

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

FREDERIC CONRAD JANZEN

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE DADOS
DE INTERROGADORES ÓTICOS E DETECÇÃO DE PICO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2012

FREDERIC CONRAD JANZEN

**FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA AQUISIÇÃO DE DADOS
DE INTERROGADORES ÓTICOS E DETECÇÃO DE PICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Fotônica em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Cicero Martelli

CURITIBA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

J35 Janzen, Frederic Conrad
Ferramenta computacional para aquisição de dados de interrogadores óticos e
detecção de pico / Frederic Conrad Janzen. — 2012.
77 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Cícero Martelli.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa
de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2012.

Bibliografia: f. 74-76.

1. Fibras óticas. 2. Redes de Bragg. 3. Detectores óticos. 4. Software –
Desenvolvimento. 5. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Martelli, Cícero, orient. II.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

Título da Dissertação Nº.615

“Ferramenta Computacional Para Aquisição de Dados de Interrogadores Ópticos e Detecção de Pico”

por

Frederic Conrad Janzen

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Fotônica em Engenharia, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 26 de outubro de 2012. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

Prof. Cicero Martelli, Dr.

(Presidente – UTFPR)

Prof^a. Sully Milena Mejía Quintero, Dr.

(PUC - Rio)

Prof. Jean Carlos Cardozo da Silva, Dr.

(UTFPR - PB)

Prof. Carlos Eduardo Ferrante do Amaral, Dr.

(UTFPR)

Visto da coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.

(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu cuidado e sustento para com minha vida.

A minha linda esposa Meri Elen Schelesky Janzen que sempre me apoiou e incentivou no desenvolvimento desse projeto e esteve ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador Cicero Martelli pelo incentivo e orientação.

Aos colegas de Laboratório pela auxilio e paciência para comigo.

A Universidade Tecnológica do Paraná pela estrutura e ambiente para o desenvolvimento do trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

RESUMO

JANZEN, Frederic Conrad. Ferramenta Computacional para Aquisição de Dados de Interrogadores Óticos e Detecção de Pico. 2012. 77 f. Dissertação – Programa de Pós Graduação Em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Sensores óticos baseados em redes de Bragg em fibras óticas estão se tornando uma tecnologia madura e ganhando espaço nas indústrias das mais diversas áreas. Para tal, essa tecnologia deve estar adaptada para ser integrada facilmente ao meio industrial. Com base nisso esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para duas tecnologias de interrogação de sensores baseados em Redes de Bragg em fibras óticas (FBGs). Além de adquirir os dados dos interrogadores a ferramenta computacional tem por objetivo processar os dados, para isso foi necessário o desenvolvimento de um algoritmo de detecção de picos. Este trabalho também apresenta os resultados obtidos de comparações entre as ferramentas comerciais para cada tecnologia de interrogação e a ferramenta desenvolvida durante esta pesquisa.

Palavras – chave: FBG, Interrogadores óticos, Detecção de Pico.

ABSTRACT

JANZEN, Frederic Conrad. *Software For Data Aquisition of Optical Interrogation Systems and Peak Detection*. 77 f. Dissertação – Programa de Pós Graduação Em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

Optical sensors based on Fiber Bragg Gratings technologies are becoming a mature technology and starting to com now in the industrial area. To make this possible this technology need to be adapted to be easily integrated in the existing industrial systems. Based on this considerations, this research presents the development of a computational tool for two Fiber Bragg Gratings interrogation technologies. In addition to acquiring data from the interrogator the computational tool is intended to process the data, and this makes necessary to develop a peak detection algorithm. This work also presents the results obtained by comparing the commercial software's of each interrogation system to the computational toll developed during this research.

Keywords: FBG, Optical Interrogation Systems, Peak Detection.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ILUSTRAÇÃO APRESENTANDO O FUNCIONAMENTO DE UMA REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA. (ADAPTADO DE PAWEL, 2012).....	18
FIGURA 2 - PERFIL DE MODULAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO NÚCLEO DE UMA FIBRA ÓTICA. AS SETAS QUE APONTAM PARA A DIREITA REPRESENTAM A LUZ TRANSMITIDA, SENTIDO PROPAGANTE ENQUANTO AS SETAS CURVAS REPRESENTAM A LUZ REFLETIDA, SENTIDO CONTRAPROPAGANTE (ADAPTADO DE ZHAO, 2001).	19
FIGURA 3 - TÉCNICA DE GRAVAÇÃO DE FBGS UTILIZANDO MÁSCARA DE FASE. A LUZ UV INCIDE PERPENDICULARMENTE COM A FACE SUPERIOR DA MÁSCARA DE FASE A QUAL DIFRATA OS RAIOS EM DUAS ORDENS $M = +1$ E $M = -1$ QUE GERAM O PADRÃO DE INTERFERÊNCIA QUE CRIA AS MODULAÇÕES DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO NO NÚCLEO DA FIBRA ÓTICA (ADAPTADO DE KASHYAP, 1999).....	22
FIGURA 4 - FBG UNIFORME GERADA COM SOFTWARE (ADAPTADO DE PATERNO, 2006).....	24
FIGURA 5 - PERFIL DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO PARA UMA APODIZAÇÃO GAUSSIANA (OTHONOS E KALLI, 1999).....	24
FIGURA 6 - ESPECTRO DE UMA FBG APÓS PASSAR POR UMA APODIZAÇÃO GAUSSIANA.....	24
FIGURA 7 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO PERFIL DE VARIAÇÃO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO CRESCENTE NO NÚCLEO DE UMA FIBRA ÓTICA CARACTERIZANDO UMA REDE DE BRAGG COM <i>CHIRP</i> (KASHYAP, 1999).	25
FIGURA 8 - ESPECTRO DE REFLEXÃO DE UMA REDE DE BRAGG COM <i>CHIRP</i>	25
FIGURA 9 - ESPECTRO DE REFLEXÃO DE UMA FIBRA ÓTICA CONTENDO TRÊS FBGS, ADQUIRIDO COM UM SISTEMA DE INTERROGAÇÃO COM RESOLUÇÃO DE 5 PM.....	27
FIGURA 10 - SISTEMA DE INTERROGAÇÃO DE <i>STRAIN</i> EM SENSORES DE FBG PROPOSTO POR MELLE ET AL, (1993).....	29
FIGURA 11 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO FUNCIONAMENTO DO INTERROGADOR SM_125 DA MICRON OPTICS UTILIZADO NESTE TRABALHO.....	30
FIGURA 12 - DESENHO ESQUEMÁTICO DO ALINHAMENTO EM 360° DO SISTEMA ÓTICO DO I_MOM (IBSEN PHOTONICS A/S, 2009).....	32
FIGURA 13 - GRÁFICO DA FOTSENSIBILIDADE POR COMPRIMENTO DE ONDA DE UM CCD INGAAS (HAMAMATSU, 2009).....	32
FIGURA 14 - APROXIMAÇÃO GAUSSIANA APLICADA SOBRE UM PICO IRREGULAR DE UMA FBG. A LINHA VERMELHA APRESENTA A APROXIMAÇÃO GAUSSIANA SENDO ESSA MUITO MAIS ESTÁVEL QUE O PICO ORIGINAL.....	35
FIGURA 15 - APROXIMAÇÃO POLINOMIAL APLICADA SOBRE UM PICO IRREGULAR DE UMA FBG. A LINHA VERMELHA APRESENTA A APROXIMAÇÃO POLINOMIAL SENDO ESSA MUITO MAIS ESTÁVEL QUE O PICO ORIGINAL.....	36

FIGURA 16:	FLUXOGRAMA DE COMUNICAÇÃO DO INTERROGADOR SM_125 DA MICRON ÓPTICS COM O SOFTWARE.....	42
FIGURA 17	- APRESENTAÇÃO DOS PASSOS DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO DESENVOLVIDO. O GRÁFICO A APRESENTA O ESPECTRO ORIGINAL DA FBG ANTES DE SER PROCESSADO, O GRÁFICO B MOSTRA O CONTORNO DO ESPECTRO DA FBG APRESENTADA NO GRÁFICO A APÓS PASSAR PELO PRIMEIRO PASSO DO ALGORITMO. O GRÁFICO C APRESENTA O RESULTADO DA DERIVADA 1ª DO CONTORNO DA FBG, E O GRÁFICO D APRESENTA O PROCESSAMENTO FINAL DO ALGORITMO ONDE A REGIÃO PRÓXIMA DO PICO DO ESPECTRO ORIGINAL DO GRÁFICO A É SEPARADO E UMA APROXIMAÇÃO GAUSSIANA É APLICADA PARA MELHORAR A ACURÁCIA DA DETECÇÃO DO PICO.....	46
FIGURA 18	- TELA DE SELEÇÃO DE INTERROGADOR DO <i>FBG SERVER</i>	50
FIGURA 19	- TELA DE CONFIGURAÇÃO DO IP PARA O <i>FBG SERVER</i> SE CONECTAR AO SM_125.....	51
FIGURA 20	- TELA DE CONFIGURAÇÃO DOS PARÂMETROS DE VARREDURA PARA O <i>I_MOM</i>	51
FIGURA 21	- ABA DE CONFIGURAÇÃO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICOS NO FBG.	52
FIGURA 22	- GRÁFICO TEMPO X COMPRIMENTO DE ONDA DOS PICOS QUE SÃO ENCONTRADOS PELO <i>FBG SERVER</i>	52
FIGURA 23:	ABA DE CONFIGURAÇÃO DO ARQUIVAMENTO E DOS COMPRIMENTOS DE ONDA DE PICO DETECTADOS PELO <i>FBG SERVER</i>	53
FIGURA 24	- IMAGEM DO SISTEMA DE CALIBRAÇÃO DE DEFORMAÇÃO DA UTFPR. A FIBRA CONTENDO A REDE DE BRAGG É COLADA SOBRE OS DOIS SUPORTES NAS EXTREMIDADES DO EQUIPAMENTO COM O POSICIONADOR LINEAR ENCONTRADO ABAIXO DO SUPORTE PERTO DO RELÓGIO COMPARADOR, ESSE TENCIONA A FIBRA APLICANDO TENSÃO SOBRE A REDE DE BRAGG SENDO A MESMA CONTROLADA ATRAVÉS DAS MEDIÇÕES FEITAS PELO RELÓGIO COMPARADOR.....	55
FIGURA 25:	ESPECTRO ORIGINAL DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA UTILIZADA NOS TESTES DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICOS. ESTE ESPECTRO FOI ADQUIRIDO COM O INTERROGADOR SM_125 COM O <i>SOFTWARE ENLIGHT</i>	57
FIGURA 26:	ESPECTRO DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA APÓS O PRIMEIRO PASSO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO DESENVOLVIDO NESTE PROJETO. OBSERVA-SE QUE APÓS O PROCESSAMENTO DO PRIMEIRO PASSO RESTAM APENAS OS CONTORNOS DE CADA REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA SENDO QUE OS LÓBULOS LATERAIS E RUÍDOS SÃO ELIMINADOS.....	58

FIGURA 27: RESULTADO DO SEGUNDO PASSO DO ALGORITMO, QUE APLICA UMA DERIVADA DE PRIMEIRA ORDEM AO SINAL DA FIGURA 26. O PONTO DE INFLEXÃO DE CADA DERIVADA CONDIZ COM A INTENSIDADE MÁXIMA DE CADA UMA DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA EM TESTE.	59
FIGURA 28: RESULTADO DO TERCEIRO PASSO DO ALGORITMO, QUE APLICA UM JANELA PRÓXIMA A CADA PONTO DE INFLEXÃO ENCONTRADO, SEPARANDO APENAS A REGIÃO PRÓXIMA AO PICO DE CADA REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA PARA SER APLICADA A APROXIMAÇÃO GAUSSIANA.....	59
FIGURA 29: APROXIMAÇÃO GAUSSIANA APLICADA AO SINAL DA FIGURA 28. A APROXIMAÇÃO GAUSSIANA MELHORA A ACURÁCIA DO ALGORITMO SENDO OS PONTOS CORRESPONDENTES AOS PICOS ENCONTRADOS NO FINAL DA EXECUÇÃO DE TODOS OS PASSOS. OS PICOS ENCONTRADOS ESTÃO SITUADOS EM 1533,055 E 1545,395 NM.....	60
FIGURA 30: GRÁFICO APRESENTANDO UM ESPECTRO SIMULADO ONDE, TODAS AS REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA PRESENTES SÃO A MESMA REDE COM A INTENSIDADE MULTIPLICADA POR 10, POR 100, E POR 1000. A INTENSIDADE FOI NORMALIZADA PARA QUE FOSSE POSSÍVEL VER AS REDES MENORES.....	60
FIGURA 31: ESPECTRO SIMULADO MULTIPLEXANDO 3 TIPOS DISTINTOS DE REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.	61
FIGURA 32: SUAVIZAÇÃO DOS PICOS APLICADA AO ESPECTRO DA FIGURA 31, SENDO O THRESHOLD UTILIZADO IGUAL A 34 DBM.	61
FIGURA 33: DERIVADA DO ESPECTRO SUAVIZADO.....	62
FIGURA 34: JANELAS CONTENDO OS PICOS DAS 5 REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA.	62
FIGURA 35: APROXIMAS DOS PICOS DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA. SENDO O NÚMERO DE PICOS DETECTADOS IGUAL A 5.....	62
FIGURA 36 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES AQUISITADOS PELO ENLIGHT E PELO <i>FBG SERVER</i> . OS DADOS CORRESPONDEM A MEDIA ENTRE DEZ MEDIÇÕES DE DEFORMAÇÃO CONSECUTIVAS FEITAS EM PARALELO COM OS DOIS <i>SOFTWARES</i>	63
FIGURA 37 - RESULTADOS DA COMPARAÇÃO ENTRE O ENLIGHT E O ALGORITMO DESENVOLVIDO PARA O SM_125, OS DADOS DIZEM RESPEITO À MÉDIA COM SEU DESVIO PADRÃO DE 10 MEDIDAS CONSECUTIVAS MAS NÃO PARALELAS DO DESLOCAMENTO DO POSICIONADOR DA POSIÇÃO 0 ATÉ A 0,1MM.	64
FIGURA 38 - ERRO ABSOLUTO ENTRE AS MEDIÇÕES DO ENLIGHT E DO <i>FBG SERVER</i> . O CÁLCULO FOI FEITO SUBTRAINDO-SE OS VALORES DE COMPRIMENTO DE ONDA MEDIDOS POR CADA SOFTWARE REFERENTES A CADA DESLOCAMENTO.....	64

FIGURA 39 - GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPRIMENTOS DE ONDA AQUISITADOS PELO I_MOM EXT EVALUTION 4.0 E O <i>FBG SERVER</i> .	65
FIGURA 40 - GRÁFICA DE COMPARAÇÃO ENTRE A VARIAÇÃO DO COMPRIMENTO DE ONDA PELO DESLOCAMENTO LONGITUDINAL PARA OS SOFTWARES I_MOM EXT EVALUTION 4.0 E <i>FBG SERVER</i> .	66
FIGURA 41 - GRÁFICO REPRESENTANDO O ERRO ABSOLUTO ENTRE AS MEDIÇÕES FEITAS PELOS SOFTWARE I_MOM EXT EVALUTION 4.0 E O <i>FBG SERVER</i> .	66
FIGURA 42 - GRÁFICO REPRESENTANDO OS ESPECTROS DE UMA REDE ADQUIRIDOS PELOS DOIS INTERROGADORES UTILIZADOS NO PROJETO. PODE SER OBSERVADA A DIFERENÇA ENTRE A RESOLUÇÃO DOS DOIS EQUIPAMENTOS ONDE A LINHA VERMELHA REPRESENTA O ESPECTRO ADQUIRIDO COM O SM_125 SENDO QUE O MESMO POSSUI UMA BANDA DE 50 NM COM 10000 PONTOS E A LINHA PRETA REFERENTE AO I_MOM CUJA BANDA É DE 80 NM COM 512 PONTOS AQUISITADOS.	68
FIGURA 43 - ERRO ABSOLUTO ENTRE OS SOFTWARES COMERCIAIS ENLIGHT E I_MOM EXT EVALUTION 4.0.	68
FIGURA 44 - ERRO ABSOLUTO DO <i>FBG SERVER</i> ENTRE OS DOIS SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO.	69
FIGURA 45 - TELA CRIADA NO SOFTWARE SUPERVISÓRIO ELIPSE E3 PARA AVALIAR A CAPACIDADE DE INTEGRAÇÃO DO <i>FBG SERVER</i> COM SOFTWARES QUE DISPONIBILIZAM COMUNICAÇÃO VIA PROTOCOLO OPC.	70

LISTA DE ABREVIATURAS

CCD	<i>Charge Cupled Device</i>
dll	<i>Dinamic link library</i>
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
FBG	<i>Fiber Bragg Grating</i>
FBGs	<i>Fiber Bragg Gratings</i>
FFP-TF	<i>Fiber Fabry-Perot Tunable Filter</i>
InGaAs	<i>Índio, Gálio e Arsênico</i>
LSB	<i>Last-Significant-Byte</i>
OPC	<i>OLE for Process Contro</i>
PZT	<i>Piezoelétrico</i>
SOA	<i>Semiconductor Optical Amplifier</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol / Internet Protocol</i>
TFBG	<i>Tunable Fiber Bragg Grating</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTFPR	<i>Universidade Tecnológica Federal do Paraná</i>
VI	<i>Virtual Instrument</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Hz	Hertz
mm	milímetro
nm	nanômetro
pm	picômetro
μ strain	unidade de media de deformação
μ m	micrômetro
μ s	microsegundos
n_{cl}	índice de refração da casca de uma fibra ótica
n_{co}	índice de refração do núcleo de uma fibra ótica
s	segundo
λ	comprimento de onda
λ_B	comprimento de onda de Bragg
$^{\circ}$ C	Graus Célsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	SENSORES A REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	16
2.1	HISTÓRICO DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA	16
2.2	EQUACIONAMENTO DA REFLETIVIDADE DAS REDES DE BRAGG	19
2.3	SENSIBILIDADE A VARIÁVEIS EXTERNAS	20
2.4	TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO.....	22
2.5	TIPOS DE PERFIL DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO	23
2.5.1	Redes Apodizadas.....	23
2.5.2	Redes com <i>Chirp</i>	25
3	TÉCNICAS DE DEMODULAÇÃO	26
3.1	SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO ÓTICOS	26
3.1.1	Visão Geral.....	26
3.1.2	Técnica de interrogação utilizando fonte sintonizável.....	30
3.1.3	Técnica espectroscópica	31
3.2	TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE PICO	33
4	DESCRIÇÃO DO PROGRAMA	37
4.1	COMUNICAÇÃO COM O SM_125	37
4.1.1	Abertura do canal de comunicação	38
4.1.2	Recepção e decodificação dos dados	39
4.2	COMUNICAÇÃO COM I-MOM	42
4.2.1	Estabelecer comunicação com I-MOM	43
4.2.2	Funções para configuração da leitura de dados do I-MOM	43
4.3	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO.....	46
4.4	DESENVOLVIMENTO DE <i>SOFTWARE</i> INTEGRADO.....	48
4.4.1	DESENVOLVIMENTO DO <i>SOFTWARE</i>	49
4.4.2	DESENVOLVIMENTO DO COMPARTILHAMENTO DE DADOS.....	53
4.5	METODOLOGIA DOS TESTES DO <i>SOFTWARE</i>	54
5	RESULTADOS E ANÁLISES	57
5.1	ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO	57
5.2	ENLIGHT VERSUS <i>FBG SERVER</i>	63
5.3	I-MOM EXT EVALUTION 4.0 VERSUS <i>FBG SERVER</i>	64
5.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS SOFTWARES COMERCIAIS E <i>FBG SEVER</i>	66
5.5	CAPACIDADE DE INTEGRAÇÃO DO <i>FBG SERVER</i>	69
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	71

6.1	TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	74
	ANEXO A	77

1 INTRODUÇÃO

As redes de Bragg em fibras óticas tem sido motivo de grande estudo durante as últimas décadas tanto para aplicação na área das telecomunicações quanto para o desenvolvimento de sensores. Por conta das inúmeras vantagens em relação aos sensores eletrônicos como, sua grande capacidade de multiplexação, alta imunidade a ruídos eletromagnéticos, diâmetro da ordem de 200 μ m, flexibilidade mecânica e tolerância à altas temperaturas. Os sensores baseados em redes de Bragg em fibra ótica têm sido aplicados nas mais diversas áreas, por exemplo, na indústria petrolífera, construção civil e na área biomédica (OTHONOS e KALLI, 1999).

