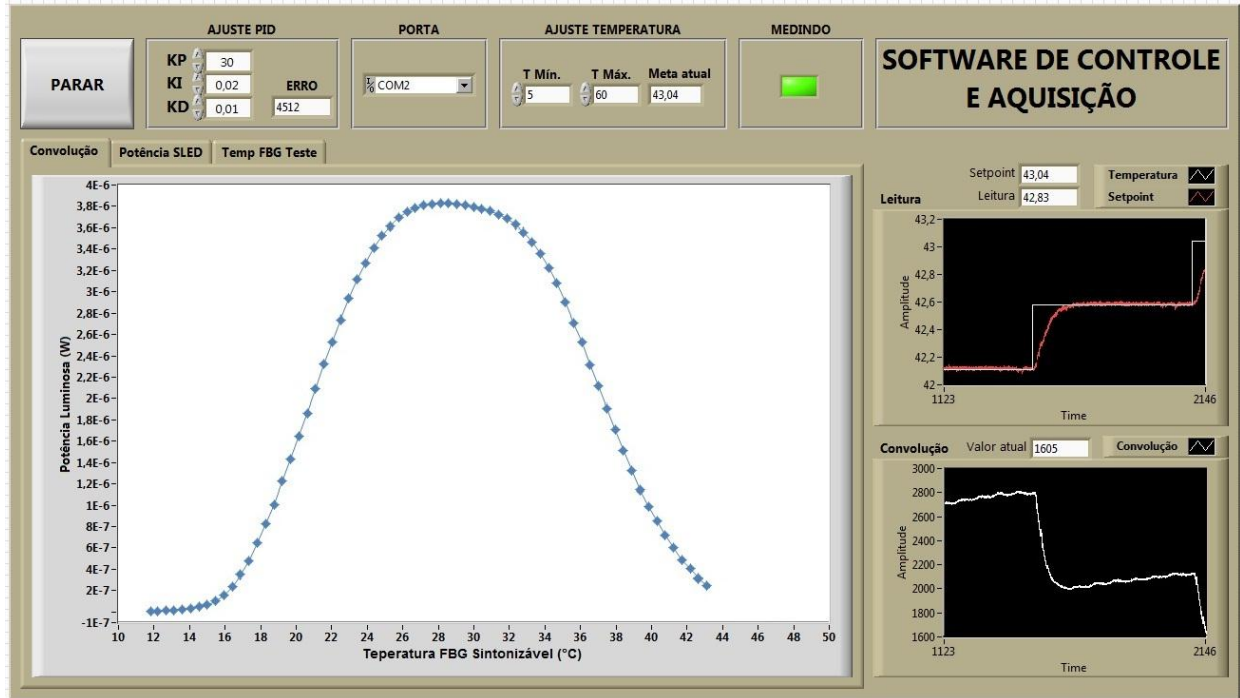


Figura 5.3. Painel de controle do Software de Controle e Aquisição.

Através de uma interface simples, no painel de controle do software, é possível ajustar as constantes KP, KI e KD do controle PID a fim de minimizar o erro entre o valor do *setpoint* de temperatura e o valor atingido com a atuação do controle PID.

No painel de controle é possível também ajustar os valores de temperatura inicial e final aos quais a FBG_{TUN} será submetida.

Depois de feitos os ajustes necessários e de iniciar o software, a temperatura é incrementada (ou decrementada) automaticamente em intervalos iguais, que também podem ser configurados, e cada medida de convolução obtida é mostrada num gráfico em tempo real para o usuário. Além do perfil de convolução disponível graficamente, o usuário pode observar também

gráficos da potência do SLED, da temperatura da FBG_{UT} , e pode acompanhar também a atuação do controle PID sobre a temperatura da FBG_{TUN} .

Ao final da excursão, isto é, quando a temperatura máxima é atingida, o software automaticamente passa a decrementar os valores de temperatura, fazendo novas medidas do perfil de convolução. O procedimento inverso ocorre quando a temperatura mínima é atingida.

Ao final da medida, o usuário pode guardar os dados de convolução a partir do próprio gráfico mostrado no painel de controle, que oferece a opção de exportar os dados para o MS Excel[®].

Outro software em LabVIEW[®], que será detalhado adiante, foi desenvolvido exclusivamente para tratar numericamente os dados da convolução, calcular e obter graficamente os resultados da deconvolução.

5.1.2 Módulo de Interface

O módulo de interface consiste de uma placa eletrônica onde foi implementada a comunicação serial com o computador via porta USB através de um conversor USB – UART FT232RL [23] da FTDI. Do outro lado, o Módulo de Interface se comunica com o Módulo de Controle e Aquisição através do circuito integrado ADM2483 [24] da Analog Devices, que utiliza protocolo RS-485 de comunicação com outro ADM2483 naquele módulo. A função deste circuito integrado é isolar o Módulo de Controle e Aquisição de ruídos provenientes da conexão com o PC, que se sabe é bastante ruidoso.

A Figura 5.4 mostra uma foto do módulo de interface.

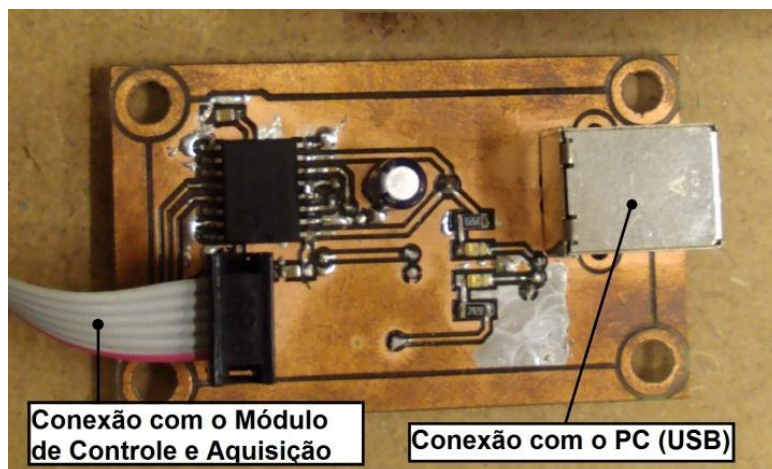


Figura 5.4. Módulo de interface.

5.1.3 Módulo de Controle e Aquisição

O Módulo de Controle e Aquisição consiste de uma placa eletrônica que alimenta e controla os TEMs para manutenção e controle de temperatura das FBGs e faz a aquisição e transmissão das medidas de convolução para o Módulo de Interface, que por sua vez os transmite para o Software de Controle e Aquisição no PC.

Nela estão localizados dois fotodiodos EPM605 [25] e um microcontrolador MSP430F4794 [26] da Texas Instruments, cujo conversor *A/D sigma-delta* interno é usado na aquisição e conversão dos sinais ópticos provenientes dos fotodiodos. O firmware do microcontrolador foi desenvolvido pelo aluno de doutorado Felipe Walter Dafico Pfrimer.

A Figura 5.5 apresenta uma foto do Módulo de Controle e Aquisição.

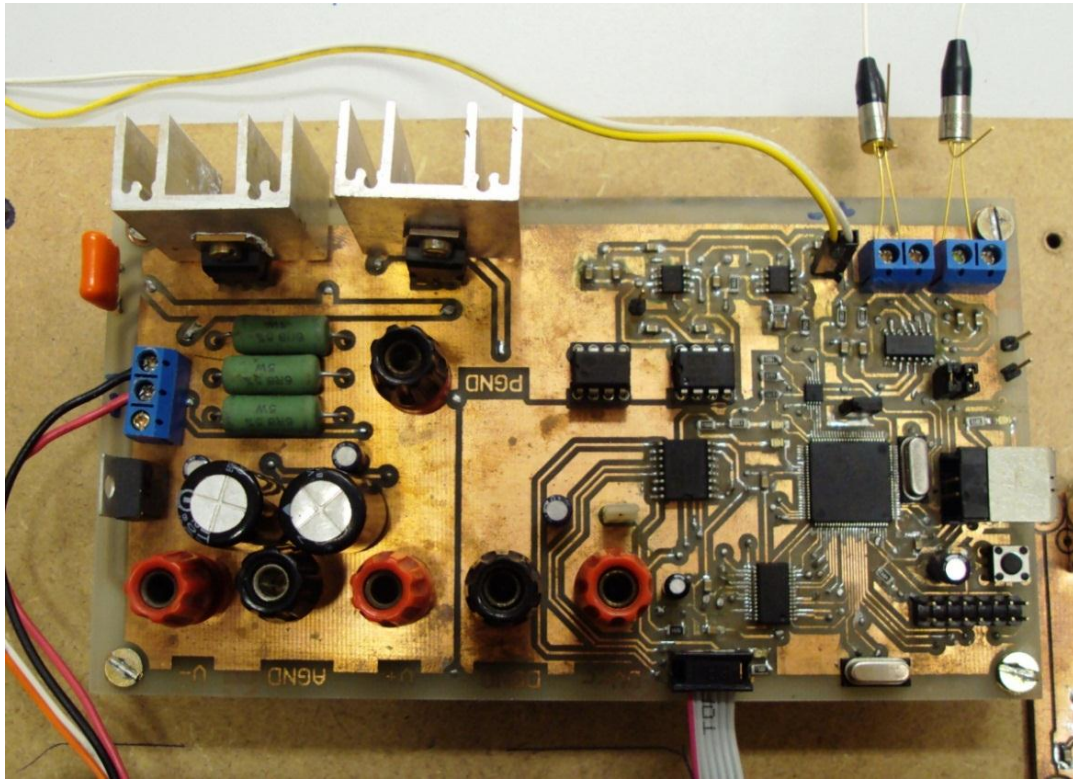


Figura 5.5. Módulo de Controle e Aquisição.