Outra vantagem desse tipo de sensores é que um mesmo sensor pode ser utilizado para medir deformação e temperatura, ou seja, uma mesma estrutura básica, que é a rede de Bragg inscrita no núcleo. Isso significa que o sinal recebido dos diversos tipos de sensores, das mais diversas áreas citadas acima, é exatamente igual, o que torna possível que um único equipamento com um único canal possa fazer a leitura de diversos tipos de variáveis simultaneamente.

Interrogadores Óticos são equipamentos utilizados para a aquisição do sinal dos sensores a rede de Bragg em Fibra Ótica, os quais são responsáveis pela transdução do sinal ótico em sinal elétrico e também pela transmissão dos dados para uma unidade de processamento, onde o espectro é tratado e a variação no comprimento de onda de pico é detectada. Inúmeras técnicas de interrogação de FBGs (*Fiber Bragg Gratings*) têm sido demonstradas, sendo as principais, as técnicas espectrométricas e por lasers sintonizáveis (NIEWCZAS *et al.*, 2003).

O processamento dos dados adquiridos pelo sistema de interrogação consiste basicamente em encontrar o comprimento de onda central dos espectros refletidos (ZHAOXIA e HAILI, 2011). Técnicas de detecção de picos têm sido desenvolvidas, variando desde algoritmos simples como os apresentados em (BODENDORFER *et al.*, 2009) até complexas redes neurais apresentadas por (PATERNO *et al.*, 2006). Depois de detectado o pico, seu respectivo comprimento de onda é convertido para a unidade da variável mensurada através de curvas de calibração.

Após mais de duas décadas de desenvolvimento os sensores baseados nas redes de Bragg em Fibra Ótica estão começando a consolidar espaço comercial. Uma área crucial para que se tornem utilizáveis em larga escala é a integração dos

softwares que processam os dados das FBGs com os *softwares* de monitoramento de sensores já existentes no mercado. Os *softwares* que acompanham os sistemas de interrogação, ainda são em sua maioria desenvolvidos para trabalhos em laboratório ou são na maioria dos casos rudimentares para a integração com sistemas supervisórios industriais.

O presente trabalho compreende o desenvolvimento de um software para a detecção dos picos de redes de Bragg em Fibra Ótica, para os dois sistemas de interrogação atualmente disponíveis nos laboratórios do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da UTFPR – Câmpus Curitiba, sendo um estático, baseado em técnicas de laser sintonizável, e outro dinâmico, utilizando a técnica de dispersão do sinal ótico sobre um CCD linear através de uma rede de difração. Além da detecção de pico o *software* desenvolvido disponibiliza os comprimentos de onda de pico encontrados em duas formas distintas, para que possam ser facilmente acessados por outros programas sejam eles de uso industrial ou implementados pelos alunos do programa para processar os dados dos seus experimentos de forma mais rápida e eficaz que a atual.

A presente dissertação é dividida em seis capítulos. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre as redes de Bragg em Fibra Ótica descrevendo a teoria envolvida e seu funcionamento. O capítulo 3 descreve as principais técnicas de interrogação de sensores baseados na tecnologia de redes de Bragg em Fibra Ótica e as técnicas de detecção de picos mais utilizadas pelos *softwares* de processamento dos interrogadores óticos. No capítulo 4 é descrito o desenvolvimento do *software* para processamento e compartilhamento de dados adquiridos pelos dois interrogadores disponíveis nos laboratórios da UTFPR – Câmpus Curitiba, descrevendo a comunicação com o hardware a detecção dos sensores e a integração com outros *softwares*. Por fim no capítulo 5 os resultados são discutidos e trabalhos futuros são apresentados.

2 SENSORES A REDE DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

2.1 HISTÓRICO DAS REDES DE BRAGG EM FIBRA ÓTICA

Em 1978, HILL *et al.* (1978), durante um experimento onde estudavam efeitos não lineares em fibras óticas, acoplando a radiação emitida por um laser de argônio no núcleo de fibras óticas, observaram que a intensidade da luz refletida aumentava com o tempo de exposição ao laser. Após estudos mais aprofundados, esse fenômeno foi atribuído à formação de modulações periódicas do índice de refração no núcleo da fibra. Quando a onda transmitida encontrava o final da fibra ótica ocorria o fenômeno de reflexão de Fresnel, isso fazia com que as ondas transmitida e refletida (aproximadamente 4%) formassem uma onda estacionária, modulando os índices de refração nos pontos de máximo (OTHONOS E KALLI, 1999). Os filtros criados por HILL *et al.* (1978), foram denominados de Redes de Hill, e a sua formação foi atribuída à fotossensibilidade da fibra ótica de sílica dopada com Germânio.

Utilizando fibras óticas dopadas com germânio, as quais foram propostas por Lam e Garside (1981), por apresentarem uma fotossensibilidade maior do que a utilizada por Hill *et al.* (1978), Meltz e colaboradores (1989) inovaram o sistema de gravação que era baseado no acoplamento de um feixe de laser de argônio à fibra para um sistema externo à mesma. Nesse caso as modulações do índice de refração eram geradas através de métodos interferométricos. O feixe do laser era dividido em dois feixes, dos quais um sofria um atraso de fase e quando os dois feixes eram novamente reagrupados apareciam os padrões de interferência, a fibra era então colocada na região da interferência onde os máximos das franjas de interferência alteravam o índice refração. Isso permitia que o comprimento de onda refletido pela rede de Bragg pudesse ser sintonizado. Nesse ponto as estruturas formadas já recebiam o nome de Redes de Bragg (MELTZ *et al.*, 1989).

O efeito da luz refletida dentro das redes de Hill pode ser explicado através dos trabalhos de William Henry Bragg e Willian Lawrence Bragg (BRAGG, 1913, conf. SLATER, 1958), por tal motivo, como homenagem aos Bragg, o nome das redes de Hill foi alterado para redes de Bragg. Em suas análises de estruturas

crystalinas utilizando difração de raios X, eles foram capazes de explicar matematicamente as reflexões dos raios X causadas pelos planos atômicos da estrutura do cristal em relação ao ângulo de incidência do raio. A explicação dada pelos Bragg consistia que o arranjo simétrico dos átomos dentro de um cristal podia ser modelado como vários planos paralelos separados por uma distância constante. Isso faz com que os raios refletidos pelo segundo plano de átomos interfira construtivamente com os refletidos pelo primeiro plano, e assim por diante, seguindo a lei de Bragg, (Equação 1), que diz qual será comprimento de onda refletido dependendo do ângulo de incidência e da distância entre os planos atômicos do cristal (BRAGG, 1913, conf. SLATER, 1958).

$$n \lambda = 2 d \sin(\theta) \quad (1)$$

Na Equação 1, n representa os múltiplos do comprimento de onda representado por λ , a distância entre os planos atômicos é descrito por d e θ representa o ângulo de incidência dos raios X.

Pode-se considerar que a modulação periódica do índice de refração causada durante a gravação de uma rede de Bragg em uma fibra ótica age da mesma forma que os planos atômicos de um cristal, ou seja, ao incidir-se luz em uma rede de Bragg esta se depara com a primeira interface e sofre reflexão e transmissão conforme as leis de Snell e Fresnel, Equações 2 e 3 respectivamente. A parte transmitida se encontra com a segunda interface e novamente parte é transmitida e parte é refletida, os comprimentos de onda refletidos em fase interferem construtivamente formando o pico de reflexão enquanto as reflexões fora de fase interferem destrutivamente conforme pode ser visto na Figura 1.

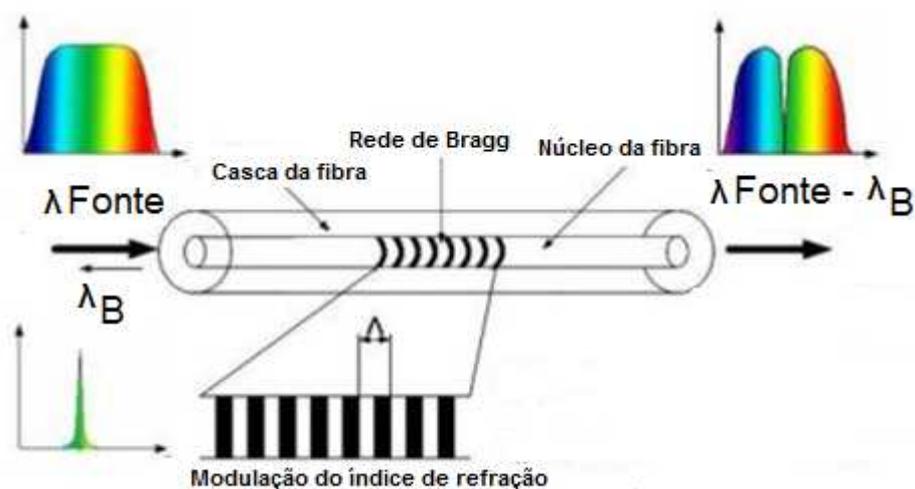


Figura 1 - Ilustração apresentando o funcionamento de uma rede de Bragg em Fibra Ótica. (adaptado de PAWEL, 2012).

$$\text{sen}(\theta_i) \cdot n_1 = \text{sen}(\theta_r) \cdot n_2 \quad (2)$$

$$R = \frac{n_1 \cdot \cos(\theta_i) - n_2 \cdot \cos(\theta_t)}{n_1 \cdot \cos(\theta_i) + n_2 \cdot \cos(\theta_t)} + \frac{n_2 \cdot \cos(\theta_i) - n_1 \cdot \cos(\theta_t)}{n_1 \cdot \cos(\theta_i) + n_2 \cdot \cos(\theta_t)} \quad (3)$$

$$n \lambda_B = 2 \Lambda n_{\text{eff}} \quad (4)$$

A Equação de Bragg (Equação 4), demonstra como as modulações do índice de refração no núcleo da fibra ótica afetam o comprimento de onda do pico refletido. A variável Λ na Equação 4, diz respeito ao período das modulações, ou seja, a distância entre uma modulação e outra e o n_{eff} corresponde ao índice de refração efetivo.

Além do pico refletido conhecido como pico de reflexão de Bragg, existem picos com intensidades menores ao redor do mesmo, chamados de lóbulos laterais. Os lóbulos laterais são formados pelas múltiplas reflexões dentro da estrutura periódica. Isso ocorre pelo fato de que além do período principal que é descrito por Λ na Equação 4, existem outros períodos dentro da mesma estrutura, os quais fazem com que surjam outros picos, que nada mais são do que o mesmo fenômeno que gera o pico de Bragg mas para outros comprimentos de onda. É importante ressaltar que a intensidade desses é menor que o pico principal pelo fato de o número de interfaces para estes ser menor. (KASHYAP, 1999).

2.2 EQUACIONAMENTO DA REFLETIVIDADE DAS REDES DE BRAGG

Numa rede de Bragg em fibra ótica uniforme pode-se descrever o perfil de modulação do índice de refração como sendo uma função cosseno ao longo da distância longitudinal z como demonstra a Equação 5. A Figura 2 apresenta uma imagem esquemática da modulação do índice de refração em uma rede de Bragg em Fibra Ótica.

$$n(z) = n_0 + \delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (5)$$

Na Equação 5, n_0 representa o índice de refração médio e δn é a amplitude do sinal de modulação do índice de refração. Os valores de δn normalmente se encontram entre 10^{-5} e 10^{-3} .

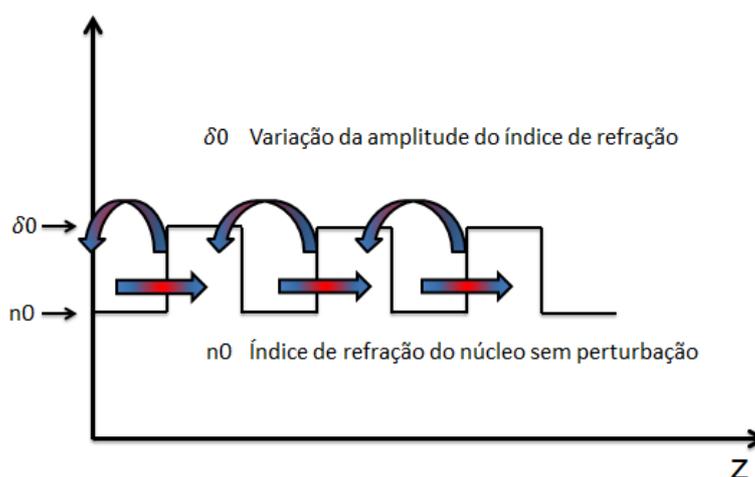


Figura 2 - Perfil de modulação do índice de refração do núcleo de uma fibra ótica. As setas que apontam para a direita representam a luz transmitida, sentido propagante enquanto as setas curvas representam a luz refletida, sentido contrapropagante (adaptado de ZHAO, 2001).

Vários trabalhos já modelaram matematicamente uma rede de Bragg em Fibra Ótica, entre os mais citados estão os trabalhos de Lam e Garside (1981) e Erdogan (1997). Os dois trabalhos apresentam a resolução matemática dos modos acoplados para uma rede de Bragg tendo como resultado a Equação dos espectros transmitido e refletido pela estrutura periódica. A Equação 6 representa o espectro refletido por uma rede de Bragg em Fibra Ótica.

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

Na Equação 6, l representa a comprimento da rede de Bragg, Ω representa o coeficiente de acoplamento que é dado pela Equação 7, Δk é a variação da constante de propagação representada pela Equação 8.

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n}{\lambda} M_p \quad (7)$$

$$\Delta k = \frac{2\pi n_0}{\lambda} - \frac{\pi}{\lambda} \quad (8)$$

A variável M_p na Equação 7 é a fração de potência contida no núcleo da fibra. Para a condição de uma rede de Bragg uniforme, M_p pode ser aproximado para a Equação 9, onde n_{co} e n_{cl} são, respectivamente, os índices de refração do núcleo e da casca da fibra .

$$M_p = 1 - \left(\left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) a \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \right)^{-2} \quad (9)$$

Considerando-se que no ponto de máximo da reflexão de Bragg $\Delta k=0$, pode-se reduzir a Equação 6 para a Equação 10 (OTHONOS e KALLI, 1999).

$$R(l,\lambda) = \tanh^2(\Omega l) \quad (10)$$

2.3 SENSIBILIDADE A VARIÁVEIS EXTERNAS

Um sensor é considerado como o elemento de um instrumento de medição que é diretamente afetado pelo mensurando (OTHONOS e KALLI, 1999).

No mesmo trabalho em que Meltz e colaboradores (MELTZ *et al.*, 1989) demonstraram o método de gravação interferométrico, os autores também propuseram a utilização das redes de Bragg como sensores de deformação e temperatura (MELTZ *et al.*, 1988).

Analisando-se a Equação 4 observa-se que o comprimento de onda refletido ou também chamado de comprimento de onda de Bragg, ou comprimento de onda

de ressonância, depende do índice de refração efetivo n_{eff} e do período da rede Λ , então ao tracionarmos a fibra contendo uma rede de Bragg ou ao aquecê-la, estes sofrem alterações e conseqüentemente o pico do comprimento de onda refletido se desloca em comprimento de onda (OTHONOS e KALLI, 1999).

A descrição do deslocamento do comprimento de onda por conta de tensão longitudinal e variação de temperatura podem ser escritas a partir das Equações 11 e 12 (MELTZ *et al*, 1989).

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - p_e)\epsilon \quad (11)$$

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \xi)\Delta T \quad (12)$$

Na Equação 11, $\Delta\lambda_B$ corresponde ao deslocamento do pico, λ_B corresponde ao comprimento de onda de Bragg, p_e diz respeito ao coeficiente fotoelástico da fibra ótica e ϵ é a deformação longitudinal aplicada à fibra cuja unidade é o *microstrain*, que é igual a uma deformação de 10^{-6} metro em um metro de fibra ótica.

Na Equação 12 os coeficientes α , ξ e ΔT equivalem respectivamente ao coeficiente de expansão térmica da sílica, ao coeficiente termo ótico da fibra e a variação da temperatura.

Um problema que ainda dificulta os projetos de encapsulamento é a sensibilidade cruzada, ou seja, o fato de a mesma rede sofrer tanto a ação da mudança de temperatura quanto de deformação longitudinal. Isso significa que para medir temperatura deve se garantir que a fibra não sofra nenhum tipo de tração e vice versa. Uma forma de contornar esse problema consiste em utilizar uma segunda fibra ótica com uma rede ou inscrever uma segunda rede muito próxima em distância, mas distantes em comprimentos de onda para que uma meça a influencia da variável que não é desejada para subtraí-la do sinal (MORREY *et al.*, 1989).

2.4 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO

Após o início dos trabalhos com redes de Bragg em 1978 com a gravação das redes de Hill, várias técnicas de gravação surgiram como, por exemplo, a técnica interferométrica desenvolvida por Meltz *et al.* (1989). A técnica utilizada por Hill *et al.* (1978) a tempos caiu em desuso pela falta de capacidade de sintonização das redes. Já a técnica interferométrica utilizando um interferômetro de divisão de amplitude ainda é utilizada até hoje, não em larga escala, mas ainda tem se demonstrado útil na gravação de redes de Bragg em pequena escala, pois a sintonização do equipamento é bastante complexa por conta dos alinhamentos dos instrumentos óticos necessários para gerar o padrão de interferência (KASHYAP, 1999).