5.1.4 Caixa Térmica

A Caixa Térmica é uma caixa rígida de polipropileno na qual foram devidamente montados a FBG_{TUN} (colada num substrato para aumentar a sua expansão térmica), o sensor de temperatura e o atuador térmico, além de um dissipador térmico e um bloco de alumínio para facilitar o escoamento do calor gerado pelo TEM para o dissipador.

O sensor de temperatura utilizado foi o AD590M, que apresenta boa linearidade e precisão [27]. Este sensor de foi utilizado tanto na medida da temperatura da FBG_{TUN} como da FBG_{UT} .

Como elemento atuador térmico de variação de temperatura da FBG foram utilizados módulos termelétricos (TEM, da sigla em inglês de *Thermoelectric Module*), também conhecidos com atuadores Peltier, modelo CP10,31,05L [28] da Laird Technologies.

Em busca de um material com coeficiente de expansão térmica maior que o da fibra óptica, que fosse leve para minimizar a inércia térmica do sistema, e que tivesse características

mecânicas apropriadas ao seu uso neste trabalho, escolheu-se utilizar como substrato uma lâmina de zinco medindo $15 \times 15 \times 0,25$ mm, cujo coeficiente de expansão térmica linear é $\alpha_s = 30,2 \mu\text{m m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [29].

Sobre esta lâmina foi colada a FBG_{TUN}, utilizando a cola epóxi EPO-TEK® 301 da Epoxi Technology [30], indicada para uso em fibras ópticas. A FBG_{TUN} colada neste substrato permaneceu intocada durante 24 horas para cura à temperatura ambiente, para em seguida o conjunto ser montado dentro da Caixa Térmica.

A Figura 5.6 mostra a FBG_{TUN} colada no substrato de zinco.

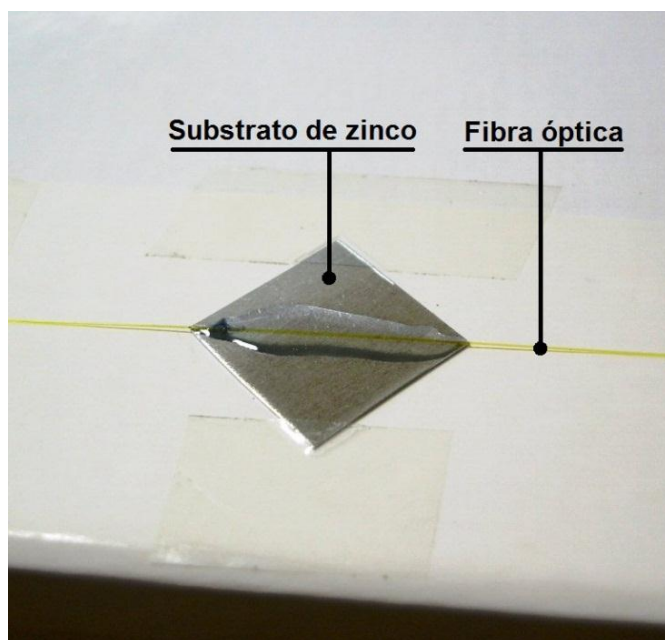


Figura 5.6. Colagem da FBG no substrato de zinco.

A caixa de polipropileno medindo $41 \times 81 \times 121$ mm é composta por duas tampas que se encaixam perfeitamente sem folgas. Na tampa inferior foram feitos rasgos, nas suas laterais de 81 mm, a fim de permitir a passagem e o encaixe da fibra óptica com a FBG_{TUN} colada no substrato sem ser danificada. Foi feito também um furo na lateral de 121 mm no encaixe das tampas da caixa para passagem dos fios de alimentação do TEM e do sensor de temperatura.

O dissipador de calor de alumínio foi utilizado com o propósito de drenar o calor gerado pelo TEM na sua face quente através de um bloco de alumínio de $15 \times 15 \times 10$ mm, para fora da Caixa Térmica.

Os componentes internos foram mantidos termicamente isolados dentro da Caixa Térmica utilizando duas placas de espuma elastomérica flexível [31], a fim de permitir o melhor controle de temperatura da FBG_{TUN} possível. Foram feitas cavidades nessas placas de espuma para a devida acomodação dos componentes internos e máxima isolamento térmica possível.

A fim de maximizar a eficiência das trocas térmicas entre o sensor de temperatura, o substrato de zinco, o TEM, o bloco de alumínio e o dissipador de calor, foi utilizada pasta térmica entre as superfícies de contato.

A Figura 5.7 mostra uma vista tridimensional explodida de montagem da caixa térmica com seus componentes internos.

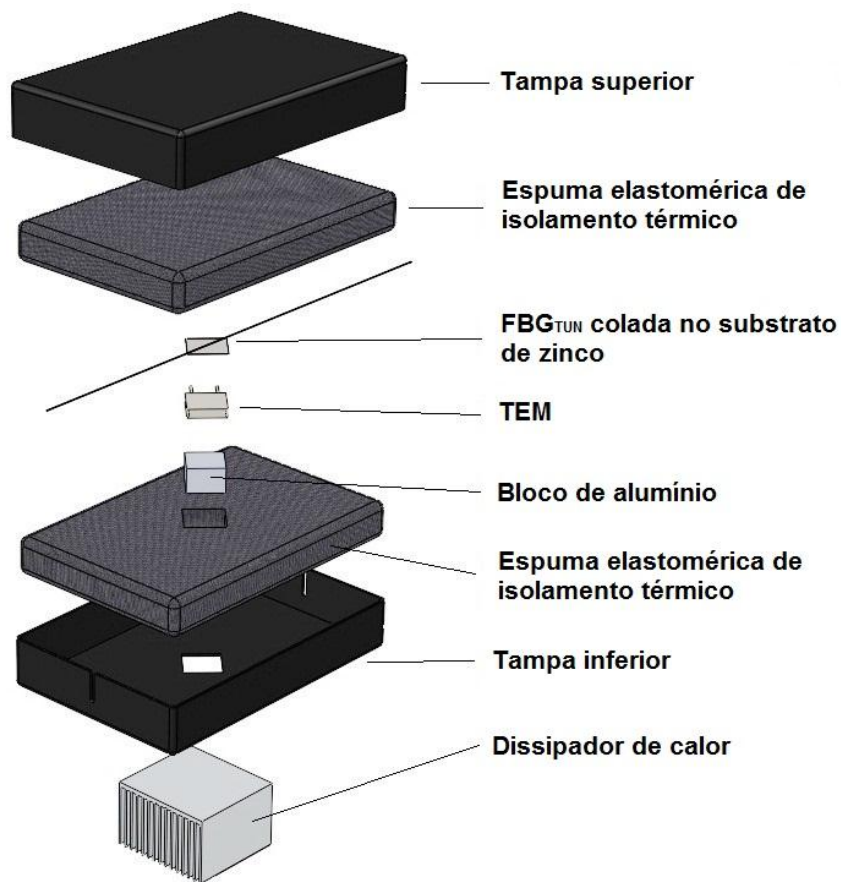


Figura 5.7. Vista explodida de montagem da Caixa Térmica.

A Figura 5.8 mostra uma foto dos módulos de Interface, Controle e Aquisição e Caixa Térmica, conectados e montados sobre uma placa de madeira que foi usada como base.