A técnica de gravação mais utilizada atualmente, por sua grande versatilidade, reprodutibilidade, facilidade de alinhamento, é a técnica utilizando máscara de fase. A máscara de fase consiste em uma lâmina de sílica com um perfil de relevo quadrado, transparente a luz ultravioleta como indicado na Figura 3 (KASHYAP, 1999).

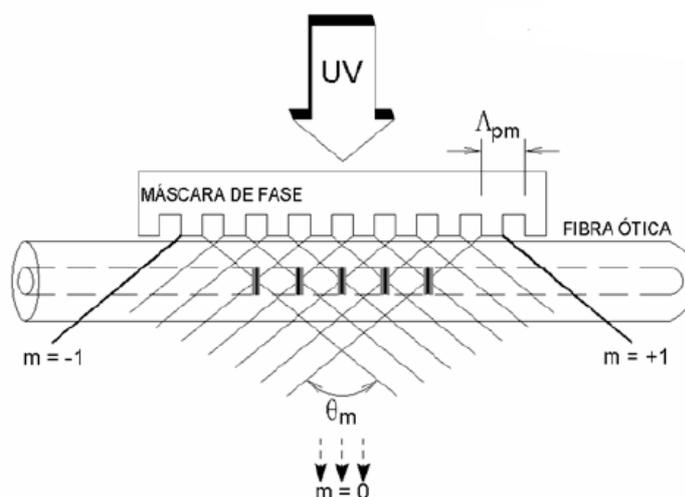


Figura 3 - Técnica de gravação de FBGs utilizando máscara de fase. A luz UV incide perpendicularmente com a face superior da máscara de fase a qual difrata os raios em duas ordens $m = +1$ e $m = -1$ que geram o padrão de interferência que cria as modulações de índice de refração no núcleo da fibra ótica (adaptado de KASHYAP, 1999).

A máscara de fase é projetada de tal forma para que a difração na ordem zero ($m = 0$) seja muito reduzida, e as ordens $m = -1$ e $m = 1$ que são responsáveis pela geração do padrão interferométrico que dá origem a FBG sejam maximizadas. A fibra ótica é colocada muito próxima à máscara de fase para que o padrão de

interferência se encontre no núcleo da fibra. O período da rede gravada é igual a metade do período da máscara de fase (HILL e MELTZ, 1997).

Outra técnica de gravação com máscara de fase consiste em fazer a varredura do feixe de laser sobre a máscara de fase conseguindo redes muito mais longas, como consequência tendo um aumento na intensidade do sinal refletido (KASHYAP, 1999).

Existem ainda outras técnicas de gravação utilizando máscaras de fase e interferômetros como, por exemplo, o método utilizando o Interferômetro de Tabolt modificado entre outros os quais não serão abordados.

2.5 TIPOS DE PERFIL DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO

Este tópico tem como objetivo demonstrar os principais perfis de espectro encontrados para FBGs não tendo como objetivo principal descrever as técnicas de gravação de cada perfil.

2.5.1 Redes Apodizadas

O espectro de uma rede uniforme apresenta além do pico de reflexão principal, outros picos menores denominados lóbulos laterais. Os lóbulos laterais aparecem por conta das múltiplas reflexões que acontecem com a luz dentro da rede de Bragg (OTHONOS e KALLI, 1999). A presença de lóbulos laterais é indesejada em redes que são utilizadas como filtros e dificulta a detecção dos picos para as redes que serão utilizadas como sensores, pois pode ocorrer a sobreposição dos lóbulos laterais com o espectro de outras redes de Bragg em fibra ótica que estejam multiplexadas. A Figura 4 apresenta o espectro de uma rede de Bragg uniforme.

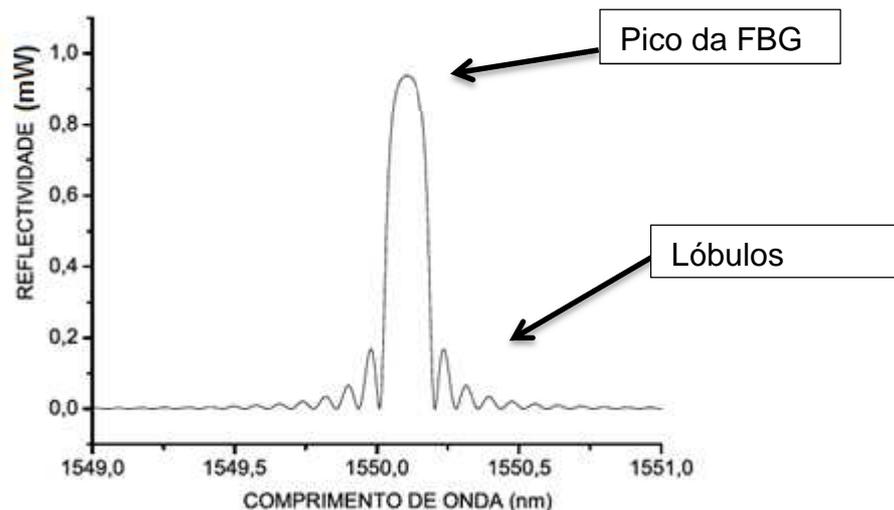


Figura 4 - FBG Uniforme Gerada com Software (adaptado de PATERNO, 2006).

A apodização é uma técnica empregada durante a gravação da rede de Bragg em fibra ótica para eliminar ou reduzir os lóbulos laterais, onde a modulação do índice de refração é controlada de tal forma que o envelope do padrão do índice se pareça como uma função gaussiana (Figura 5). O resultado da apodização pode ser visto no espectro da Figura 6.

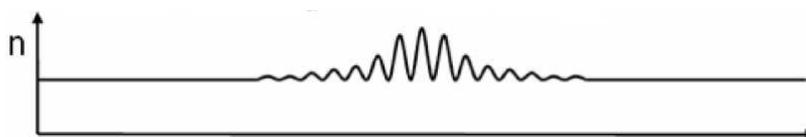


Figura 5 - Perfil do índice de refração para uma apodização gaussiana (OTHONOS e KALLI, 1999).

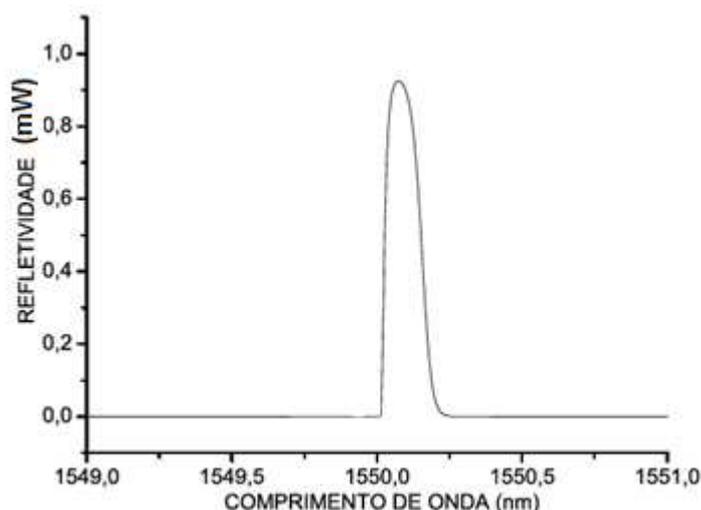


Figura 6 - Espectro de uma FBG após passar por uma Apodização Gaussiana.

As duas formas mais comuns de se fazer uma apodização consistem em utilizar uma máscara de fase com padrão apodizado, o que aumenta a reprodutibilidade das redes, mas encarece o processo, ou controlar a velocidade de

varredura do feixe de laser, ou seja, nas extremidades da rede a velocidade de varredura deve ser mais alta do que no centro. Nesse caso a reprodutibilidade se torna mais complicada, pois tal controle se demonstra extremamente complexo (KASHYAP, 1999).

2.5.2 Redes com *Chirp*

As redes com *Chirp* são caracterizadas por ter uma modulação de índice de refração com período crescente como indicado na Figura 7. Essa variação na modulação faz com que a largura da rede, ou seja, a banda refletida aumente.

A principal utilização de redes com *chirp* é para a indústria das telecomunicações funcionando como um filtro de compensação de dispersão em redes de comunicação.



Figura 7 - Desenho esquemático do perfil de variação do índice de refração crescente no núcleo de uma fibra óptica caracterizando uma rede de Bragg com *chirp* (KASHYAP, 1999).

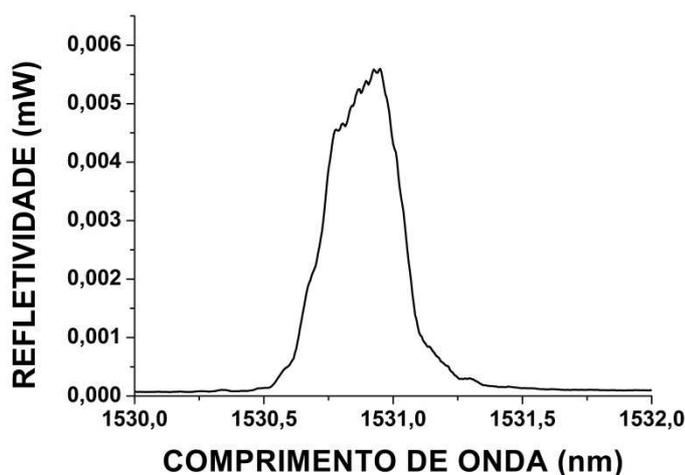


Figura 8 - Espectro de reflexão de uma rede de Bragg com *Chirp*.

3 TÉCNICAS DE DEMODULAÇÃO

Este capítulo tem por objetivo apresentar uma visão geral sobre algumas das principais técnicas de interrogação de redes de Bragg em fibra ótica, e explicar mais profundamente as duas técnicas utilizadas pelos equipamentos que foram usados no desenvolvimento deste trabalho, além de apresentar os principais métodos para detecção dos picos das FBGs nos espectros lidos por esses equipamentos.

3.1 SISTEMAS DE INTERROGAÇÃO ÓTICOS

3.1.1 Visão Geral

Como o próprio nome já sugere os sistemas de interrogação óticos têm por função interrogar os sensores, ou seja, as FBGs. Em outras palavras um sistema de interrogação deve ser capaz de retirar informações da FBG, como por exemplo, o comprimento de onda de Bragg, refletividade e o deslocamento do pico refletido pela FBG (HARAMONI, 2007).

Basicamente pode-se afirmar que um sistema de interrogação pode ser dividido em três subsistemas: Sistema ótico, sistema de transdução ótico - elétrico e sistema de processamento. O sistema ótico tem por finalidade interagir com as estruturas da FBG, ou seja, um sinal ótico é acoplado à fibra contendo a ou as FBGs, a luz interage com as estruturas da FBG e parte do espectro é refletido. O sistema de transdução ótico – elétrico tem a função de receber e converter o sinal ótico refletido pela rede para um sinal elétrico, isso é necessário, pois os sistemas de processamento atuais são todos baseados em circuitos eletrônicos. Por fim, o sistema de processamento tem a finalidade de retirar as informações necessárias do sinal recebido. A Figura 9 apresenta um espectro de três sensores multiplexados adquiridos por um sistema de interrogação.

O sinal recebido pelo sistema de processamento é codificado em intensidade por comprimento de onda como mostrado na Figura 9. Apesar desse tipo de codificação ser complexo ele tem grandes vantagens sobre sistemas codificados em variação de intensidade como, por exemplo, imunidade a ruídos ou distúrbios

no sinal da fonte ótica (HARAMONI, 2007). A complexidade deste tipo de codificação está na resolução do sistema ótico. Estudos mostram que para medir a variação de 1 *microstrain*, ou 0.1°C, que são resoluções consideradas básicas para os sensores elétricos atuais, é necessário que a resolução da medição da variação do comprimento de onda de pico numa FBG seja de pelo menos 1pm. Em outras palavras, para uma resolução razoável da FBG a temperatura que está na casa de 10^{-1} , o sistema de interrogação necessita de uma resolução de 10^{-12} (OTHONOS e KALLI, 1999).

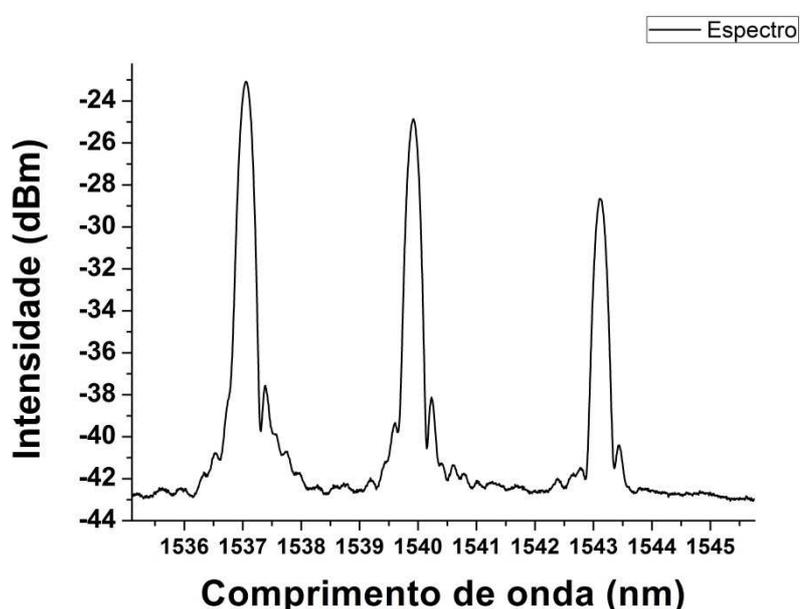


Figura 9 - Espectro de reflexão de uma fibra ótica contendo três FBGs, adquirido com um sistema de interrogação com resolução de 5 pm.

Existem quatro técnicas básicas de interrogação de FBGs sendo essas, a técnica dispersiva, a técnica utilizando fontes sintonizáveis com filtros fixos, outra técnica utilizando filtros sintonizáveis e uma fonte fixa e as técnicas interferométricas. Inúmeras técnicas têm sido demonstradas ao longo dos últimos vinte anos, mas sendo essas apenas variações das quatro citadas neste parágrafo (OTHONOS e KALLI, 1999).

O método utilizando filtros sintonizáveis, como por exemplo, um filtro do tipo Fabry-Perot, ou uma FBG sintonizável, consiste em uma varredura do espectro refletido pela FBG dentro da faixa de variação de comprimento de onda que a mesma atua. Kersey e colaboradores (1993), demonstraram um método de interrogação utilizando um filtro Fabry Perot sintonizável, do qual foram criadas

duas versões, uma para interrogar apenas um sensor FBG e outra para sensores multiplexados, sendo que nessa o número de sensores interrogados depende diretamente da faixa de sintonização do filtro, da largura da banda da fonte e das distâncias entre os sensores. A distância espectral entre dois sensores multiplexados é uma variável que deve ser levada em consideração durante a montagem dos sensores para que não haja sobreposição dos picos de reflexão dos sensores. Para sensores de deformação o aconselhável é utilizar uma distância de pelo menos 3nm entre cada sensor que garante uma medida de 2500 μ strain sem sobreposição de picos.

Outro método utilizando filtros sintonizáveis é o método descrito por Melle *et al.* (1993), onde o filtro sintonizável é uma FBG ou TFBG (*Tunable Fiber Bragg Grating*) cuja sintonia é feita através do controle da deformação aplicada a mesma. Para controlar a deformação sobre a TFBG foi utilizado um atuador PZT (Piezoelétrico) o qual era excitado por um sinal elétrico do tipo dente de serra de 1Hz.

Num sistema de interrogação utilizando a técnica de fonte sintonizável, a interrogação é feita fazendo-se a varredura do espectro através da sintonização da fonte de luz, na maioria das aplicações é constituído de um laser sintonizável.

Em seu trabalho Melle e colaboradores (1993) descrevem um sistema de interrogação baseado numa fonte sintonizável, a qual consistia em um laser de fibra dopada com Érbio. A saída do laser em 1550nm era usada para iluminar o sensor FBG e a variação do sinal de saída da FBG, a qual estava sujeita a vibrações, era adquirida através de fotodetectores. Essa técnica permite interrogar apenas uma FBG, pois a mesma faz parte da cavidade do laser como pode ser visto na Figura 10.

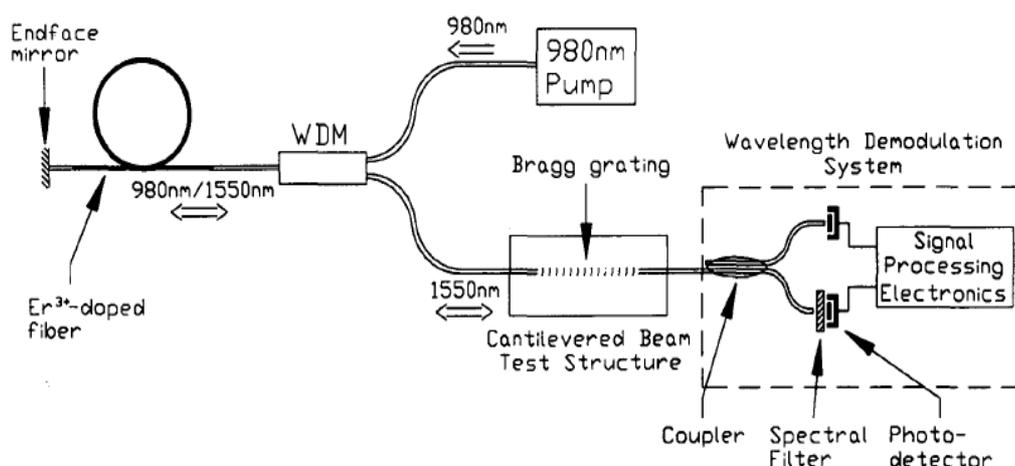


Figura 10 - Sistema de Interrogação de *strain* em sensores de FBG proposto por MELLE et al, (1993).

Uma variação do sistema proposto por Melle *et al*, (1993) foi desenvolvida por Ball e colaboradores (1994) onde utilizaram um laser sintonizável que consistia numa montagem semelhante com o sistema proposto por Melle *et al*, (1993), diferenciado pelo fato de que a FBG que tinha o papel de refletor da cavidade do laser não era utilizada como sensor e sim como sintonizador do comprimento de onda de saída do laser, a qual era sintonizada através de um atuador PZT.

A vantagem da interrogação, utilizando um laser sintonizável, é a melhora na relação sinal ruído, pelo fato de a densidade espectral de potência ser muito mais alta em comparação com fontes de banda larga, e uma considerável melhora na precisão da detecção de pico por conta da banda do laser ser muito estreita (HARAMONI, 2007).

Outro método bastante utilizado é a técnica dispersiva também conhecida como técnica espectroscópica. Essa técnica utiliza-se de grades de difração e de um CCD (Charge-Coupled Device), para fazer a análise do espectro das redes de Bragg (OTHONOS e KALLI, 1999). Nessa técnica, o sinal refletido pelas redes de Bragg passa através de uma ou mais grades de dispersão, as quais separam os comprimentos de onda espacialmente. Cada comprimento de onda atinge um respectivo pixel no CCD, e a intensidade de luz em cada pixel é convertida em sinal elétrico o qual é processado, podendo se reconstruir o espectro de reflexão da rede (OTHONOS e KALLI, 1999). Essa técnica é explicada mais detalhadamente na sessão 3.1.

Por fim, a técnica interferométrica consiste na aquisição do desvio do comprimento de onda do sensor através da demodulação de fase. Isso pode ser conseguido através de um interferômetro do tipo Mach-Zehnder desbalanceado como foi proposto no trabalho desenvolvido por Kersey e colaboradores (1992).

3.1.2 Técnica de interrogação utilizando fonte sintonizável

O interrogador estático (baixa frequência de interrogação) Sm_125 da Micron Optics utilizado neste trabalho tem seu princípio de funcionamento baseado na técnica de fonte sintonizável. A Figura 11 demonstra um esquemático desse equipamento.

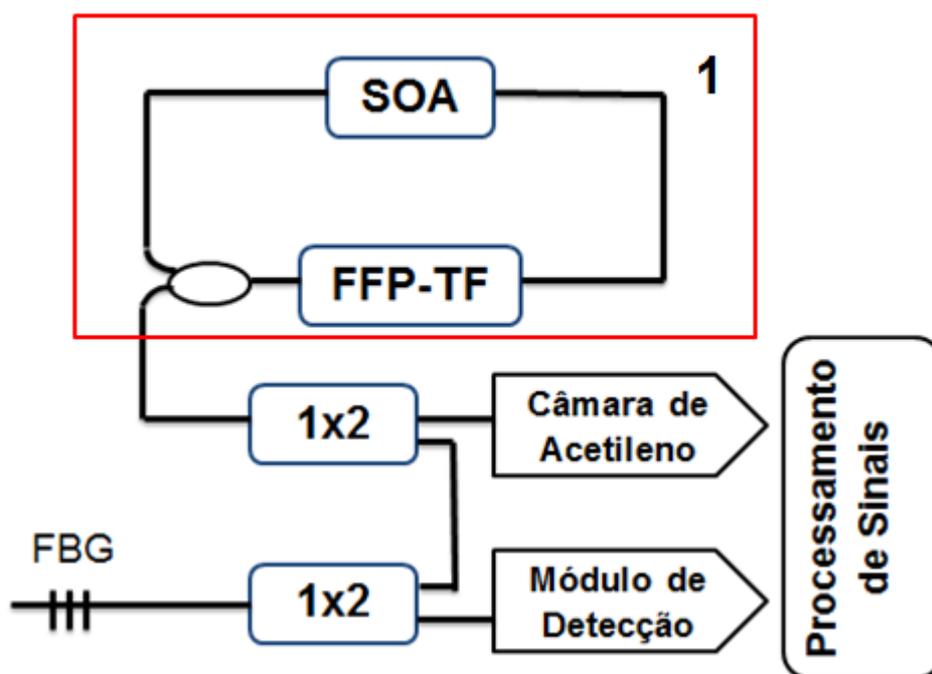


Figura 11 - Desenho esquemático do funcionamento do interrogador sm_125 da Micron Optics utilizado neste trabalho.

O sistema é dividido em duas partes, uma é a fonte sintonizável (área 1 na Figura 11), que consiste em um laser em anel, sintonizado através de um filtro do tipo Fabry-Perot em fibra ótica (FFP-TF). O meio ativo do laser consiste em um SOA (Semiconductor Optical Amplifier) que é um amplificador ótico baseado em um meio semiconductor operando na sessão de $1,5 \mu\text{m}$. O sinal do SOA passa então pelo FFP-TF onde o comprimento de onda de saída é sintonizado. O sinal sintonizado passa através de um acoplador ótico que divide o sinal em duas partes.

A primeira fração é direcionada para uma câmara de acetileno que serve como referência de comprimento de onda e depois para um fotodetector. A outra fração é direcionada para um segundo acoplador ótico ao qual a ou as FBGs estão conectadas. O sinal refletido pelas FBGs passa novamente por este acoplador e é direcionada para um segundo fotodetector. Após isso o sinal é processado para que os picos sejam encontrados e conseqüentemente seu deslocamento monitorado.

A resolução desse equipamento é dada pela resolução do FFP-TF, que segundo o fabricante atinge resoluções abaixo de 1pm, além de ter uma alta repetitividade nas medições.

O FFP-TF desse interrogador tem um range de trabalho de 50nm fazendo com que o sinal do laser seja limitado entre 1520nm a 1570nm (MICRON OPTICS, 2004).

3.1.3 Técnica espectroscópica

A técnica utilizada pelo interrogador dinâmico I-MOM fabricado pela Ibsen Photonics utilizado neste projeto é a técnica dispersiva ou espectroscópica. Nesse equipamento o sinal refletido pelas FBGs é focado sobre uma grade de dispersão. A grade de dispersão espalha o sinal separando os comprimentos de onda espacialmente, os quais atingem uma segunda grade de dispersão que separa ainda mais os comprimentos de onda. Após serem separados espacialmente os mesmos são lançados sobre um espelho côncavo, cuja concavidade é calculada para manter o caminho ótico de todos os comprimentos de onda iguais, e por fim o sinal é focado sobre um CCD com 512 pixels. Esse tipo de montagem faz com que a luz percorra um caminho de 360° (Figura 12), o que faz com que o equipamento se torne mais fisicamente compacto.

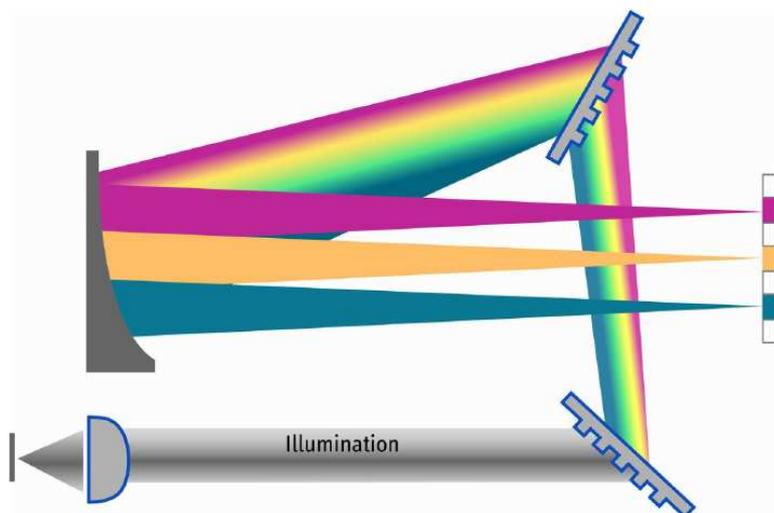


Figura 12 - Desenho esquemático do alinhamento em 360° do sistema óptico do I_mom (IBSEN PHOTONICS A/S, 2009).

O CCD utilizado pelo I-mom é um sensor de imagem linear de InGaAs (Índio, Gálio e Arsênico). CCD's de InGaAs são comumente utilizados em sistemas de comunicação ótica pelo fato de serem fotossensíveis na região do infravermelho próximo, que é justamente a região de menor absorção das fibras óticas. A Figura 13 apresenta um gráfico de sensibilidade por comprimento de onda para um CCD InGaAs comum.

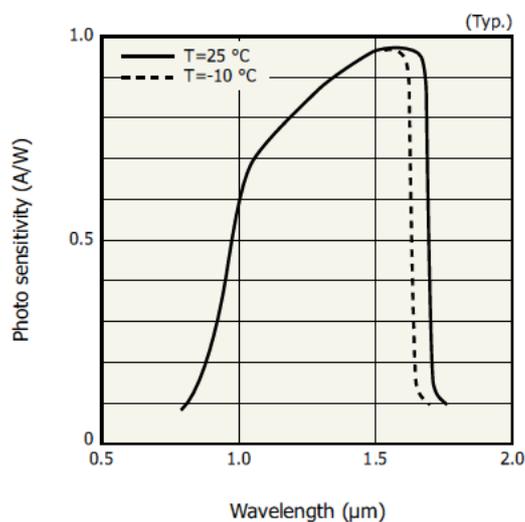


Figura 13 - Gráfico da fotosensibilidade por comprimento de onda de um CCD InGaAs (HAMAMATSU, 2009)

A faixa de leitura do I_mom é de 1510nm até 1595nm que como pode ser visualizado no gráfico da figura 13 é a região do espectro mais sensível do CCD. A resolução do equipamento é considerada pelo fabricante como sendo menor do

que 0,5pm o que permite, segundo Kersy *et al.* (1993), que uma resolução de 1 $\mu strain$ ou 0,1°C seja possível.

A frequência de aquisição desse sistema é dada pela soma dos tempos de *reset* e de exposição do CCD. O tempo de *reset*, é o tempo que o CCD demora a ser descarregado e o tempo de exposição é o tempo que o CCD fica exposto ao sinal da FBG. Os tempos mínimos especificados pelo fabricante são de 1,024ms e 6 μs respectivamente o que limita a frequência de aquisição em 970 Hz.

A desvantagem desse tipo de sistema é a susceptibilidade à variações de temperatura por conta do desalinhamento dos componentes óticos com a dilatação térmica dos materiais. Por consequência, para que o sistema seja preciso, a temperatura interna necessita ser controlada.

3.2 TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE PICO

Como já foi mencionado anteriormente no capítulo 3, sensores baseados em redes de Bragg são muito vantajosos, e a variável medida é codificada com deslocamento do comprimento de onda de pico de cada rede de Bragg. A maioria dos sistemas de interrogação após adquirir o espectro, necessita de processamento do mesmo, para que os picos possam ser encontrados (BODENDORFER *et al*, 2009).

Vários algoritmos para detecção dos picos em redes de sensores a rede de Bragg em fibra ótica foram e continuam sendo desenvolvidos, principalmente, pelo fato de que os sistemas de interrogação estão se tornando cada vez mais rápidos e precisos. Isso faz com que os algoritmos de detecção tenham que ser cada vez mais eficientes, rápidos e precisos também (JIANG *et al*, 2012).

A forma mais simples de detectar um pico é a procura da amplitude máxima do sinal, esse algoritmo é conhecido como *maximum search* (PATERNO, 2006). Outros algoritmos têm sido muito aplicados e estudados como, por exemplo, o *Gaussian fitting*, *Polynomial fitting*, o algoritmo Centróide, técnicas utilizando transformada *Wavelet* (ZHAOXIA e HAILI, 2011) e algoritmos mais complexos com redes neurais (PATERNO *et al*, 2006). É necessário levar em conta que os algoritmos afetam diretamente a posição do pico nos dados processados, ou seja,

nem sempre o pico encontrado estará na posição de máximo quando se sobrepõe os pontos dos picos encontrados pelos algoritmos aos dados recebidos do sistema de interrogação. O algoritmo de máximo valor não apresenta esse problema, mas tem a desvantagem de depender da acurácia do sistema de interrogação, ou seja, sua precisão está diretamente ligada à resolução do equipamento de interrogação (BODENDORFER *et al*, 2009).

Dois fatores que dificultam o trabalho de determinação dos picos em um espectro que contenha redes de Bragg em fibra ótica multiplexadas, são a presença de ruídos e distorções causadas por distúrbios não uniformes no sensor, e a presença de lóbulos laterais (PATERNO *et al*, 2011). Esses fatores implicam em uma decisão do que é ou não é uma rede de Bragg em fibra ótica. Nos casos onde haja sensores multiplexados cujas intensidades são muito diferentes, a maioria dos algoritmos falha. Isso ocorre devido à possibilidade de existir lóbulos laterais com amplitude maior do que os picos das outras redes podendo ser detectados como sendo picos.

O algoritmo conhecido como centroide, descrito em Cooper e Smith (COOPER e SMITH, 2004), atua como uma média móvel sobre uma janela do espectro tendo como resultado o comprimento de onda correspondente a máxima amplitude da rede de Bragg:

$$\lambda_B = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j I_j}{\sum_{j=1}^N I_j} \quad (13)$$

onde λ_B corresponde ao comprimento de onda de Bragg, I_j e λ_j representam a intensidade do sinal no comprimento de onda do j -ésimo ponto, e N o número de pontos da janela do espectro utilizada no cálculo.

Um algoritmo de ajuste bastante utilizado nos softwares que processam sinais vindos de redes de Bragg é a aproximação Gaussiana, ou *Gaussian Fitting*. Esse algoritmo assume que o perfil do pico de uma rede de Bragg em fibra ótica se assemelha ao perfil de uma função Gaussiana. Esse algoritmo ajusta os dados do espectro com a equação 14 para aproximá-lo de uma curva gaussiana e depois encontra os picos utilizando a equação 15 (BODENDORFER *et al*, 2009):

$$f_j = A \exp\left(\frac{(\lambda_c - \lambda_j)^2}{2V^2}\right) \quad (14)$$

$$\text{Pico} = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} w_j (f_j - y_j)^2 \quad (15)$$

onde f_j é a amplitude calculada, A é a amplitude do ajuste, λ_c é o comprimento de onda do centro da curva, V é o desvio padrão, y_j é o j -ésimo ponto de amplitude, w_j é o coeficiente de ajuste e N é o número de pontos do espectro. A Figura 14 representa esse algoritmo aplicado ao espectro de uma rede de Bragg em fibra ótica com baixa resolução.

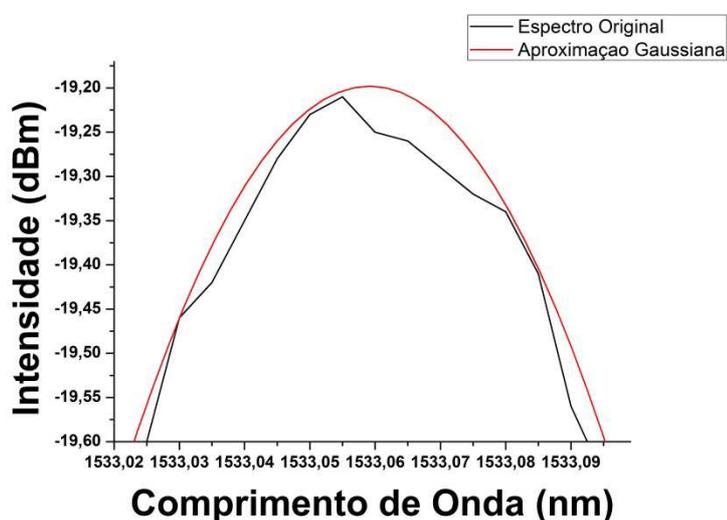


Figura 14 - Aproximação Gaussiana aplicada sobre um pico irregular de uma FBG. A linha vermelha apresenta a aproximação Gaussiana sendo essa muito mais estável que o pico original.

Outra técnica de aproximação bastante utilizada é o ajuste quadrático, esse utiliza uma equação polinomial de 2ª ou 3ª ordem dada por Bodendorfer e colaboradores (BODENDORFER *et al*, 2009) onde:

$$y_i = \sum_{j=0}^N c_j \lambda_i^j \quad (15)$$

onde y_i é a amplitude calculada, N é o grau do polinômio e c_j são os coeficientes do polinômio. Na Figura 15 é apresentada uma aproximação polinomial aplicada ao mesmo espectro de uma rede de Bragg em fibra ótica apresentado na Figura 14.

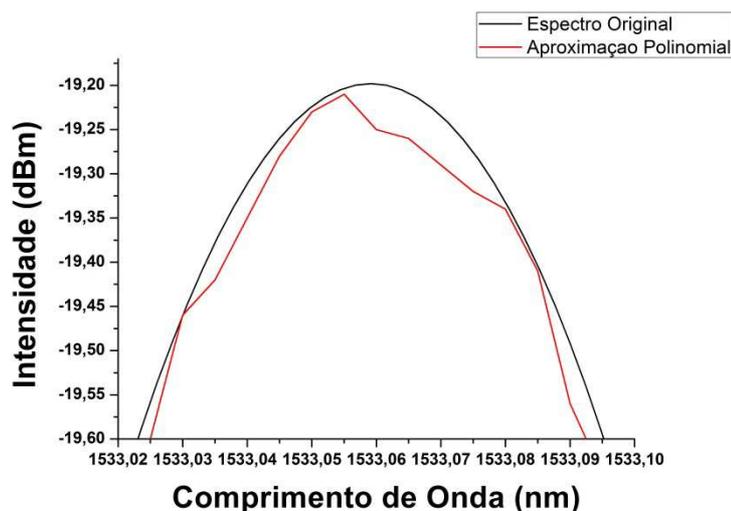


Figura 15 - Aproximação Polinomial aplicada sobre um pico irregular de uma FBG. A linha vermelha apresenta a aproximação Polinomial sendo essa muito mais estável que o pico original.

Dos três algoritmos apresentados, o algoritmo centroide é o que tem pior desempenho, sendo que os outros tem uma resposta muito próxima, como pode ser visto nas Figuras 14 e 15. Cada um dos algoritmos se comporta de forma diferente para cada tipo de rede, ou, para amplitudes de ruído diferentes. Assim sendo, não é possível considerar que exista um algoritmo ótimo para toda FBG. Porém, existe um algoritmo que melhor responde a cada situação. Portanto, para que o erro nas medições seja minimizado, é necessário conhecer os vários tipos de algoritmo aplicáveis e qual tem a melhor resposta para as condições em que será utilizado.

4 DESCRIÇÃO DO PROGRAMA

Os sensores com tecnologia FBG apresentam inúmeras vantagens sobre os sistemas sensores atuais, mas para que sejam interessantes para a indústria eles devem poder interagir com os sistemas já utilizados por ela. Um exemplo disso é a comunicação com os sistemas de supervisão atualmente disponíveis no mercado. O *software* desenvolvido neste projeto tem como finalidade ler os dados gerados tanto pelo Sm_125 quanto pelo I_MOM, detectar os picos das redes de Bragg e por fim disponibilizar esses valores de pico de forma que eles possam ser acessados por outros *softwares* em tempo real, sejam eles *softwares* comerciais como, por exemplo, softwares supervisórios, MatLab, Excel, ou *softwares* desenvolvidos pelos alunos do programa de pós-graduação que utilizam esses equipamentos em seus experimentos.