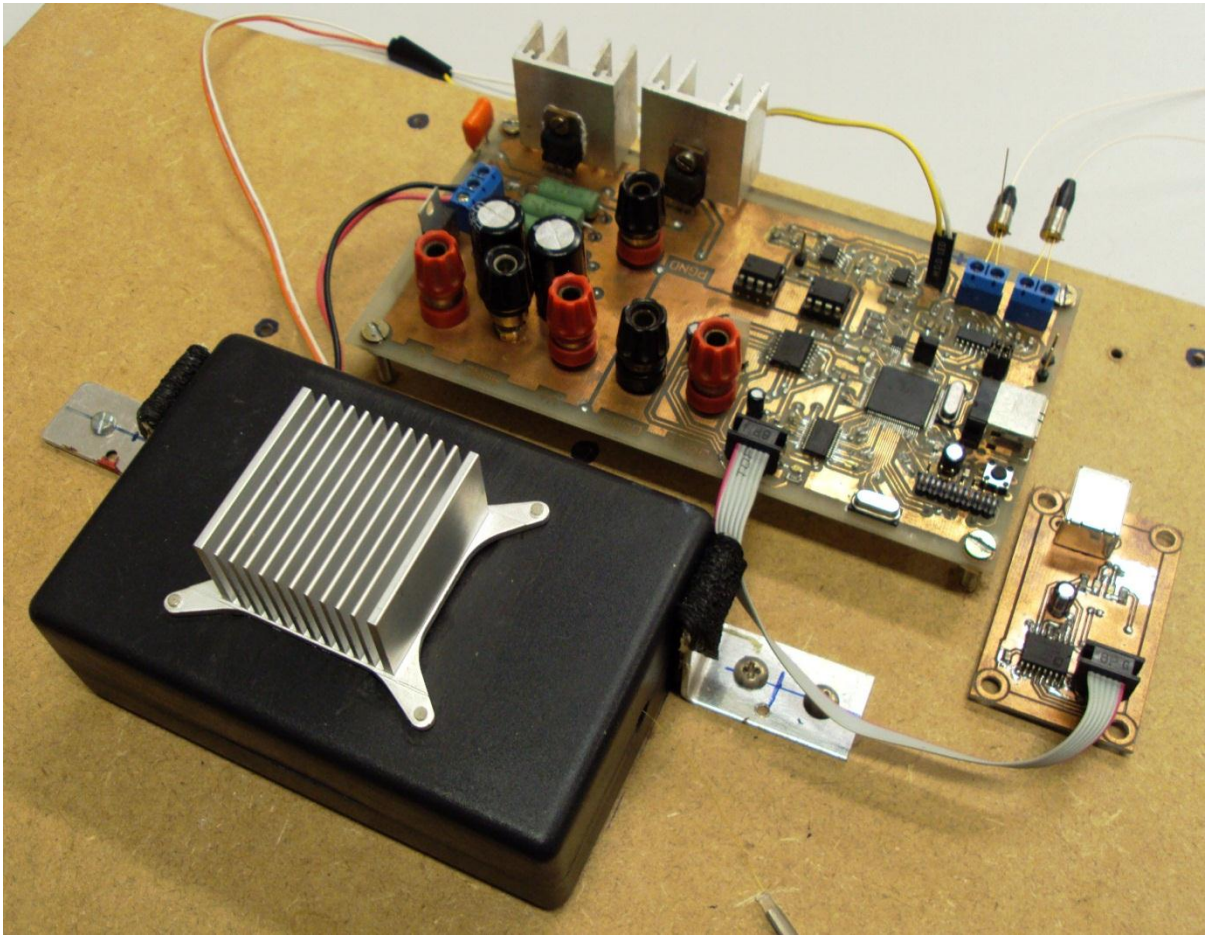


Figura 5.8. Módulos de Interface, Controle e Aquisição e Caixa Térmica conectados.

Uma segunda caixa térmica, com as mesmas características da supracitada, foi utilizada para o controle de temperatura da FBG_{UT} , a fim de evitar a variação do seu λ_B no decorrer da medida de convolução.

A diferença, neste caso, é que a FBG cujo perfil de reflexão e demais parâmetros se queria descobrir, a FBG_{UT} , foi somente encaixada dentro da caixa, mantida em contato físico com o TEM pela pressão da espuma elastomérica, sem ser colada em nenhum substrato.

5.2 Bloco óptico

A Figura 5.9 mostra esquematicamente a topologia experimental utilizada para o Bloco Óptico.

Um SLED modelo DL-BX9-CS5403A da Denselight [32] foi utilizado como fonte de luz de espectro largo. Com uma potência óptica de saída de 35 mW, seu espectro possui aproximadamente uma banda FWHM de 40 nm, centrada em 1550 nm. Foi usado também um circulador óptico modelo CIR-230031555 [33] e dois acopladores ópticos 1 × 2, razão de acoplamento 5 / 95, modelo FFCK15L1PB115 [34].

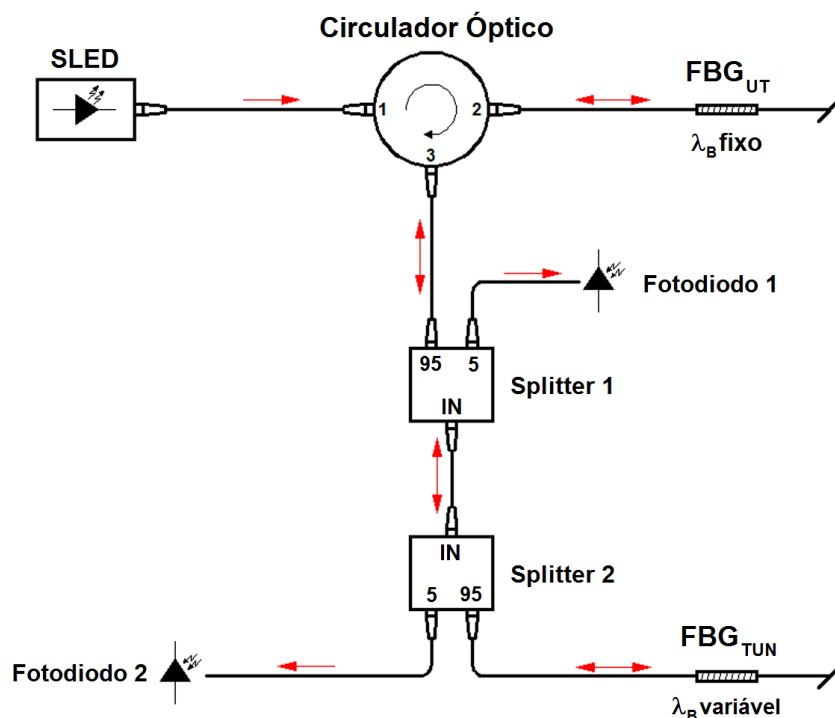


Figura 5.9. Circuito óptico utilizado na nova técnica para caracterização de FBGs.

Nessa montagem, o espectro de reflexão da FBG_{UT} é medido pelo fotodiodo 2, usado para monitorar a flutuação da potência do SLED ao longo do tempo, enquanto o espectro de convolução é medido pelo fotodiodo 1.

Finalmente, os blocos Óptico e de Comunicação e Controle estão ligados pelos fotodiodos 1 e 2, que estão localizados no Módulo de Controle e Aquisição, mostrado na Figura 5.5.

5.3 Medida do $\Delta\lambda_B$ da FBG_{TUN} colada no substrato de zinco

Conforme ilustrado na Figura 2.2, o λ_B de uma FBG se altera com a variação de temperatura. A fim de comprovar essa propriedade e caracterizar o nosso sistema com a FBG_{TUN} colada ao substrato de zinco, fez-se a medida de λ_B em função da temperatura com o auxílio de

um OSA Yokogawa AQ6331, com precisão de ± 20 pm na faixa de comprimentos de onda em que trabalhamos (Banda C, 1550 nm) [35].

A Figura 5.10 mostra o gráfico obtido neste experimento.