4.1 COMUNICAÇÃO COM O SM_125

O sistema de interrogação estático utilizado no projeto, o Sm_125 da Micron Optics, possui um sistema de processamento integrado. O equipamento fornece dois tipos de informação, o espectro de reflexão e os picos detectados por um algoritmo interno.

A detecção interna dos picos pelo sistema se torna bastante interessante em sistemas embarcados nos quais já se tem as redes calibradas, bastando inserir os parâmetros para a detecção de pico como o *threshold* e largura de banda previamente adquiridos. Para sistemas que irão trabalhar com a calibração ou com o desenvolvimento de sensores, a existência de uma imagem do espectro se torna imprescindível, pois uma visualização do espectro garante a qualidade na seleção das FBGs. Além disso, a imagem do espectro permite visualizar qualquer atenuação ou ruído gerado por algum problema ocorrido durante a montagem do sensor, e ainda garante que, durante a calibração dos parâmetros para detecção de pico, os picos desejados, sejam encontrados.

Esse sistema de interrogação contém uma unidade de processamento, que consiste de um computador industrial. Esse computador tem por finalidade fazer todo o processamento e controle dos sinais óticos do sistema além de computar os

sinais elétricos enviados do fotodetector e amplificadores e convertê-los em informação de intensidade em função do comprimento de onda. Como o sistema é fechado, apenas o fabricante tem acesso ao sistema operacional desse equipamento, inviabilizando, por consequência, a instalação de qualquer *software* customizado de tratamento de dados dos sensores.

Para acessar os dados que o equipamento processa, o fabricante disponibiliza uma interface de comunicação Ethernet. Por essa, é possível configurar o equipamento e adquirir os picos ou o espectro das FBGs. Para facilitar a criação de softwares para o tratamento dos dados adquiridos pelo seu sistema, o fabricante disponibiliza uma biblioteca dinâmica (*dll*) que possui os comandos necessários para a comunicação com o equipamento, além de um algoritmo de decodificação dos dados enviados. Essa *dll* é desenvolvida em linguagem C, e exemplos de utilização da mesma em Visual Basic são fornecidos junto com o manual do equipamento, sendo que para configurar o equipamento ou adquirir os dados basta fazer a chamada das funções da *dll* no software.

Além da comunicação através da *dll* é possível fazer a comunicação através da abertura de um canal TCP/IP. Isso se torna muito útil em alguns casos como para a comunicação do equipamento com um *software* escrito em Java, por exemplo, pois a *dll* demonstrou-se incompatível com tal linguagem de programação. A comunicação do equipamento com um *software* escrito com a linguagem de programação Java é interessante pelo fato de permitir a criação de *softwares* multiplataforma, o que possibilita a utilização do mesmo em vários sistemas operacionais e sistemas para tecnologia móvel.

Para abrir a possibilidade de criação de *softwares* de comunicação com esse equipamento em qualquer linguagem de programação foi necessário criar um algoritmo para abrir um canal de comunicação com o mesmo e para decodificar os dados recebidos do equipamento, pois os mesmos são codificados pelo interrogador.

4.1.1 Abertura do canal de comunicação

A comunicação entre o equipamento e o software acontece sobre o protocolo TCP/IP. A configuração da comunicação é baseada em uma arquitetura cliente – servidor. O servidor é o computador do sistema de interrogação e o cliente é o

computador que faz o processamento dos dados. A versão do interrogador utilizado permite até cinco clientes conectados ao mesmo tempo, ou seja, é possível que cinco softwares se comuniquem com o interrogador simultaneamente. Isso possibilita criar um sistema multiusuário no caso do interrogador ter mais de um canal, ou seja, mais de uma pessoa pode trabalhar com o mesmo interrogador simultaneamente, mas em canais diferentes.

Para a abertura do canal de comunicação com o interrogador é necessário informar o endereço desse na rede. Isso é feito através do IP (*Internet Protocol*) e da porta de acesso. O IP do interrogador está configurado de forma estática, ou seja, ele não se altera a menos que seja reconfigurado.

Existem duas portas de acesso ao interrogador, as duas com funções diferentes. A porta 50000 é utilizada para a transmissão de dados de espectro, enquanto a porta 55000 é utilizada para configuração do equipamento e transmissão dos picos caso seja optado pela detecção interna.

Para que o software inicie a comunicação com o interrogador basta então abrir um *socket* de comunicação na linguagem em que se está trabalhando (praticamente todas as linguagens de programação oferecem bibliotecas de suporte a comunicação TCP/IP) endereçando o mesmo ao IP do interrogador e a porta que se deseja trabalhar, não se esquecendo de fechar o *socket* de comunicação após o término da operação.

4.1.2 Recepção e decodificação dos dados

A comunicação entre o interrogador e *software* cliente acontece através dos comandos, listados na Tabela 1. O principal comando utilizado é o comando #GET_DATA, que faz o pedido dos dados do espectro para o interrogador. A resposta desse comando, assim como dos outros, é uma *String* codificada em ASCII. Os primeiros 10 *bytes* da resposta representam o número de bytes que deverão ser lidos. Dessa quantidade de bytes que deve ser lida, os 40 primeiros *bytes* são um cabeçalho que indica qual instrumento está sendo lidos, a quantidade de canais óticos do instrumento e o incremento de comprimento de onda, ou seja, a resolução do mesmo e o comprimento de onda inicial como indica a Tabela 2. Os *bytes* seguintes são as intensidades do sinal. O comprimento de onda é gerado

pele software cliente através das informações de resolução, comprimento de onda inicial, e quantidade de *bytes* recebidos.

Tabela 1: Comandos de comunicação para o Sm_125. (Micron Óptics, 2004)

Comando (Porta 50000)	Função
#IDN?	Retorna o nome e a versão do instrumento
#GET_SYSTEM_IMAGE_ID	Retorna a versão do software instalado no interrogador
#SET_IP_ADDRESS	Muda o endereço de <i>IP</i> do instrumento
#SET_IP_NETMASK	Muda a máscara de sub rede do instrumento
#GET_IP_ADDRESS	Retorna o endereço de <i>IP</i> do instrumento
#GET_IP_NETMASK	Retorna a máscara de sub rede do instrumento
#GET_DATA	Retorna o espectro do sinal.
Comando (Porta 55000)	Função
#SET_PEAK_THRESHOLD_CH1	Seta o threshold do canal 1 em dBm para o algoritmo de detecção de pico interno.
#GET_PEAK_THRESHOLD_CH1	Retorna o threshold do canal 1 em dBm para o algoritmo de detecção de pico interno.
#SET_PEAK_WIDTH_CH1	Seta a largura do pico a ser detectado pelo algoritmo de detecção de pico interno, no canal 1
#GET_PEAK_WIDTH_CH1	Retorna a largura do pico a ser detectado pelo algoritmo de detecção de pico interno, no canal 1
#GET_PEAKE_AND_LEVELS	Retorna o comprimento de onda e a amplitude de cada pico detectado pelo algoritmo.

Tabela 2: Estrutura do cabeçalho da resposta do Sm_125 ao comando #Get_Data. (Micron Óptics, 2004)

Mensagem	Tamanho em <i>bytes</i>	Descrição
Tamanho do cabeçalho	4	Representa o tamanho do cabeçalho em <i>bytes</i> .
Versão do Protocolo	4	Representa a versão do protocolo do equipamento.
Número de canais	4	Número de canais que a mensagem contém.
Reservado	4	Reservado para uso futuro.
Contador	4	Contador sequencial dos dados processados pelo instrumento.
Tamanho dos Sub - Cabeçalhos	4	Representa o tamanho dos Sub – cabeçalhos.
Comprimento de onda inicial	4	Representa o primeiro comprimento de onda adquirido.
Incremento de Comprimento de Onda	4	Representa a distância entre cada ponto em pm.
Numero de pontos (nPoints)	4	Representa o número de pontos aquisitados em uma varredura.
Número do canal	4	Representa o número do canal do qual os dados foram recebidos.
Dados	2*nPoints	Tamanho dos dados do espectro do canal aquisitado.

Os valores de intensidade estão codificados da seguinte forma: Cada *word* (conjunto de dois *bytes*) representa uma intensidade, mas a *word* está no sistema LSB (*Last-Significant-Byte*), ou seja, o segundo *byte* da *word* é o mais significativo, o que significa que é necessário inverter a posição de cada par de caracteres ASCII recebidos. Após invertidos a *word* pode ser convertida para um valor decimal.

Para linguagens como o Java, que não tem funções prontas de conversão de uma *word* para decimal, é necessário converter os caracteres invertidos para binário conectá-los e depois convertê-los para decimal.

A resposta dos comandos como #GET_IP_ADDRESS e outros, não necessitam do tratamento descrito anteriormente, pois a resposta já vem codificada de forma que possa ser entendida facilmente.

A Figura 16 apresenta um fluxograma da comunicação entre o software e o interrogador ótico Sm_125 da Micron Optics.

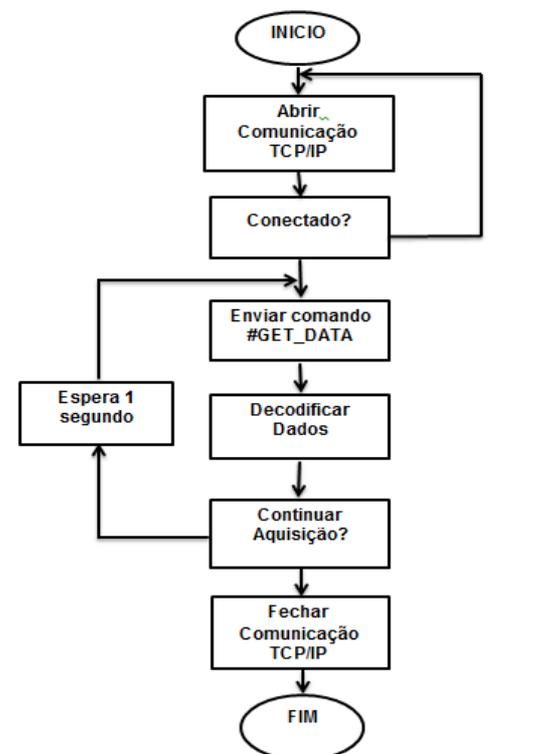


Figura 16: Fluxograma de comunicação do Interrogador Sm_125 da Micron Óptics com o software.

4.2 COMUNICAÇÃO COM I-MOM

O interrogador dinâmico utilizado neste projeto, o I_MOM possui uma matriz de CCD de 512 pixels e uma frequência de leitura máxima de 970 Hz. Esse sistema ao contrário do Sm_125 da Micron Optics não possui uma unidade de processamento, ou seja, todo o controle do interrogador é feito através de um computador externo.

A comunicação desse equipamento com o computador ocorre através do protocolo usb 2.0 (*Universal Serial Bus*). Pelo fato de sistemas operacionais como o Windows não fornecerem controle direto através da porta usb, o fabricante disponibiliza uma *dll* com as respectivas funções necessárias para controlar o equipamento, sendo que ela é fornecida justamente para que os usuários do equipamento possam montar suas próprias interfaces de aquisição de dados ou configuração do equipamento conforme a sua necessidade.

4.2.1 Estabelecer comunicação com I-MOM

Para iniciar a comunicação com o equipamento, primeiramente é necessário que a biblioteca seja iniciada dentro do software, para tal é necessário fazer a chamada da função *USB2_initialize*. Caso a inicialização seja bem sucedida, a função retorna ao valor 0. Após a biblioteca ter sido inicializada, é necessário que todos os interrogadores aceitos pela *dll* e conectados ao computador sejam identificados. Essa *dll* aceita até 8 interrogadores conectados simultaneamente. Para fazer a escolha do equipamento que será utilizado, é necessário chamar a função *USB2_getModuleConnectionList*. Essa função gera uma lista com todos os equipamentos conectados dando uma identificação numérica para cada um deles começando por 0. Após escolhido o equipamento que se deseja usar, a comunicação entre ele e o computador deve ser aberta, utilizando o comando *USB2_open*. Nesse ponto já é possível configurar o equipamento e iniciar a aquisição do espectro. A configuração e leitura do equipamento são descritas no tópico 4.2.2. Para desligar o equipamento o processo inverso é necessário, caso isso não seja executado possíveis danos ao sistema operacional podem acontecer. Primeiramente é necessário fechar o canal de comunicação aberto entre o equipamento e o computador. Para que isso seja feito é necessário informar a identificação do equipamento e executar a função *USB2_close*. Após o canal ter sido fechado a *dll* deve ser fechada, isso é feito executando a função *USB2_uninitialize*. Após isso o software pode ser fechado e o equipamento pode ser desconectado.

4.2.2 Funções para configuração da leitura de dados do I-MOM

As configurações necessárias para que o *I_mom* funcione corretamente são, os tempos de exposição do CCD, o tempo de cada ciclo de leitura, o ganho dado ao sinal, tamanho do buffer alocado para a transmissão dos dados e o modo de leitura.

Como já foi mencionado na sessão 3.1.3, a frequência de leitura do *I_mom* depende diretamente dos tempos de exposição e *reset* do CDD. Para poder variar

a frequência de trabalho do interrogador é necessário que essas duas variáveis sejam editáveis. A *dll* disponibiliza uma função para configurar o tempo de exposição e outra para o tempo de cada ciclo de leitura. Segundo o fabricante a frequência máxima de aquisição é de até 952 Hz, sendo que o tempo de exposição mínimo é de 6 μ s. A função responsável pela configuração do tempo de exposição é a *USB2_setExposure Time* a qual aceita valores de 6 μ s até 1000ms, sendo que o valor repassado a ela deve ser em μ s. O tempo de cada ciclo é configurado através da função *USB2_setCycleTime*, que aceita valores de 1,044ms até 1 hora, ou seja, a frequência de aquisição pode ser variada de 952Hz até aproximadamente 0,00027Hz.

O ganho que pode ser aplicado ao sinal, é configurado através da função *USB2_setGain*, o ganho dado ao sinal pode variar entre 1db e 10db sendo que a função aceita números inteiros, divididos em 10 níveis de ganho.

Para que não haja perda de dados durante a transmissão de dados principalmente quando se trabalha em frequências muito altas, o *I_mom* oferece um *buffer* de comunicação que armazena os dados lidos de cada ciclo até que eles sejam enviados. A *dll* oferece uma função para configuração do tamanho do *buffer*. Como essa é uma função que pode interferir na comunicação do sistema ela é configurada com o valor recomendado pelo fabricante de 100 *frames*, ou seja, o *I_mom* pode guardar até 100 leituras completas do CCD e enviá-las conforme a disponibilidade da comunicação. Outra função importante com relação ao *buffer* é a *USB2_releaseBuffer* que tem por função apagar os dados do *buffer*. Essa função é importante pois, quando a comunicação é encerrada, os últimos dados adquiridos ainda ficam armazenados no *buffer*, ou seja, quando a aquisição iniciar novamente, os dados que chegarão por primeiro ao software de leitura serão os dados da última aquisição podendo gerar problemas na interpretação dos dados.

O *I_MOM* oferece três modos de captura dos dados. O primeiro modo captura um número definido de aquisições, o segundo modo faz a aquisição contínua do espectro, e o terceiro modo é o modo *trigger*. Como esse projeto visa o desenvolvimento de uma plataforma de caracterização ou monitoramento de sensores, optou-se por utilizar o segundo modo de operação portanto, os outros modos não serão comentados. Para configurar o modo é necessário passar o valor inteiro 2 para a função *USB2_setCaptureMode*.

4.2.3 Funções para correção, aquisição e tratamento dos dados

Por se tratar de um equipamento onde a calibração está diretamente ligada ao alinhamento dos componentes óticos (a calibração do equipamento pelo fabricante é feita a 25°C), ou seja, variações na temperatura ambiente, ou até internas ao equipamento causadas pelo aquecimento dos componentes eletrônicos, causam variações nos dados adquiridos. O I_mom dispõe de um sensor de temperatura interno que informa a temperatura dos componentes óticos, e também dispõe de coeficientes de calibração armazenados dentro da memória EEPROM do equipamento, além de constarem no certificado de calibração de fornecimento.

Quando é feita a calibração do I_MOM, o fabricante além calibrar o alinhamento dos componentes óticos também calibra os comprimentos de onda lidos por cada pixel, ou seja, para converter cada pixel em comprimento de onda é necessária a utilização de uma equação polinomial de quinta ordem. Essa equação é descrita no tópico 4.4, assim como a equação de ajuste por variação de temperatura. Os coeficientes do polinômio de conversão de pixel para nanômetros estão disponíveis na EEPROM e no certificado de calibração.

Para ler os coeficientes de calibração gravados na EEPROM, utiliza-se a função *USB2_getCallibrationCoeficient*. Essa função retorna dois *arrays* contendo os coeficientes de calibração de comprimento de onda e temperatura. Uma função para alterar esses coeficientes também é disponibilizada pelo fabricante, mas por questões de segurança e por falta de equipamento para realizar uma calibração, essas funções não foram incorporadas ao software, portanto não serão descritas.

Para ler a temperatura medida pelo sensor intrínseco ao equipamento, a *dll* disponibiliza a função *USB2_getCurrentTemperature*. Após a configuração é possível iniciar a leitura dos dados utilizando a função *USB2_captureStart*, Essa função tem como retorno as intensidades adquiridas por cada pixel do CCD. A resposta chega no formato de um *array* numérico de 512 linhas. Após a utilização do equipamento terminar, é necessário parar a aquisição antes de fechar o canal de comunicação, para tanto a função *USB2_captureStop* deve ser chamada.

Todos os dados de calibração e configuração do I_MOM descritos no tópico 4.2.2 e 4.2.3 ficam armazenados na EEPROM do equipamento, portanto quando o

equipamento é ligado, os últimos parâmetros configurados antes do mesmo ser desligado são os parâmetros que serão utilizados.

4.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO

O algoritmo de detecção de pico foi desenvolvido baseado no trabalho de Blais e Rioux (1986), que utiliza uma derivada de primeira ordem para separar as regiões próximas aos picos. O algoritmo desenvolvido para a detecção de picos de redes de Bragg em fibra ótica pode ser dividido em duas etapas. A primeira, responsável por encontrar as redes de Bragg, é subdividida em três passos. A segunda, por aplicar aproximações para melhorar a acurácia do algoritmo como pode ser observado na Figura 17.