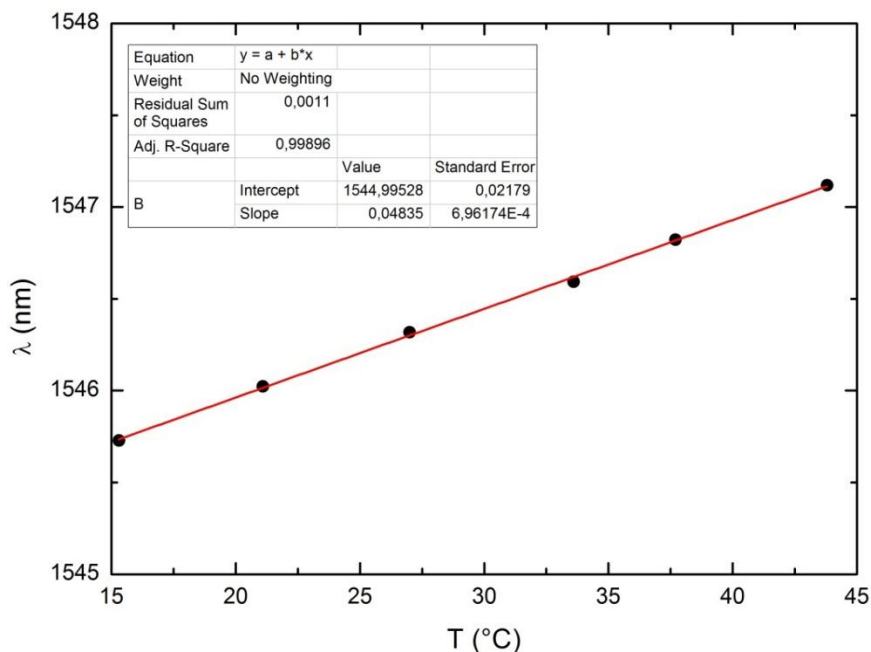


Figura 5.10. Gráfico da variação $\Delta\lambda_B$ em função da temperatura com a FBG_{TUN} colada no substrato de zinco.

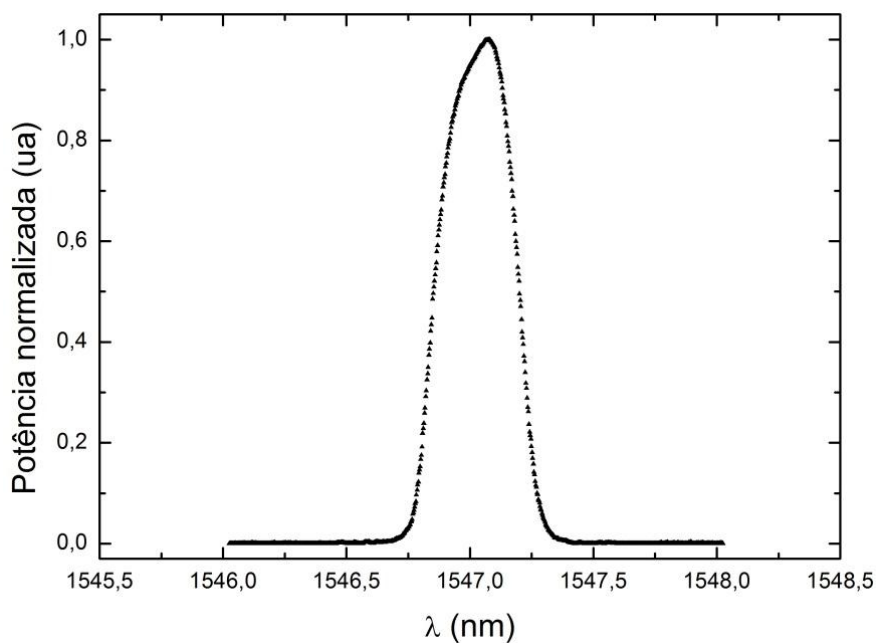
A faixa de temperatura medida compreende a faixa de trabalho para a qual se constatou que a convolução entre os perfis de reflexão das duas FBGs se dá por completo.

Os dados obtidos mostram que a expansão térmica da FBG colada no substrato de zinco permite uma excursão no λ_B de $48,3 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$, em comparação com os $13,7 \text{ pm } ^\circ\text{C}^{-1}$ [4] de uma FBG típica. Foi feita uma excursão térmica de 0°C a 80°C com esse sistema e o resultado obtido foi de $\Delta\lambda_B = 2,77 \text{ nm}$.

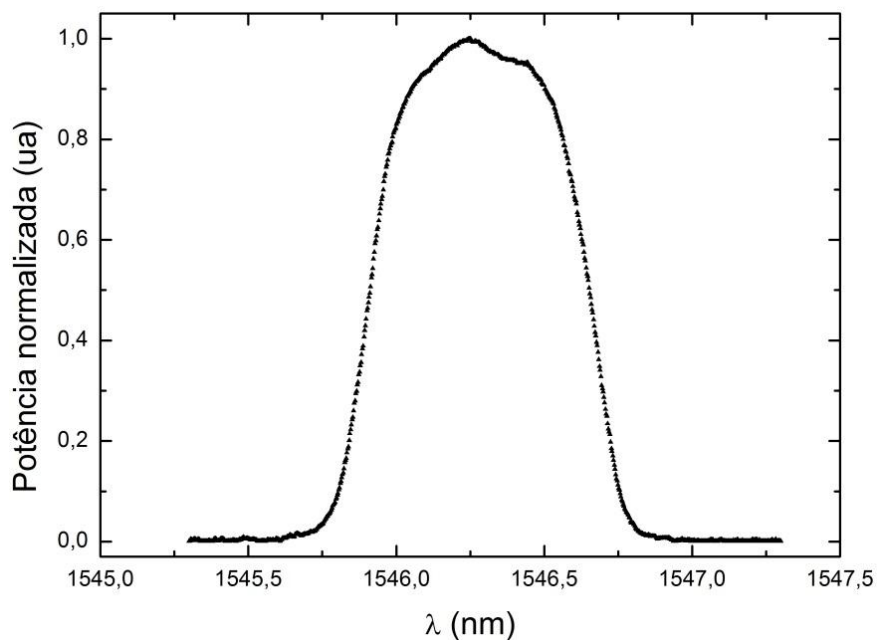
5.4 Levantamento dos perfis de reflexão da FBG_{TUN} e FBG_{UT}

Para validar a técnica proposta, fez-se necessário conhecer os perfis de reflexão das duas FBGs utilizadas neste trabalho, para fins de comparação entre o perfil obtido através da deconvolução e o perfil obtido no OSA, nossa referência. As medidas dos perfis foram tomadas com o OSA e o SLED utilizados anteriormente.

Foram feitas medidas utilizando o OSA para obter o perfil de reflexão das duas FBGs utilizadas neste trabalho. A Figura 5.11 (a) e (b) mostram os perfis da FBG_{TUN} e FBG_{UT} obtidos, respectivamente.



(a)



(b)

Figura 5.11. Perfis de reflexão obtidos no OSA: (a) FBG_{TUN}, e (b) FBG_{UT}.

Além dos perfis de reflexão obtidos, as medidas efetuadas permitiram a determinação dos seguintes parâmetros das FBGs: $\lambda_B = 1547,07$ nm e FWHM = 0,34 nm para a FBG_{TUN}, e $\lambda_B = 1546,24$ nm e FWHM = 0,74 nm para a FBG_{UT}.

5.5 Medidas de convolução

Foram feitas medidas da convolução entre os espectros de reflexão das FBGs sintonizável (FBG_{TUN}) e de teste (FBG_{UT}).

Ambas foram acondicionadas em caixas térmicas para o controle de suas temperaturas. No caso da FBG_{UT}, sua temperatura foi mantida constante durante a medida da convolução, ao contrário da FBG_{TUN}, que teve sua temperatura variada para promover a excursão de seu λ_B .

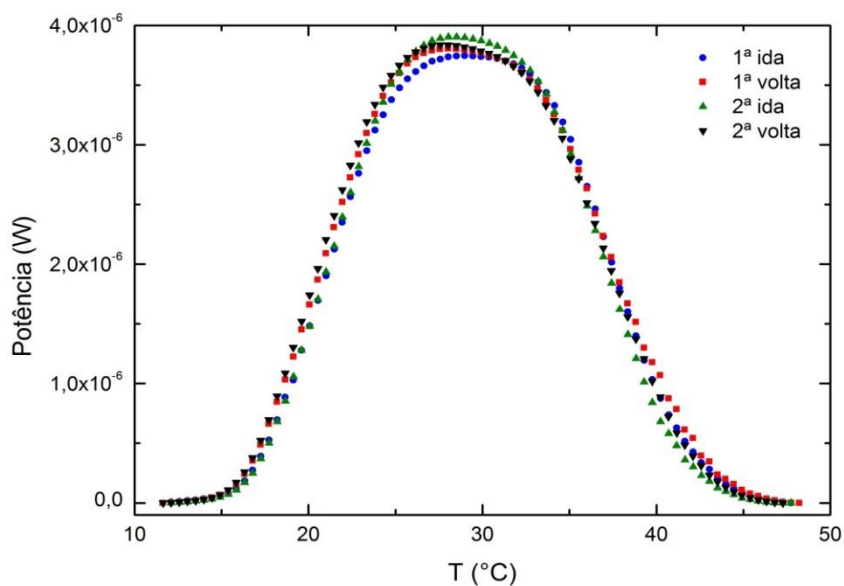
A primeira medida foi iniciada com a temperatura de ambas FBGs em $18 \pm 0,2$ °C. Nesta condição, como elas possuem λ_B s muito próximos, já era esperado que seus espectros estivessem parcialmente sobrepostos, o que faria com que um valor de convolução não nulo pudesse ser medido, o que de fato ocorreu.