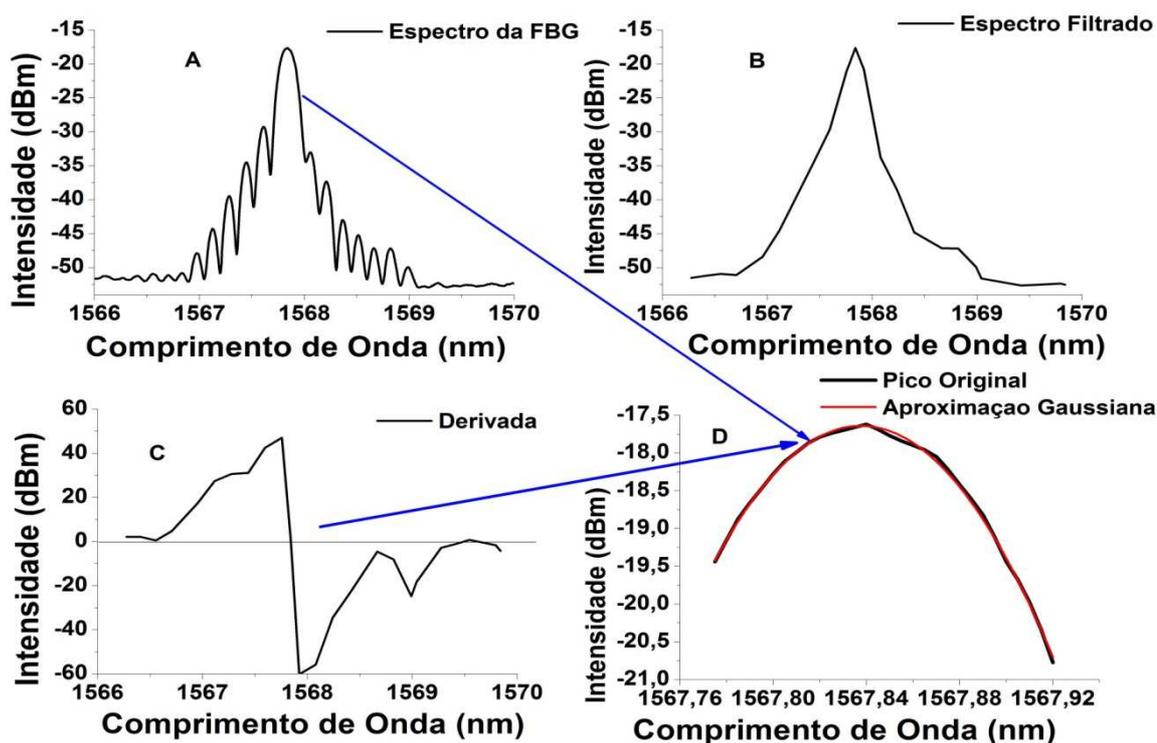


Figura 17 - Apresentação dos passos do algoritmo de detecção de pico desenvolvido. O Gráfico a apresenta o espectro original da FBG antes de ser processado, o Gráfico b mostra o contorno do espectro da FBG apresentada no Gráfico a após passar pelo primeiro passo do algoritmo. O Gráfico c apresenta o resultado da derivada 1ª do contorno da FBG, e o Gráfico d apresenta o processamento final do algoritmo onde a região próxima do pico do espectro original do Gráfico a é separado e uma aproximação gaussiana é aplicada para melhorar a acurácia da detecção do pico.

Passo 1: Tem como objetivo encontrar as regiões que contém uma rede de Bragg. Para tal, fez-se o uso de uma técnica de *Smoothing*, que tem como resultado um sinal que condiz com o contorno das redes. A técnica de *Smoothing* utilizada, foi uma janela móvel com detecção de máximo, ou seja, o espectro recebido do interrogador é percorrido por uma janela, cujo tamanho varia conforme a resolução do interrogador e com a largura das redes de Bragg. A saída da janela equivale ao máximo valor de amplitude dentro da mesma. Essa janela é ajustada conforme a resolução do interrogador, por exemplo, para o Sm_125 que tem uma resolução de 0,005 nm e adquire 10000 pontos, é utilizada uma janela de 30 pontos, já para o I_Mom que adquire apenas 512 pontos é utilizada uma janela de 3 pontos. Para encontrar o tamanho da janela leva-se em consideração que a mesma deve ser maior do que a largura dos lóbulos laterais das redes de Bragg das quais se deseja encontrar o pico, e menor do que a largura total da rede de Bragg, sendo que, são necessários pelos menos três pontos para formar o contorno da rede. Um exemplo desse processo pode ser visto na Figura 16b a qual apresenta o resultado do *Smoothing* do espectro da rede de Bragg apresentada na Figura 16a. Além de encontrar o contorno das redes, o *Smoothing* também tem a importante função de suavizar os lóbulos laterais das redes de Bragg tornando possível a detecção de redes de Bragg com amplitude menor do que os lóbulos laterais de outras redes de Bragg que estejam multiplexadas com a mesma. Neste passo também é aplicado um *threshold* que é configurado próximo à linha de base da reflexão de Fresnel que ocorre na extremidade da fibra ótica. O *threshold* foi inserido para evitar que algum ruído na linha base possa ser identificado como uma rede, além de melhorar o desempenho do algoritmo, pois esse elimina os pontos que não são interessantes para a detecção, acelerando o processamento. O *threshold* é aplicado diretamente à saída de cada janela, sendo que por ele passam apenas os valores acima do *threshold*, caso o valor esteja abaixo se utiliza no lugar desses, o valor do *threshold*.

Passo 2: Após o contorno das redes ter sido encontrado e os lóbulos laterais terem sido suavizados, uma derivada de primeira ordem é aplicada com a função de condicionar o sinal para que a região próxima ao pico possa ser encontrada. Levando-se em consideração que o ponto de inflexão da derivada de primeira ordem, é o pico da FBG, podemos utilizá-lo como referência para o passo 3.

Passo 3: O terceiro passo utiliza-se do ponto de inflexão da derivada para separar a região próxima ao pico (área envolvida pelo quadrado no Gráfico c da Figura 17). A partir do ponto de inflexão uma região equivalente a três pontos é separada, ou seja, o ponto de inflexão e um ponto acima e abaixo do mesmo. O resultado desse passo pode ser visto na Figura 17 (gráfico d), onde a linha preta apresenta a região separada pela janela, e aplicada ao espectro original (apresentado no Gráfico a). Levando-se em consideração que os picos se encontram na região onde o sinal da derivada decai de um valor positivo para um negativo apenas as regiões com essa característica são levadas em consideração para detecção da região do pico.

Passo 4: Os três primeiros passos têm a função de encontrar o espectro das redes de Bragg em Fibra ótica, e separa a região próxima ao pico (como pode ser visto no Gráfico d da Figura 17). O último passo tem por função aproximar o pico, ou seja, aplicar um algoritmo de aproximação na região separada nos três primeiros passos. A aproximação é feita para melhorar a acurácia do algoritmo como já foi mencionado na seção 3.2. O Gráfico d da Figura 17 apresenta a região separada pelos 3 primeiros passos comparada com a aproximação gaussiana da mesma região.

4.4 DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE INTEGRADO

Atualmente, os *softwares* que controlam e configuram o Sm_125 da Micron Optics e o I_MOM da Hamamatsu, têm grandes limitações no seu uso com relação ao processamento dos dados de deslocamento dos picos encontrados por eles, pois os mesmos não permitem comunicação com outros *softwares* ou equipamentos. Essa limitação tem sérias implicações, como, por exemplo, no tempo gasto para o tratamento dos dados, além de que, para um sensor ser comercialmente viável, ele precisa se adaptar aos sistemas já existentes.

O *software* desenvolvido foi intitulado *FBG Server* (pelo fato de se comportar como um servidor de dados). Baseia a comunicação com os outros *softwares* através do protocolo OPC (*OLE for Process Control*). Esse protocolo se fundamenta na comunicação entre um Cliente com o Servidor. O servidor tem por objetivo estabelecer a comunicação com os instrumentos que nesse caso são os interrogadores óticos e fazer com que os dados enviados possam ser interpretados

por programas de fabricantes distintos. O *software* cliente busca por todos os *OPC Servers* instalados no computador e abre a comunicação com o *server* escolhido. Os *OPC Client's* são parte integrante da maioria dos *softwares* atuais que trabalham com processamento de dados de sensores.

Além do protocolo *OPC* o *FBG Server* também disponibiliza os dados no formato de arquivo de texto (.txt), sendo esse atualizado em tempo real e contendo apenas o valor da última leitura, para que quem desejar desenvolver seu próprio *software* de processamento dos dados possa fazê-lo com facilidade, pois a maioria das linguagens de programação atualmente existentes fornecem acesso fácil e dinâmico a arquivos com esse formato.

4.4.1 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O *FBG Server* foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação LabView 8.5 da National Instruments. Essa linguagem foi escolhida, pois oferece inúmeras ferramentas de comunicação com *Hardware* e *Software*, além de ser uma plataforma muito estável.

O *software* foi dividido em três telas sequenciais, que são respectivamente da primeira para a última: escolha do interrogador, configuração do interrogador e configuração do algoritmo de detecção de pico.

A primeira tela do *FBG Server*, Figura 18, permite ao usuário escolher o interrogador que será utilizado, podendo-se escolher um dos dois ou os dois, ou seja, o programa possibilita que o I_MOM e o SM_125 sejam acessados simultaneamente.

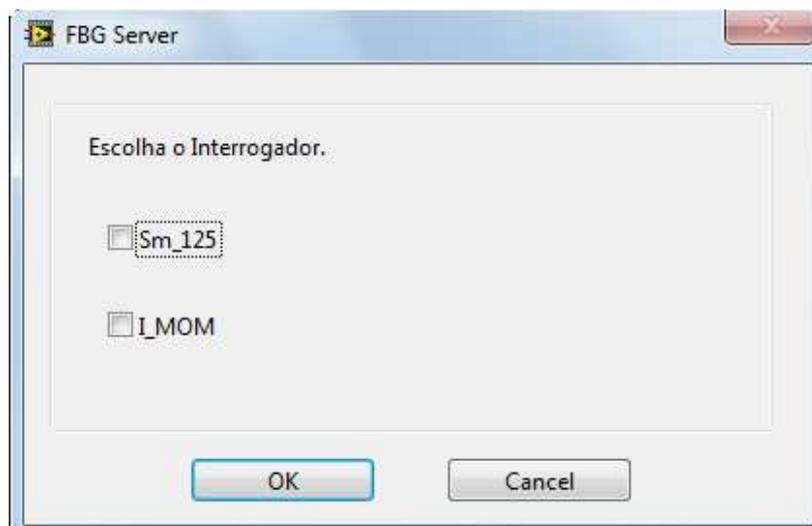


Figura 18 - Tela de seleção de interrogador do *FBG Server*.

A segunda tela desenvolvida destina-se a configuração do ou dos equipamentos selecionados. No caso do Sm_125 Figura 19, a única configuração necessária é o IP do equipamento, ou seja, o *software* necessita saber o endereço de IP (Internet Protocol) do interrogador ao qual ele deve se conectar. Já no caso do I_MOM, Figura 20, é necessário fornecer os parâmetros de tempo de ciclo de leitura, tempo de exposição do CCD ao sinal e ganho aplicado ao sinal. Isso se deve ao fato desses parâmetros ficarem gravados dentro da EEPROM do equipamento. Assim, para evitar que a leitura comece com a configuração errada, o *software* faz o *upload* dos valores configurados nessa tela antes da leitura começar. A tela de configuração do I_MOM também apresenta a descrição dos ranges de cada parâmetro, caso os valores sejam extrapolados, uma mensagem de erro aparece, e os dados somente são encaminhados ao equipamento se estiverem dentro do range estabelecido.

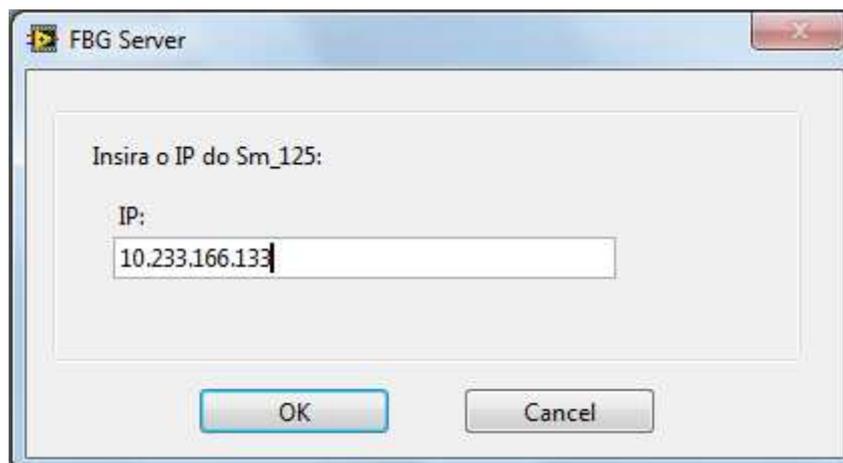


Figura 19 - Tela de configuração do IP para o *FBG Server* se conectar ao *Sm_125*.

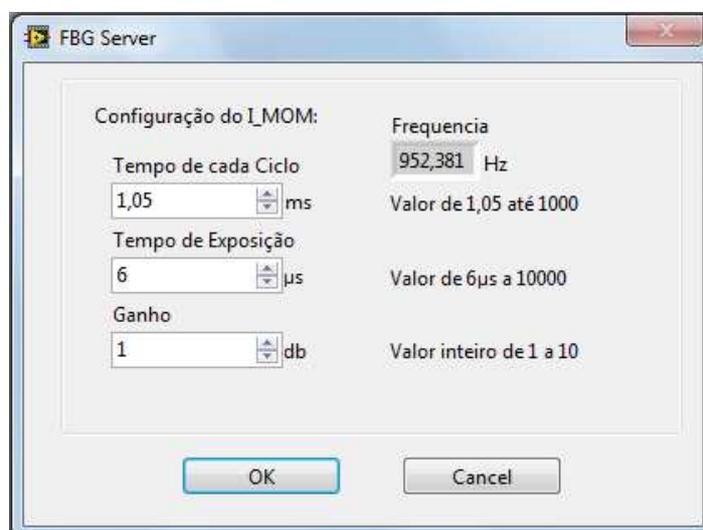


Figura 20 - Tela de configuração dos parâmetros de varredura para o *I_MOM*.

A terceira tela criada tem a função de configurar e apresentar os dados enviados pelo interrogador. Essa tela foi dividida em três abas: Configuração de Picos, Gráfico Pico x Tempo e Configuração dos Dados. A aba de Configuração de Picos, Figura 21, apresenta um gráfico com o espectro adquirido pelo interrogador. O gráfico tem a função de auxiliar na detecção dos picos, ou seja, ele fornece uma visão dos picos encontrados pelo algoritmo de detecção de pico, sobrepostos ao espectro. Essa aba também dispõe de um botão para seleção de qual interrogador se deseja configurar (apenas para casos onde os dois interrogadores sejam utilizados simultaneamente), além de uma lista de algoritmos de detecção de pico, controles para parametrização do algoritmo escolhido, um indicador que apresenta o comprimento de onda dos picos detectados e um botão de sair, que desconecta o interrogador seguindo as etapas descritas na seção 4.1 e 4.2, e fecha o programa.

A segunda aba apresenta um gráfico de comprimento de onda dos picos detectados por tempo, isso permite que a dinâmica dos processos monitorados pelas redes de Bragg em fibra ótica seja visualizada mais facilmente.

A terceira aba permite ao usuário selecionar os locais onde os dados serão salvos, para os casos onde a comunicação com outros *softwares* não seja utilizada.

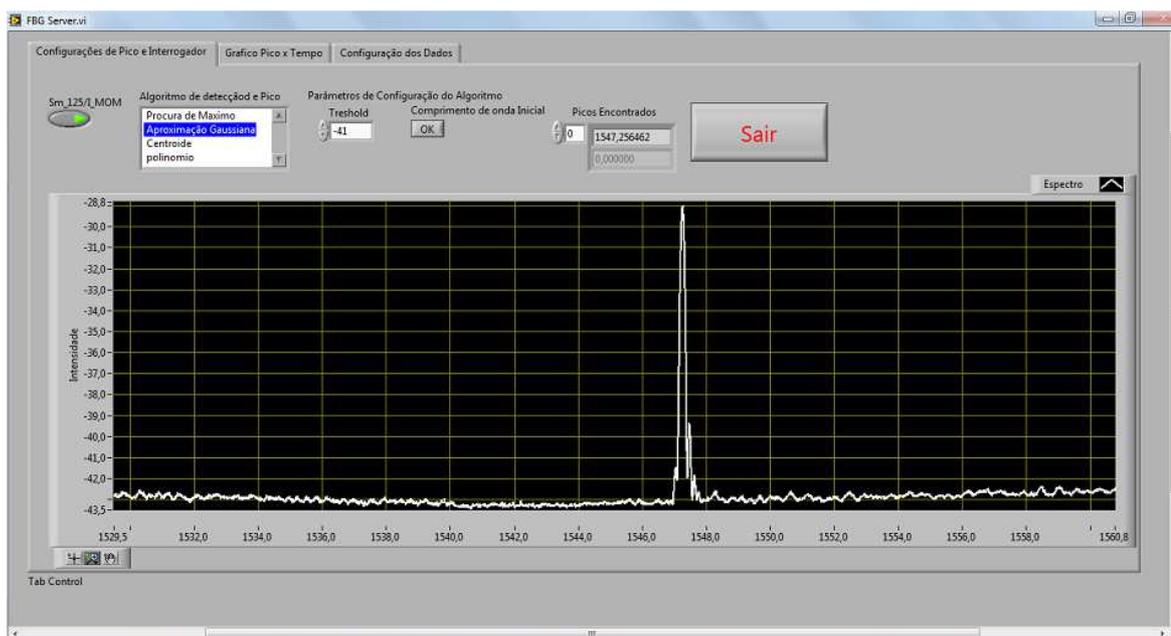


Figura 21 - Aba de configuração do algoritmo de detecção de picos no FBG.