Porém, a fim de se obter um perfil de convolução completo, foi necessário deslocar o λ_B da FBG_{TUN} até que um valor nulo de convolução fosse observado. Em seguida, iniciou-se a excursão térmica em sentido contrário, coletando os valores obtidos. Quando um valor nulo de convolução fosse atingido, sabia-se que o λ_B da FBG_{TUN} havia se deslocado o suficiente para que os espectros das FBGs não estivessem mais sobrepostos, portanto não havia convolução a ser medida.

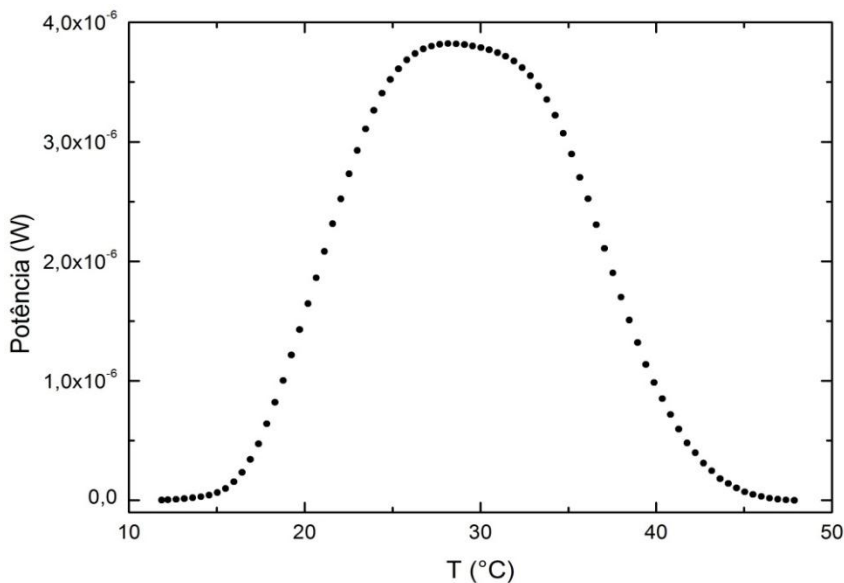
A partir daí, iniciou-se o aumento gradativo da temperatura da FBG_{TUN} e a cada 0,5 °C o valor da convolução foi medido, enviado ao PC e mostrado num gráfico atualizado a cada nova medida. Desta forma o perfil de convolução foi sendo construído para posterior tratamento numérico.

Foram feitas quatro excursões da FBG_{TUN} ao longo de toda a largura espectral da FBG_{UT}, o que resultou em quatro curvas de convolução, compreendendo duas excursões de ida e volta. Cada varredura completa da FBG_{TUN} ao longo da largura espectral da FBG_{UT} levou aproximadamente meia hora.

Como a FBG é muito sensível a variações de temperatura, apesar do controle PID implementado e do fato de ambas FBGs estarem nas caixas térmicas, observou-se variações entre os quatro perfis de convolução obtidos, conforme mostrado na Figura 5.12 (a). A fim de obter um melhor resultado no processamento da deconvolução, foi feita a média dos quatro perfis de convolução obtidos. O perfil médio das convoluções está mostrada na Figura 5.12 (b).



(a)



(b)

Figura 5.12. (a) Perfis de convolução obtidos experimentalmente; (b) Média dos perfis de convolução.

Os pontos da curva média de convolução acima foram armazenados num arquivo texto contendo duas colunas: a primeira com os valores de intensidade da convolução, e a segunda com os respectivos valores de temperatura em graus Celsius.

O arquivo texto foi usado no Software de Deconvolução para a obtenção da deconvolução.

5.6 Software de Deconvolução e Resultados

O Software de Deconvolução, também desenvolvido utilizando LabVIEW[®], permite a caracterização do perfil da FBG_{UT} através da determinação de seu perfil aproximado de reflexão, largura espectral FWHM e λ_B .

Neste software, os dados da convolução e do espectro de reflexão das FBG_{TUN} são numericamente processados e a operação de deconvolução é feita usando o procedimento dado pela Equação (3.3) com a aplicação do filtro dado pela Equação (3.15).

O algoritmo utilizado para encontrar o perfil da FBG_{UT} e seus parâmetros FWHM e λ_B é descrito a seguir.

Utilizando a propriedade comutativa da convolução e conhecendo-se os perfis de convolução e de reflexão de uma das FBGs, pode-se obter através da deconvolução o perfil da outra FBG, e vice-versa, isto é, a partir de duas funções conhecidas determina-se a terceira. No software, foi implementado um algoritmo de descoberta do perfil de reflexão da FBG utilizando também esta propriedade.

Como não se conhece, a priori, o perfil da FBG_{UT}, inicialmente obtém-se o perfil de reflexão mais aproximado possível da FBG_{TUN}, que foi determinado anteriormente com o OSA e é mostrado no gráfico do painel de controle como referência para comparação. Isso é feito variando-se os parâmetros p e k do filtro utilizado, além do parâmetro λ_B para localização exata do pico de reflexão da FBG.

Feito isso, obtém-se finalmente o perfil da FBG_{UT}, utilizando a propriedade comutativa da convolução, também a partir do painel de controle.

A Figura 5.13 mostra o painel de controle do Software de Deconvolução com os controles, gráfico e funções disponíveis.

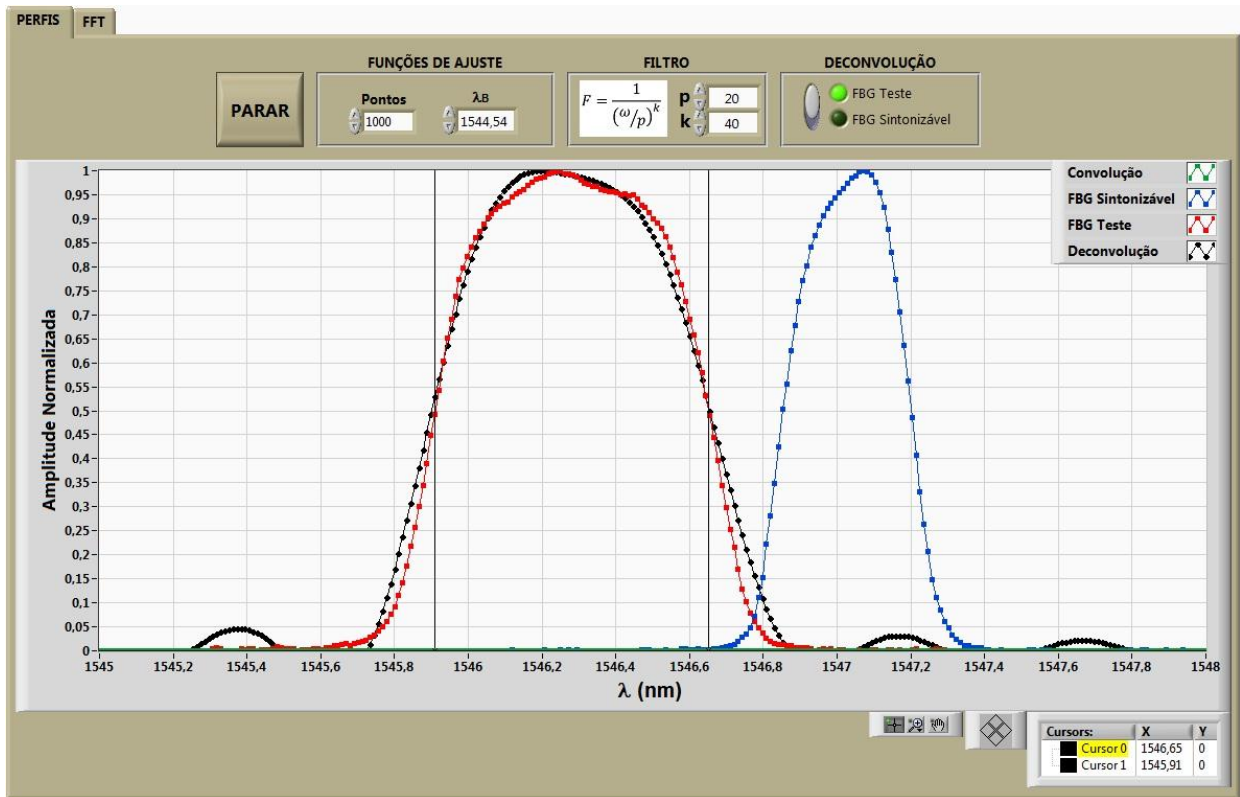
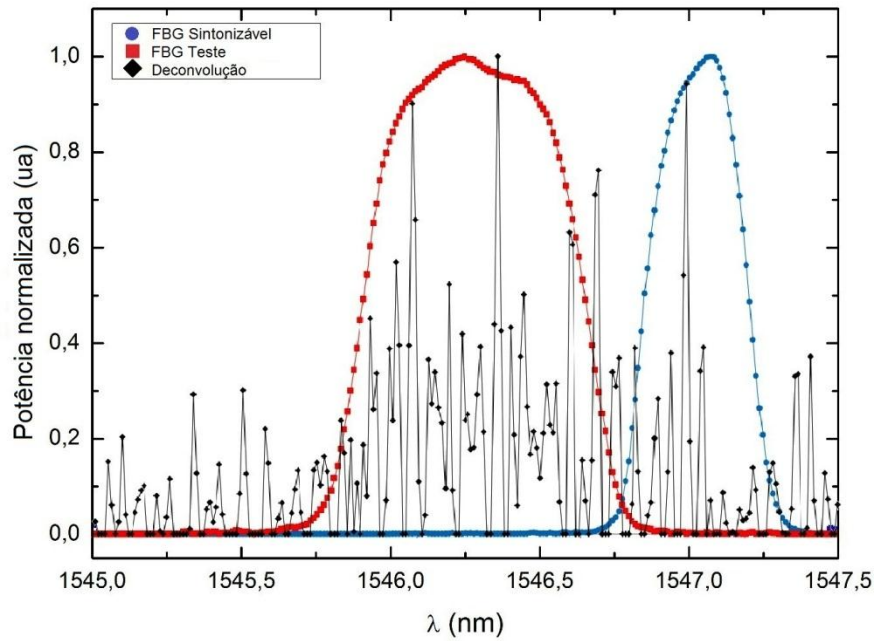