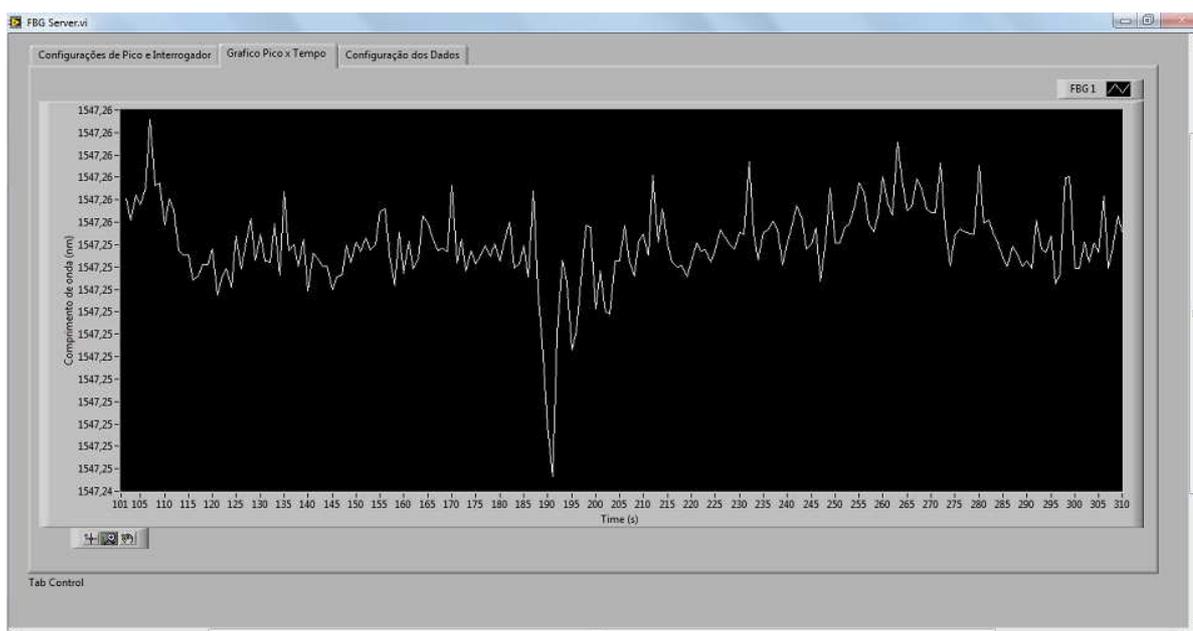


Figura 22 - Gráfico Tempo x Comprimento de onda dos picos que são encontrados pelo FBG Server.

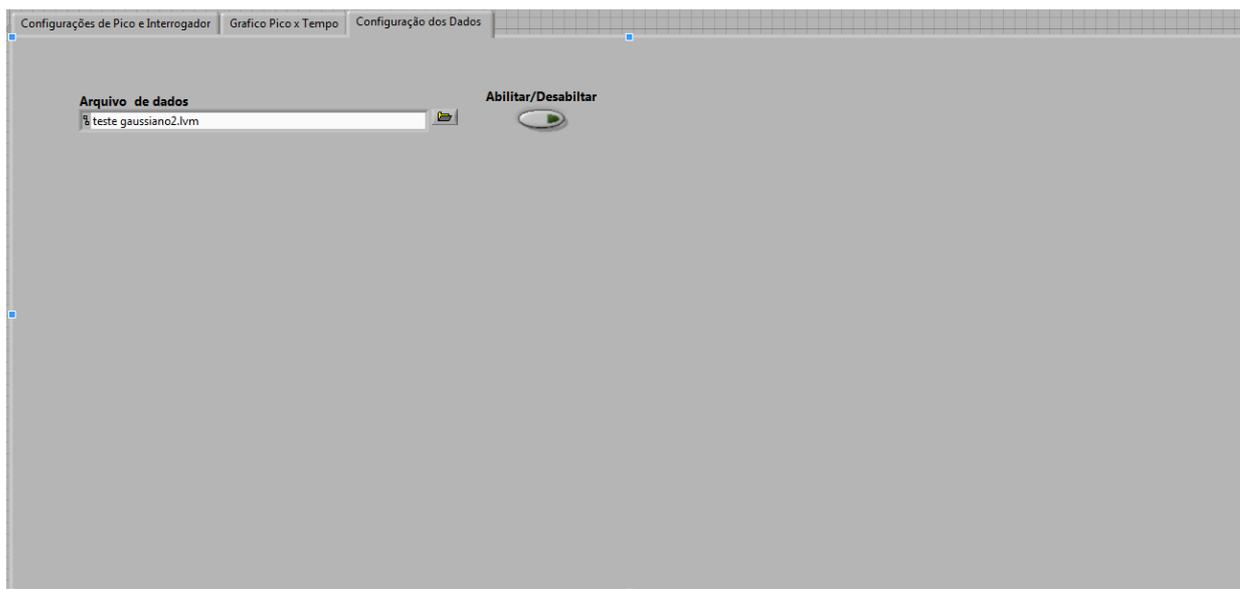


Figura 23: Aba de configuração do arquivamento e dos comprimentos de onda de pico detectados pelo FBG Server.

4.4.2 DESENVOLVIMENTO DO COMPARTILHAMENTO DE DADOS

O *FBG Server* disponibiliza os dados de duas formas diferentes para que outros *softwares* possam fazer o processamento dos dados. Nesse caso o *FBG Server* atua apenas como uma interface entre os interrogadores e o *software* de processamento. Para tal o *FBG Server* disponibiliza uma interface através do protocolo OPC, e outra através de um arquivo .txt atualizado conforme a leitura do interrogador.

Para poder disponibilizar os comprimentos de onda de pico pelo protocolo OPC, utilizou-se o *Shared Variable Engine* da *National Instruments* que é um servidor OPC programável através do Labview. Para o *array* de picos encontrados e conectado a esse *OPC server* que permite que os dados sejam acessados por outros *softwares* como supervisórios ou o MatLab.

O arquivo .txt criado para disponibilizar o acesso dos dados por programas escritos pelos alunos que não utilizam a linguagem LabView, é atualizado a cada nova leitura do interrogador, ou seja, os valores contidos nesse arquivo condizem apenas aos valores dos picos encontrados pelo *FBG Server* na última leitura efetuada, sendo que, para acessá-los em outros programas, é necessário apenas fazer uma rotina de leitura que esteja sincronizada com a frequência de leitura do interrogador, ou seja, se o interrogador estiver configurado para uma frequência de

atualização de 1 Hz o programa criado deve fazer o acesso ao arquivo .txt a cada um segundo.

Outra versão criada para o *FBG Server* funciona na forma de Sub VI, ou seja, pode ser incorporada a outros programas criados na linguagem de programação LabView, possibilitando a criação de programas de controle de processos em malha fechada, por exemplo, utilizando o próprio LabView sendo essa, uma linguagem desenvolvida para instrumentação, facilitando a comunicação com outros equipamentos ou até outros sensores.

4.5 METODOLOGIA DOS TESTES DO SOFTWARE.

Os testes dos algoritmos de detecção de pico foram realizados utilizando-se um sistema de calibração de deformação, formado por um posicionador linear e um relógio comparador com precisão de 0,01mm apresentado na Figura 24. Uma rede de Bragg em fibra ótica foi colada com cianoacrilato, uma ponta sobre a base fixa e a outra sobre a base móvel, de forma que o posicionador se desloca e o sensor é tensionado ou relaxado. Como visto na seção 2.3, tensões longitudinais provocam alterações no comprimento de onda de pico da FBG, sendo que, como o sistema é provido de um relógio comparador pode-se tensionar a FBG de forma controlada.

Os experimentos se deram da seguinte forma: Uma FBG foi fixada no sistema de calibração (após colagem e tempo de secagem de um dia). Em seguida, o posicionador foi deslocado de forma a tensionar a fibra ótica contendo a FBG, monitorando-se o pico da FBG com um interrogador até que um deslocamento positivo do comprimento de onda foi detectado. Isso foi feito para pré-tensionar o sensor, ou seja, calibrar o ponto zero de deformação. Após pré-tensionada, o relógio comparador é zerado também, indicando que aquele é o ponto zero. Uma segunda FBG foi multipleaxada ao sensor em teste para que os erros referentes à variações de temperatura pudessem ser separados dos dados de deformação.

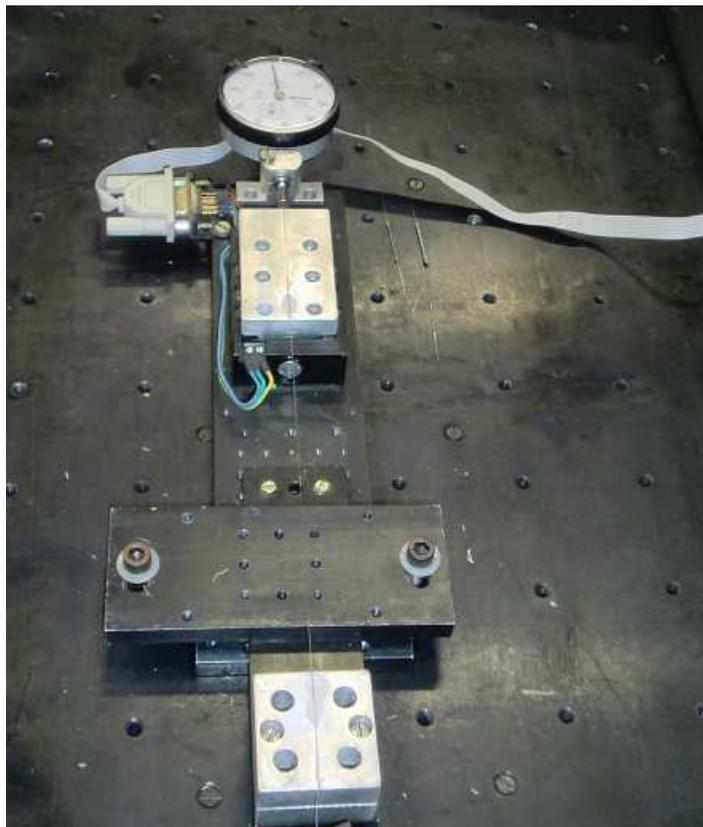


Figura 24 - Imagem do sistema de calibração de deformação da UTFPR. A fibra contendo a rede de Bragg é colada sobre os dois suportes nas extremidades do equipamento com o posicionador linear encontrado abaixo do suporte perto do relógio comparador, esse tenciona a fibra aplicando tensão sobre a rede de Bragg sendo a mesma controlada através das medições feitas pelo relógio comparador.

Pelo fato de o Sm_125 suportar até cinco conexões simultâneas de *software*, o teste do programa criado para o mesmo foi realizado executando-se o *software* Enlight (*software* comercial desenvolvido pela Micron Optics para esse interrogador) em paralelo com o *FBG Server*, tornando possível a aquisição do mesmo ponto no mesmo instante, reduzindo assim, o erro entre os dados adquiridos pelos dois *softwares*. Os *softwares* foram configurados para detectar o pico da FBG em teste e da FBG monitorando a temperatura. Depois de detectadas pelos dois *softwares*, o posicionador foi deslocado em 0,01 mm a cada 15 s até atingir o deslocamento de 0,1 mm, ou seja foram aquisitados 10 pontos, sendo que a cada 15 s os dados referentes ao pico de cada sensor em cada *software* eram anotados. Esse procedimento foi repetido 10 vezes para que o erro pudesse ser minimizado. Esperou-se 15 s entre cada deslocamento para que a fibra ótica pudesse se acomodar.

O mesmo procedimento foi tomado para o I-MOM sendo que o *software* comercial fornecido pelo fabricante é denominado de *I-MOM Ext Evalution*. Ao

contrário do Sm_125, pelo fato de se comunicar através da porta usb, o I-MOM não permite mais de uma conexão simultânea ao interrogador, isso fez com que os testes tivessem que ser feitos em duas etapas, ou seja, 10 medidas de deslocamento de 0 a 0,2 mm com um *software* de cada vez. Primeiro foram feitas as medições com o *software* comercial e depois as medidas com *software* em teste.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste Capítulo são apresentados os resultados obtidos durante os experimentos executados para avaliação do *software* desenvolvido. Primeiramente são apresentados os resultados do algoritmo de detecção de pico. Sequencialmente, serão apresentados os dados resultantes das comparações entre os *softwares* Enlight e I_MOM Ext Evaluation 4.0 com o *FBG Server*. Por fim serão apresentados os resultados dos testes de integração do *FBG Server* com um *software* supervisor.

5.1 ALGORITMO DE DETECÇÃO DE PICO

Com a finalidade de verificar o funcionamento do algoritmo de detecção de pico desenvolvido para o *FBG Server*, o mesmo foi executado passo a passo e plotado. A Figura 25 apresenta o espectro original das redes de Bragg em fibra ótica, as quais foram utilizadas nos testes de deformação. Pode-se observar a presença de ruídos e lóbulos laterais presentes no espectro.

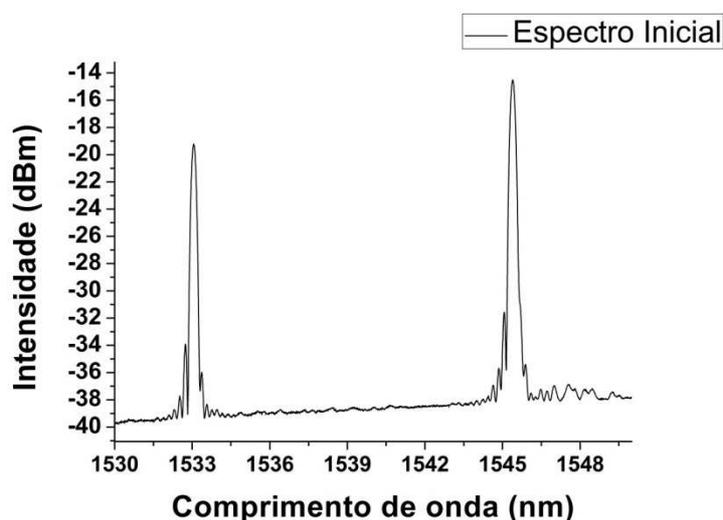


Figura 25: Espectro original das redes de Bragg em fibra ótica utilizada nos testes do algoritmo de detecção de picos. Este espectro foi adquirido com o interrogador Sm_125 com o *software* Enlight.

Após a execução do primeiro passo, pode-se se observar que a região onde as redes se encontram foi separada (Figura 26). Essa região condiz com o contorno das redes de Bragg em fibra ótica do espectro da Figura 25 sendo que

neste momento não são mais visualizados lóbulos laterais e ruídos no espectro. Esse processamento facilita os três passos seguintes para encontrar o pico das redes além de tornar possível a detecção de picos que tenham intensidades menores que os lóbulos laterais de outras redes de Bragg em fibra ótica quando estas estão multiplexadas como pode ser visto na Figura 30.

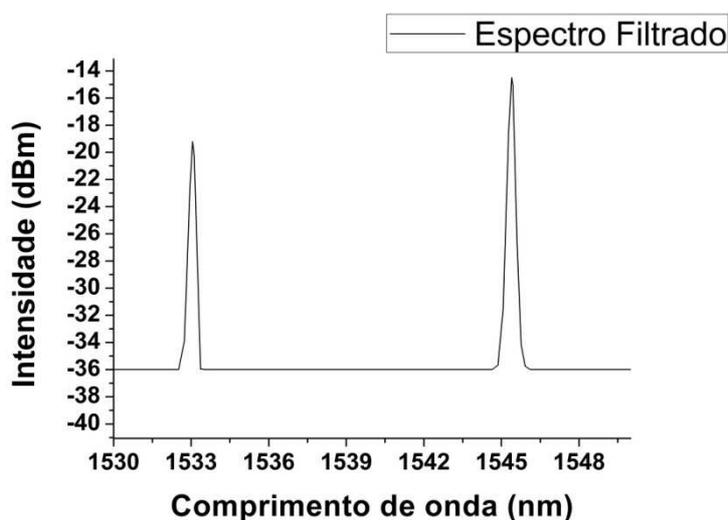


Figura 26: Espectro das redes de Bragg em fibra ótica após o primeiro passo do algoritmo de detecção de pico desenvolvido neste projeto. Observa-se que após o processamento do primeiro passo restam apenas os contornos de cada rede de Bragg em fibra ótica sendo que os lóbulos laterais e ruídos são eliminados.

A Figura 27 apresenta o resultado da derivada do sinal apresentado na Figura 26 sendo possível ver apenas dois pontos de inflexão os quais correspondem a duas redes de Bragg em fibra ótica apresentadas na Figura 25. Caso o 1º passo não tivesse sido executado, haveriam mais pontos de inflexão correspondentes a lóbulos laterais e ruídos causados pela reflexões de Fresnel.

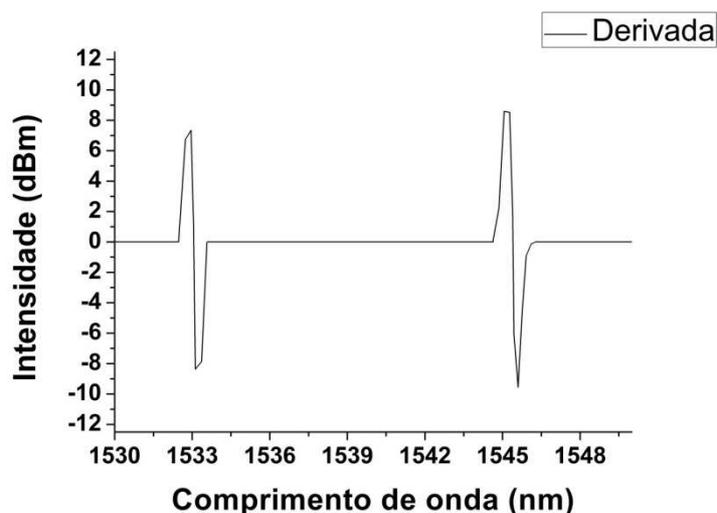


Figura 27: Resultado do segundo passo do algoritmo, que aplica uma derivada de primeira ordem ao sinal da Figura 26. O ponto de inflexão de cada derivada condiz com a intensidade máxima de cada uma das redes de Bragg em fibra ótica em teste.

Na Figura 28 é apresentado o resultado do terceiro passo do algoritmo. Esse aplica uma janela em torno do ponto de inflexão do sinal da derivada separando apenas a região próxima ao pico de cada rede de Bragg em fibra ótica contida no espectro.

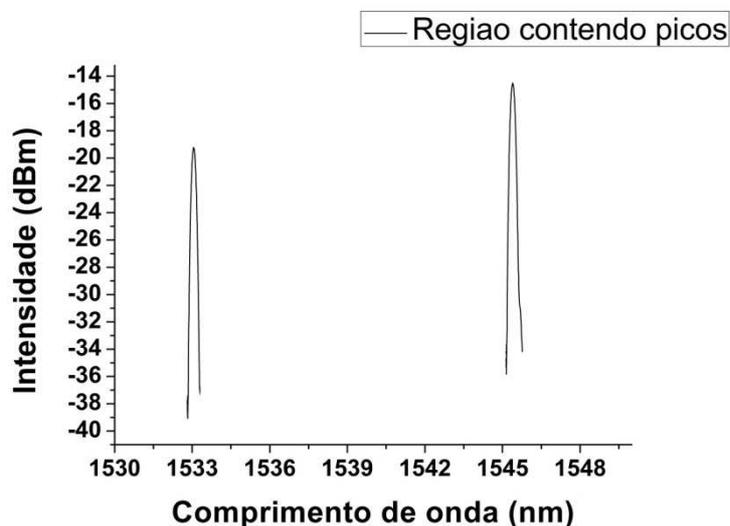


Figura 28: Resultado do terceiro passo do algoritmo, que aplica um janela próxima a cada ponto de inflexão encontrado, separando apenas a região próxima ao pico de cada rede de Bragg em fibra ótica para ser aplicada a aproximação gaussiana.