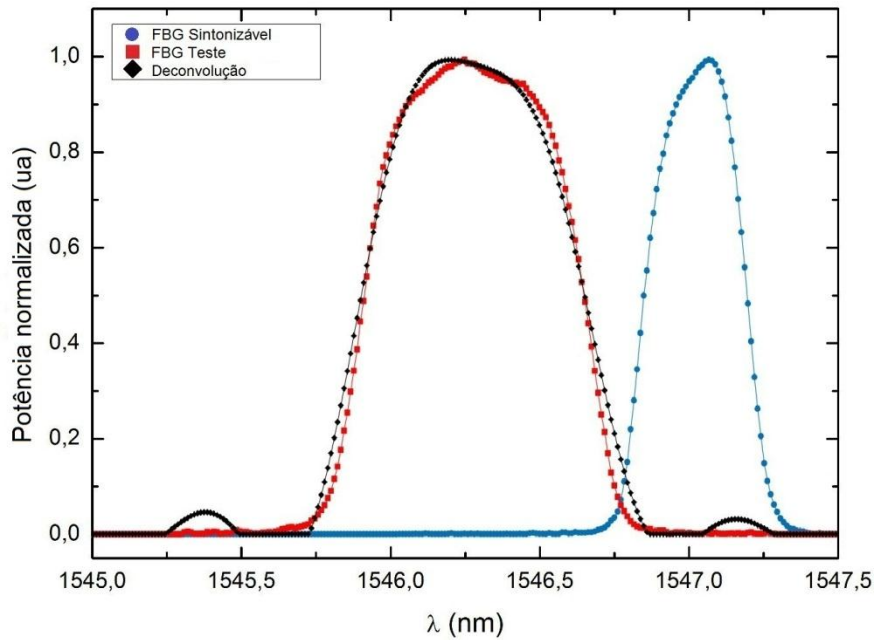
Figura 5.13. Painel de controle do Software de Deconvolução.

No painel de controle há dois cursores livres com os quais o usuário pode determinar a largura espectral e o λ_B das FBGs.

Na Figura 5.14 (a) pode-se ver o resultado da deconvolução sem a utilização do filtro, e na Figura 5.14 (b), o mesmo resultado com a aplicação do filtro dado pela Equação (3.15), enfatizando a importância da utilização de uma técnica de filtragem no processo de deconvolução.



(a)



(b)

Figura 5.14. (a) Perfis de deconvolução obtidos experimentalmente; (b) Média dos perfis de convolução.

A partir dos resultados obtidos, além do perfil aproximado da FBG_{UT} , foram obtidos os parâmetros: largura espectral $FWHM = 0,74$ nm, e $\lambda_B = 1546,20$ nm, ambos a partir do painel de controle do software de deconvolução.

Na Figura 5.14 pode-se ver que a aplicação do filtro foi imprescindível na determinação do perfil de reflexão da FBG_{UT}, o que nos permite inferir que a implementação de técnicas de filtragem mais sofisticadas do sinal da deconvolução pode trazer resultados muito mais precisos que os obtidos neste trabalho.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Neste trabalho, uma nova técnica de caracterização de grades de Bragg em fibra (FBGs) utilizando um método de deconvolução foi implementada e validada.

Os resultados obtidos dos parâmetros da FBG_{UT} utilizando esta técnica, comparados aos mesmos resultados obtidos no OSA, mostraram excelente acurácia e precisão [36] na determinação de sua largura espectral: obteve-se o valor de $\text{FWHM} = 0,74 \text{ nm}$ tanto a partir da deconvolução com a técnica proposta neste trabalho, como através da medida com o OSA.

Em relação ao comprimento de onda de Bragg λ_B , os resultados também apresentaram boa precisão e acurácia: $1546,20 \text{ nm}$ (resultado experimental obtido pela deconvolução), e $1546,24 \text{ nm}$ (resultado experimental obtido com o OSA), uma variação de $0,04 \text{ nm}$.

Em relação à forma do perfil de reflexão da FBG_{UT} , os resultados mostraram que a aplicação de filtragem é imprescindível na recuperação do seu perfil através da técnica de deconvolução. Na Figura 5.14 pode-se ver que a aplicação do filtro dado pela Equação (3.15) não retornou a forma exata do perfil de reflexão da FBG_{UT} , apesar de ter proporcionado a determinação de outros parâmetros, como o λ_B e largura espectral FWHM .

Além disso, a simples filtragem do sinal de deconvolução no domínio da frequência promoveu a remoção não somente dos muitos picos que não fazem parte do sinal, que foram introduzidos por erros de precisão numérica na operação de divisão do processo de deconvolução, como acabou por remover também componentes do próprio sinal, conforme

ilustrado na Figura 4.2. Isso fez com que a recuperação do perfil original da FBG fosse prejudicada, contribuindo dessa forma para o resultado observado.

Esses resultados mostraram que a implementação de técnicas de deconvolução mais sofisticadas pode trazer resultados muito mais precisos à recuperação da forma do espectro de reflexão de uma FBG, o que foi deixado para a próxima etapa da pesquisa neste assunto.

Finalmente, os resultados obtidos validam a técnica proposta e mostram que é possível aplicá-la à construção de um caracterizador de FBGs com precisão conhecida, portátil e de baixo custo.

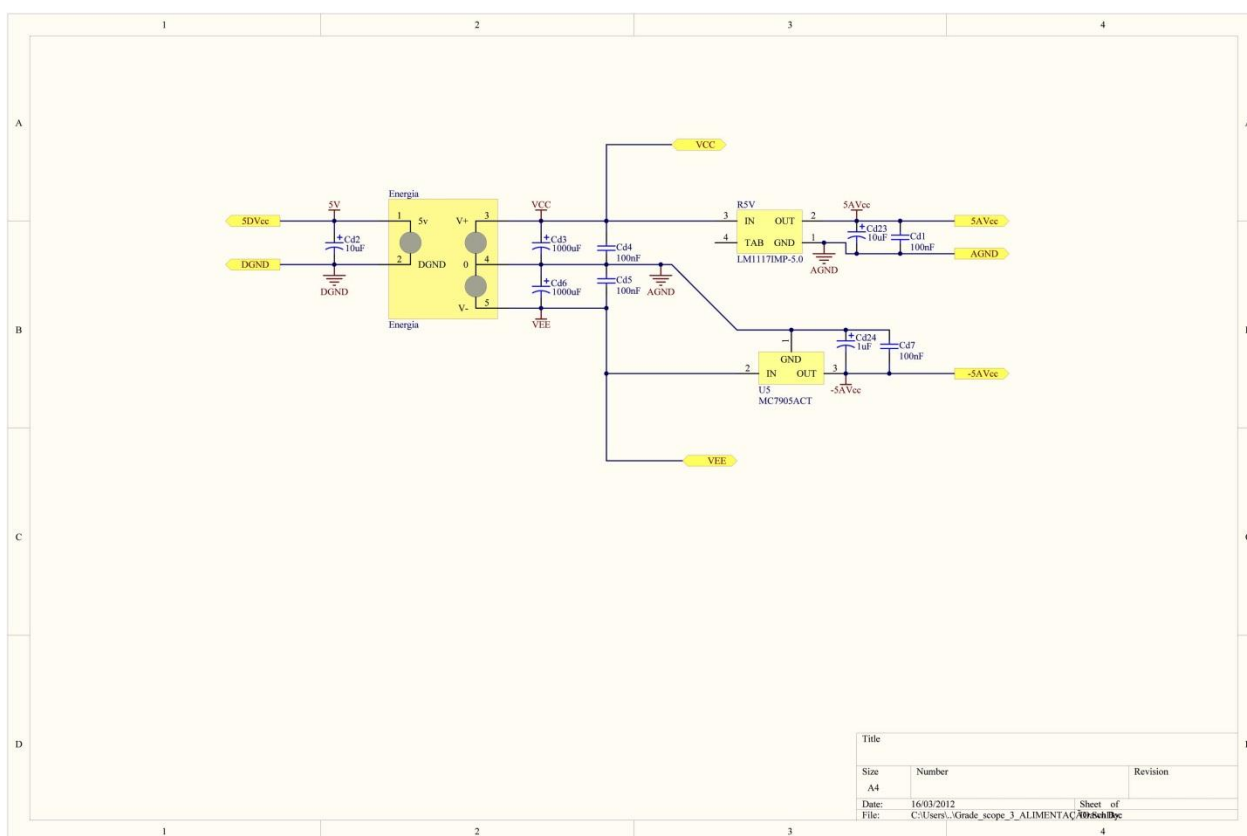
6.2 Perspectivas de trabalhos futuros

A ideia de aplicação da técnica proposta neste trabalho à construção de um dispositivo caracterizador de FBGs depende da continuação da pesquisa no assunto e da implementação de várias modificações e aperfeiçoamentos nos seguintes itens:

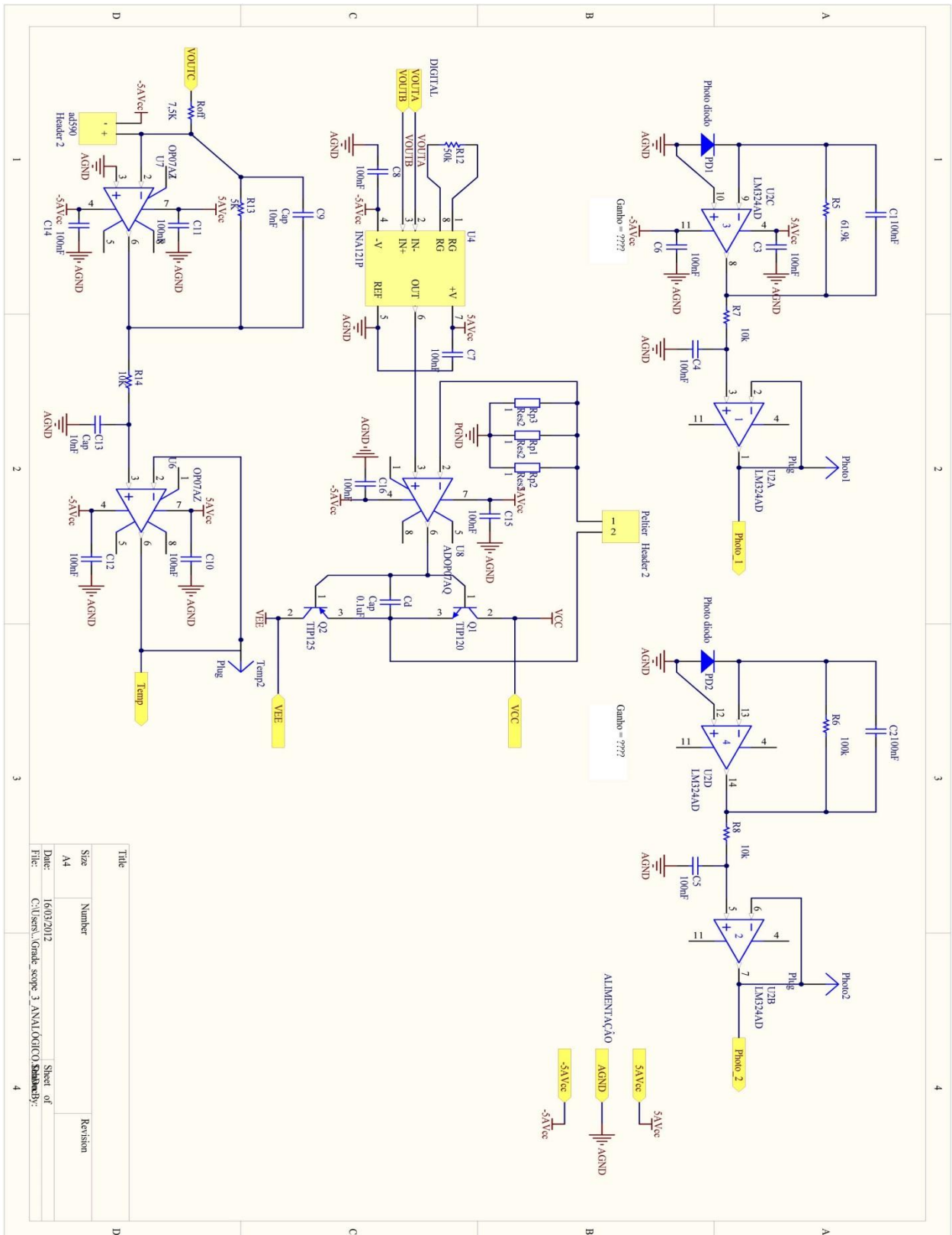
- Integração do Software de Controle e Aquisição e do Software de Deconvolução em um único aplicativo;
- Implementar via software a análise do perfil ótimo de deconvolução;
- Implementar um procedimento que analisa também a refletividade da FBG_{UT} ;
- Estudo da influência do revestimento da fibra óptica no comportamento da excursão da FBG_{TUN} e no perfil da convolução entre os perfis das FBGs;
- Utilização de outras FBG_{TUN} com outros perfis e larguras espectrais e a fim de fazer um estudo do perfil mais adequado para implementação da técnica;
- Estudo, simulação e implementação de técnicas de deconvolução mais sofisticadas a fim de se recuperar com maior precisão a forma do perfil de reflexão da FBG_{UT} ;
- Utilização de transdutores piezoelétricos multicamadas para promover a excursão mecânica do λ_B da FBG_{TUN} , o que pode aumentar bastante a excursão atual e consequentemente a faixa espectral do dispositivo.

Apêndice A – Esquemáticos das placas eletrônicas

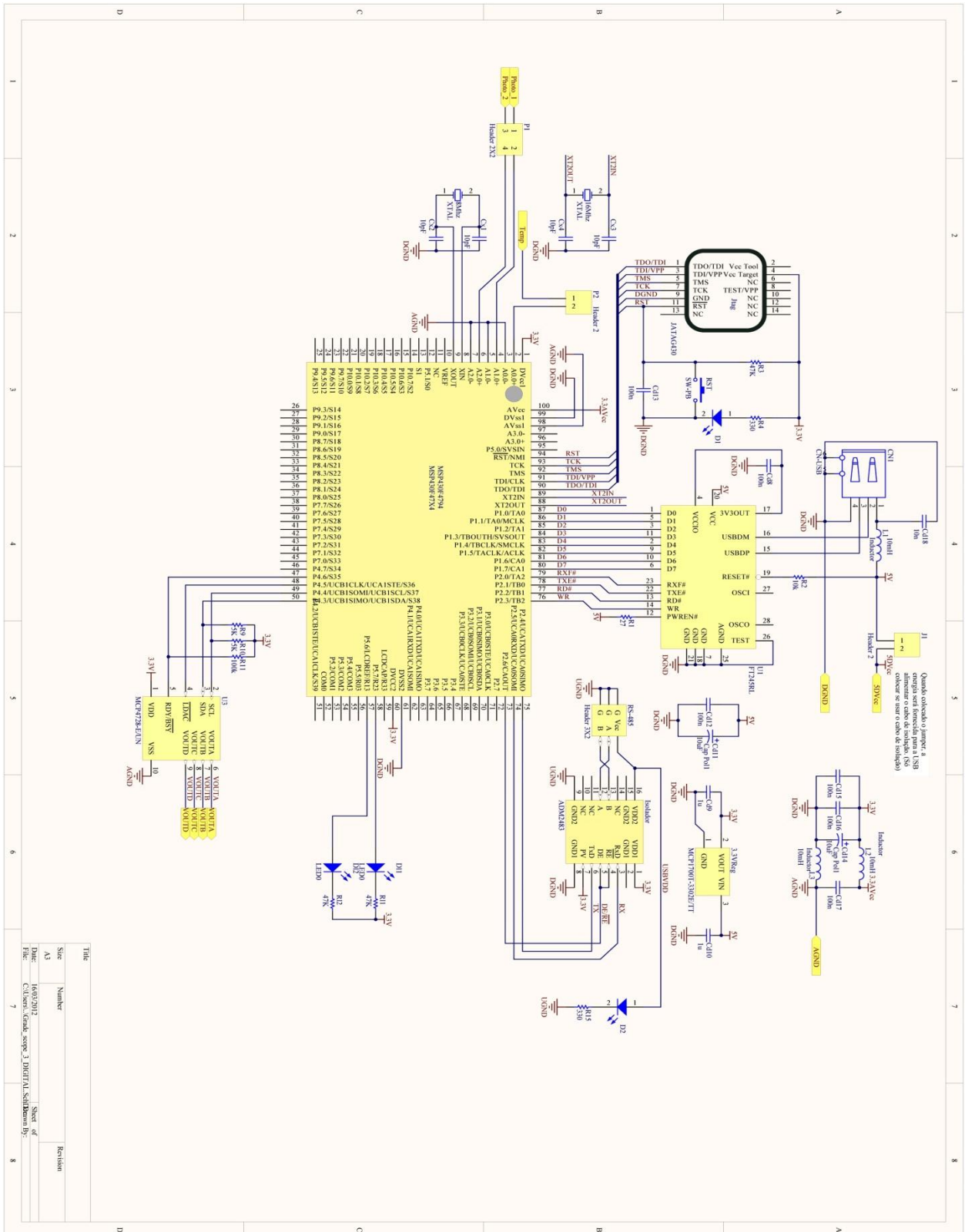
A1 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Alimentação.



A2 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Parte Analógica.



A3 – Esquemático do Módulo de Controle e Aquisição – Parte Digital.





Referências Bibliográficas

1. BCC RESEARCH. Fiber Optic Sensors - Global Markets (Report IAS002E Highlights). **BCC Research Market Forecasting**, 2011. Disponível em: <<http://www.bccresearch.com/report/fiber-optic-sensors-market-technology-ias002e.html>>. Acesso em: 10 January 2012.
2. LOBO RIBEIRO, A. B. et al. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme. **Applied Optics**, v. 36, n. 4, p. 934-939, Fevereiro 1997.
3. KASHYAP, R. **Fiber Bragg Gratings**. 2^a. ed. Londres: Academic Press, 2010.
4. OTHONOS, A. . K. K. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. London: Artech House, 1999.
5. KREUZER, M. **Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors**. HBM GmbH. Darmstadt, p. 27. 2007. (S2338-1.0 en).
6. ITU-T STUDY GROUP 15 (1997-2000). **ITU-T Recommendation G.652 (10/2000): Characteristics of a single-mode optical fibre cable**. International Telecommunication Union. [S.l.], p. 24. 2001.
7. INUI, T.; KOMUKAI, T.; NAKAZAWA, M. Highly efficient tunable fiber Bragg grating filters using multilayer piezoelectric transducers. **Optics Communications**, v. 190, n. 1-6, p. 1-4, Abril 2001.
8. DA COSTA, E. F. **Nova técnica eletrônica para medida de temperatura com resolução de 0,5 m°C usando sensores de fibras ópticas com grades de Bragg**. 2009. 60 p. Dissertação (Mestre) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2009.
9. LEITE, R. L. **Uma contribuição ao estudo e desenvolvimento de sensores de alta tensão baseados em fibras ópticas**. 2006. 124 p. Tese (Doutor) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2006.
10. CREMONEZI, A. O. **Projeto de Transdutor de Corrente Elétrica para Alta Tensão com nova abordagem de detecção magnetostritiva e sensoriamento óptico, utilizando Terfenol-D e grade de Bragg em fibra óptica**. 2011. 91 p. Dissertação (Mestre) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2011.
11. GONZALEZ; WOODS; EDDINS. **Digital Image Processing Using MATLAB**. 2^a. ed. [S.l.]:

- Gatesmark Publishing, 2009.
12. SMITH, S. W. **'The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing'**. San Diego: California Technical Publishing, 1997.
 13. G. B. ARFKEN, H. J. W. **'Essential Mathematical Methods for Physicists'**. London: Academic Press, 2003.
 14. RILEY, K. F.; HOBSON, M. P.; BENICE, S. J. **Mathematical Methods for Physics and Engineering**. 3ª. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
 15. HANSEN, P. C. Deconvolution and regularization with Toeplitz matrices. **Numerical Algorithms**, v. 29, p. 323-378, 2002.
 16. WING, G. M. **A primer on integral equations of the first kind: the problem of deconvolution and unfolding**. Baltimore: SIAM, 1991.
 17. RIAD, S. M. The Deconvolution Problem: An Overview. **Proceedings of the IEEE**, v. 74, n. 1, p. 82-85, Janeiro 1986.
 18. EKSTROM, M. P. A Spectral Characterization of the Ill-Conditioning in Numerical Deconvolution. **IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics**, v. AU-21, n. 4, p. 344-348, Agosto 1973.
 19. SALAMI, M. J. E.; SIDEK, S. N. Performance Evaluation of the Deconvolution Techniques used in Analysing Multicomponent Transient Signals. **TENCON 2000. Proceedings**, Kuala Lumpur, Malaysia, 24-27 Setembro 2000. 487-492.
 20. GRAY, R. M. **Toeplitz and circulant matrices: a review**. Stanford: NOW, 2009.
 21. MUSICUS, B. R. **Levinson and fast Choleski algorithms for Toeplitz and almost Toeplitz matrices - RLE Technical Report No. 538**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge. 1988.
 22. PARRUCK, B.; RIAD, M. S. Study And Performance Evaluation Of Two Iterative Frequency-Domain Deconvolution Techniques. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. IM-33, n. 4, p. 281-287, Dezembro 1984. ISSN 0018-9456.
 23. FUTURE TECHNOLOGY DEVICES INTERNATIONAL LTD. **FT232R USB UART IC v.2.09, Technical Datasheet**. [S.l.]: [s.n.], 2010. 43 p.
 24. ANALOG DEVICES, INC. **Half-Duplex, iCoupler Isolated RS-485 Transceiver ADM2483 - Rev. B, Technical Datasheet**. [S.l.]: [s.n.], 2005. 20 p.
 25. JDS UNIPHASE CORPORATION. **Product Bulletin - EPM 6xx Series - Rev. 001 - 11/02**. [S.l.]: [s.n.], 2002. 7 p.
 26. TEXAS INSTRUMENTS, INC. **MSP430F47x3, MSP430F47x4 Mixed Signal Microcontroller Datasheet - SLAS545C**. [S.l.]: [s.n.], 2011. 79 p.
 27. ANALOG DEVICES, INC. **2-Terminal IC Temperature Transducer AD590 - Rev. E, Technical Datasheet**. Norwood: [s.n.], 2009. 16 p.

28. LAIRD TECHNOLOGIES, INC. **Ceramic Plate Series CP10,31,05 Thermoelectric Modules, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2008. 2 p.
29. LIDE, D. R. (Ed.). **CRC Handbook of Chemistry and Physics.** 92. ed. [S.l.]: Taylor and Francis Group, LLC, 2012.
30. EPOXY TECHNOLOGY, INC. **EPO-TEK® 301 Technical Data Sheet - Rev. 10/2006, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2006. 1 p.
31. ARMACELL LLC. **AP Armaflex® Sheet & Roll Insulation, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2011. 4 p.
32. DENSELIGHT SEMICONDUCTORS. **DL-BX9/BX10/BZ1 Series Integrated Box SLED - 317-09-0601, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2001. 2 p.
33. JDS UNIPHASE CORPORATION. **Polarization-insensitive Circulator, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2011.
34. JDS UNIPHASE CORPORATION. **Fused Couper, Single Window, Low loss C+L Band or S band FFCK Series, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2008.
35. YOKOGAWA ELECTRONIC CORPORATION. **AQ6331 optical Spectrum Analyzer - Ed. 01/b, Technical Datasheet.** [S.l.]: [s.n.], 2004. 8 p.
36. VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros.** São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1992.