A Figura 29 apresenta sinal resultante da aproximação gaussiana e da detecção de pico que são resultado das equações 14 e 15 aplicadas ao sinal apresentado na Figura 28. Os picos encontrados estão posicionados respectivamente em 1533,055 e 1545,395 nm.

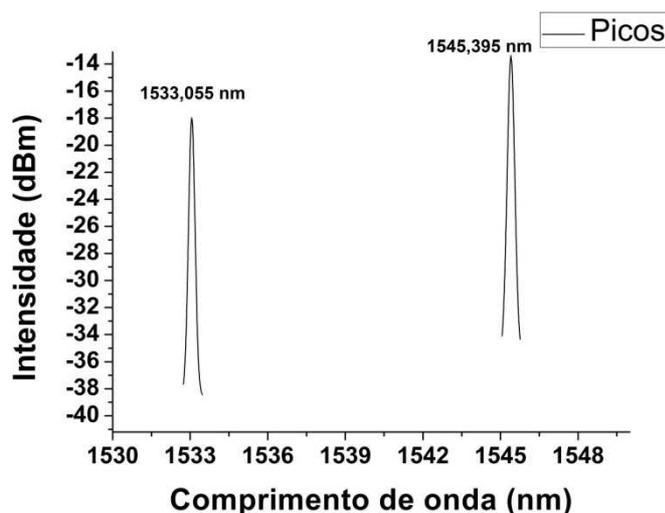


Figura 29: Aproximação gaussiana aplicada ao sinal da Figura 28. A aproximação gaussiana melhora a acurácia do algoritmo sendo os pontos correspondentes aos picos encontrados no final da execução de todos os passos. Os picos encontrados estão situados em 1533,055 e 1545,395 nm.

A Figura 30 apresenta um gráfico de um espectro simulado. Esse espectro foi gerado normalizando-se o espectro de uma rede de Bragg e multiplicando o por 10, por 100 e por 1000. Em seguida, uniu-se os espectros multiplicados em uma sequência de comprimentos de onda montando assim um espectro igual ao espectro adquirido pelo interrogador. O espectro simulado foi processado pelo algoritmo de detecção de pico desenvolvido tendo como resultado o pico das quatro redes, a original e as três ampliadas. Apesar das duas primeiras redes de Bragg em fibra ótica do espectro simulado serem menores que os lóbulos laterais da última rede, os picos foram encontrados com sucesso.

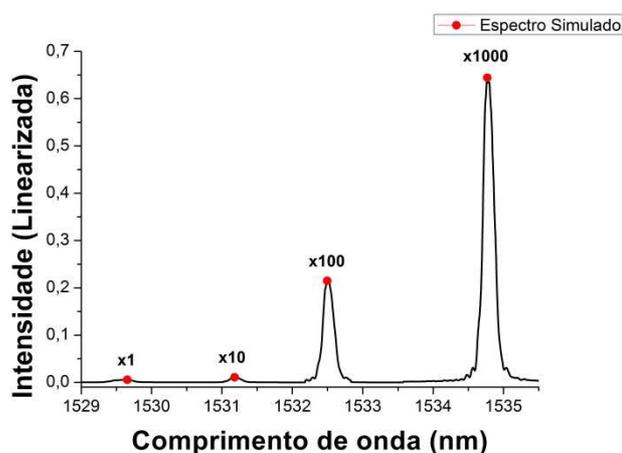


Figura 30: Gráfico apresentando um espectro simulado onde, todas as rede de Bragg em fibra ótica presentes são a mesma rede com a intensidade multiplicada por 10, por 100, e por 1000. A intensidade foi normalizada para que fosse possível ver as redes menores.

Para demonstrar a capacidade de detecção de vários tipos de redes de Bragg em fibra ótica e com varias intensidades distintas um espectro contendo 1 (uma) rede de Bragg em fibra ótica com chirp, 3 redes de Bragg uniformes e uma rede saturada como pode ser visto na Figura 31. As Figuras 32, 33, 34 e 35 apresentam cada passo da ferramenta de detecção de picos sendo aplicada ao espectro da Figura 31.

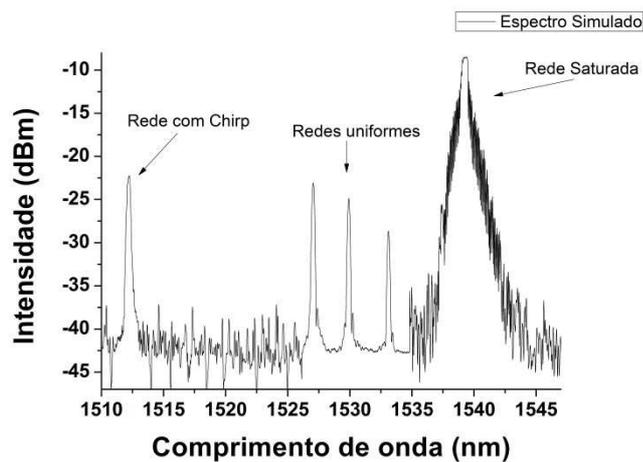


Figura 31: Espectro simulado multiplexando 3 tipos distintos de redes de Bragg em fibra ótica.

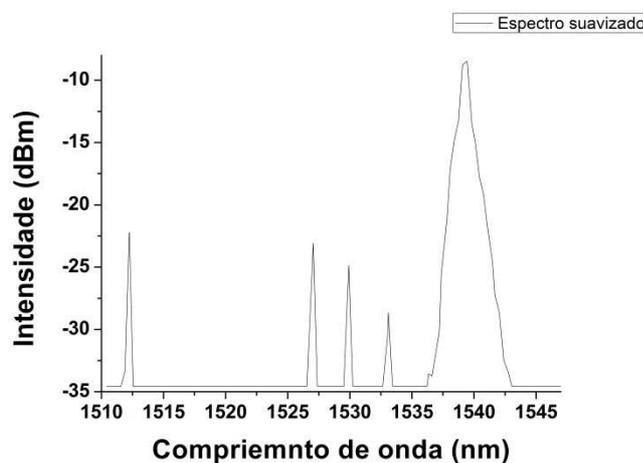


Figura 32: Suavização dos picos aplicada ao espectro da Figura 31, sendo o threshold utilizado igual a 34 dBm.

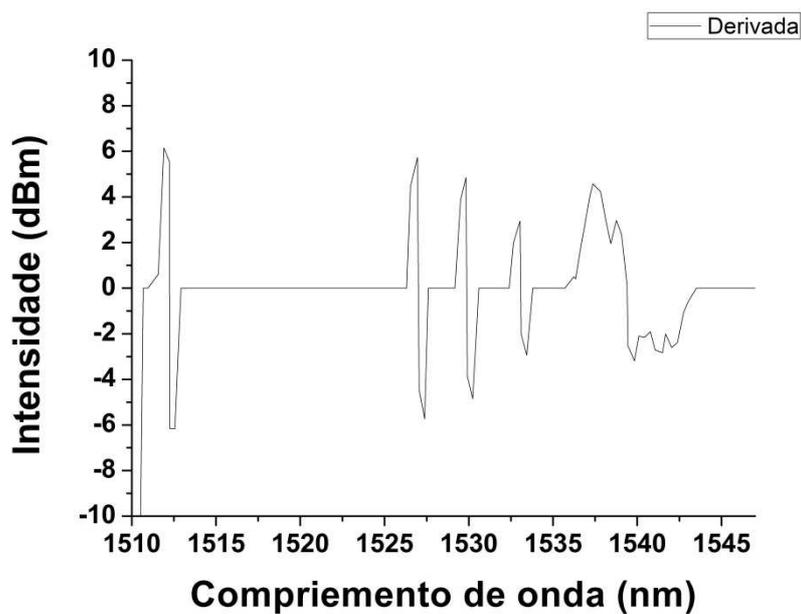


Figura 33: Derivada do espectro suavizado.

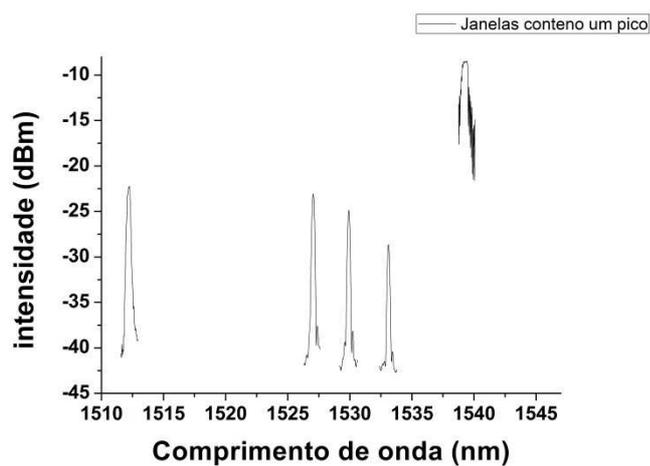


Figura 34: Janelas contendo os picos das 5 redes de Bragg em fibra ótica.

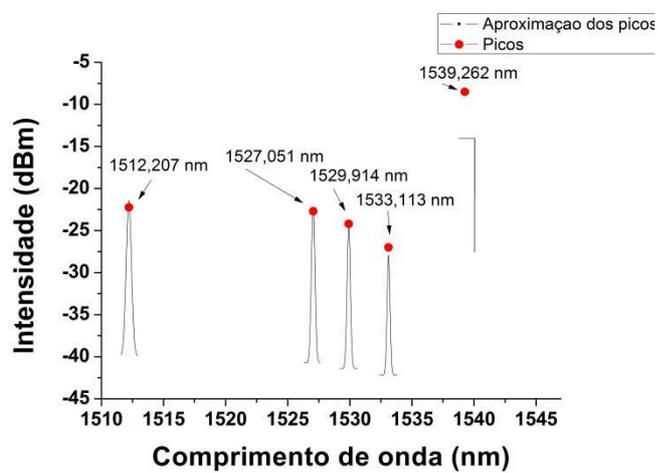


Figura 35: Aproximas dos picos das redes de Bragg em fibra ótica. Sendo o número de picos detectados igual a 5.

5.2 ENLIGHT VERSUS FBG SERVER

Para testar a validade do *FBG Server* trabalhando com o interrogador ótico Sm_125, o mesmo foi comparado com o Enlight. Para tal, foram feitas 10 medições de deformação com os dois softwares em paralelo. A Figura 36 apresenta um gráfico de variação de comprimento de onda por deslocamento do posicionador. Analisando-se esse gráfico pode-se chegar a conclusão que as duas curvas de deformação estão bastante próximas uma da outra sendo que o erro entre as duas é menor do que o desvio padrão das 10 medições. Convertendo-se a diferença das medidas entre os dois softwares para valores de deformação obtém-se que as maiores diferenças estão na ordem de 2 μ strain. Esse erro pode ser considerado como insignificante para processos que não necessitam de uma precisão tão elevada sendo que para tais processos o *FBG Server* se demonstra válido. Para processos que necessitam de uma precisão mais elevada, ou seja, abaixo de 2 μ strain, não é possível afirmar qual o software é mais preciso pelo fato de que os dois utilizam técnicas de detecção e aproximação distintas o que dificulta essa conclusão. As Figuras 37 e 38 apresentam a variação do comprimento de onda em nanômetros pelo deslocamento e o erro absoluto das medições feitas pelos dois softwares respectivamente.

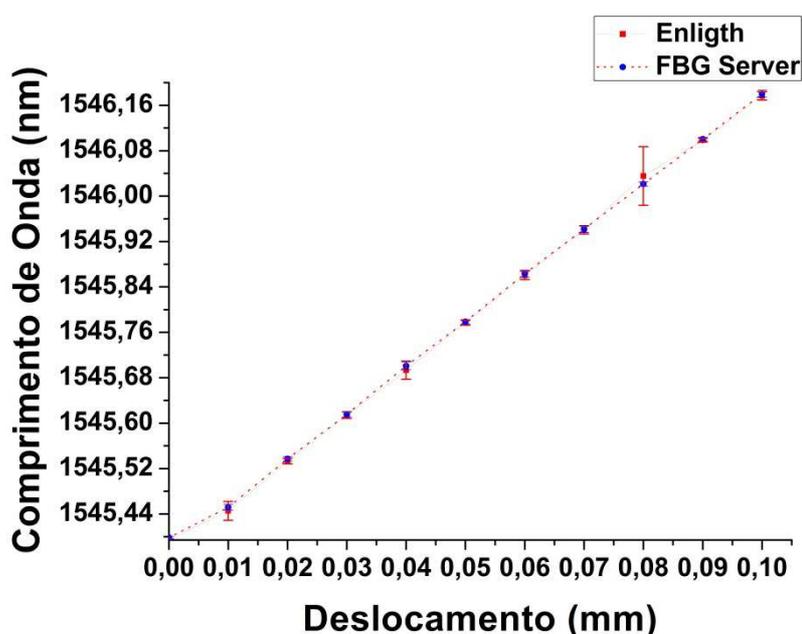


Figura 36 - Gráfico de comparação entre os valores adquiridos pelo Enlight e pelo *FBG Server*. Os dados correspondem a média entre dez medições de deformação consecutivas feitas em paralelo com os dois *softwares*.

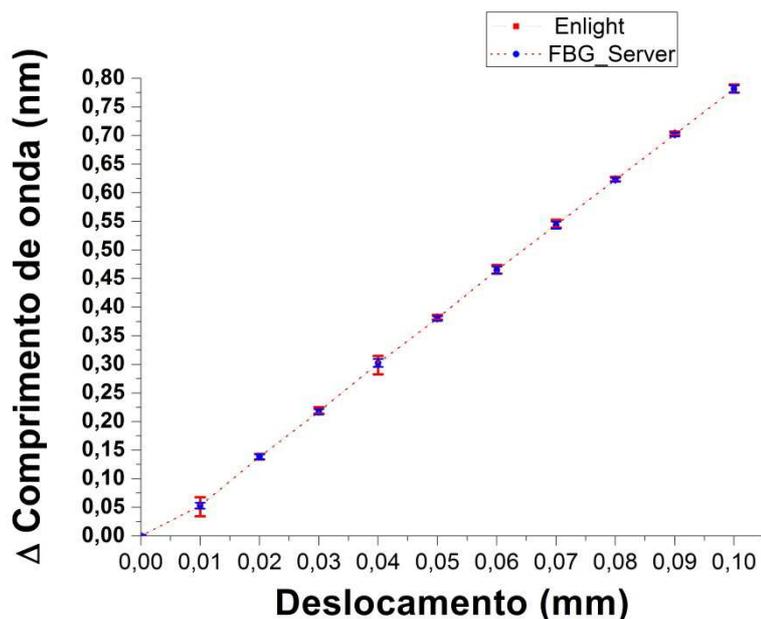


Figura 37 - Resultados da comparação entre o Enlight e o Algoritmo desenvolvido para o Sm_125, os dados dizem respeito à média com seu desvio padrão de 10 medidas consecutivas mas não paralelas do deslocamento do posicionador da posição 0 até a 0,1mm.

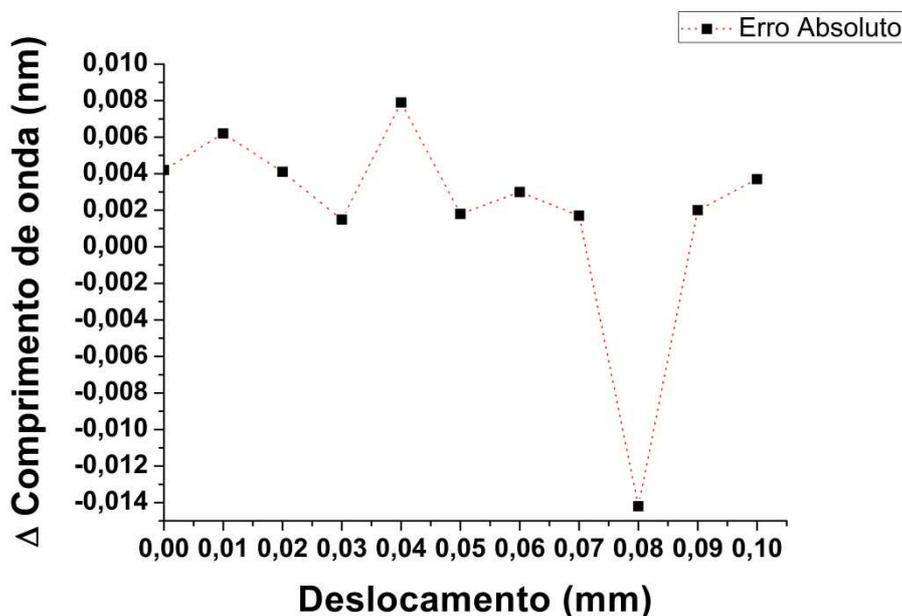


Figura 38 - Erro Absoluto entre as medições do Enlight e do *FBG Server*. O cálculo foi feito subtraindo-se os valores de comprimento de onda medidos por cada software referentes a cada deslocamento.

5.3 I-MOM EXT EVALUATION 4.0 VERSUS *FBG SERVER*

A Figura 39 e 40 apresenta a comparação entre as medidas feitas com o I_MOM Ext Evaluation 4.0, que é o software distribuído pelo fabricante do interrogador e o *FBG Server* que foi desenvolvido neste projeto. Pode-se observar

uma clara diferença entre os resultados dos dois *softwares* que pode ser atribuída à diferença entre os algoritmos de detecção de pico utilizados pelos dois *softwares*.

A diferença de temperatura que poderia influenciar no desvio das medições entre os dois *softwares* pelo fato de as medições terem sido executadas em tempos diferentes foi descartada através dos dados da segunda rede de Bragg em fibra ótica utilizada na montagem, que tinha por função monitorar a temperatura.

O erro absoluto entre os dois *softwares* é apresentado na Figura 41 sendo que este tem um valor máximo de até 30 pm, o que convertido para unidades de deformação equivale a 25 $\mu strain$. Em contra partida a variação do comprimento de onda pelo deslocamento (Figura 35) demonstra que a variação do comprimento de onda medido pelos dois *softwares* é muito próxima, existindo uma diferença máxima de 8 pm entre os dois *softwares*, em um deslocamento de aproximadamente 0,8 nm.

Pelo fato do equipamento possuir uma baixa resolução é difícil indicarmos qual *software* está correto ou mais próximo do pico. Porém, levando em consideração que, para a maioria das aplicações usando a FBG como um sensor a posição real do pico não é tão relevante quanto o deslocamento do pico monitorado, podemos dizer que o algoritmo desenvolvido é válido, pois a variação do deslocamento entre os dois *softwares* foi de apenas 0,008 nm em um deslocamento de 0,8 nm.

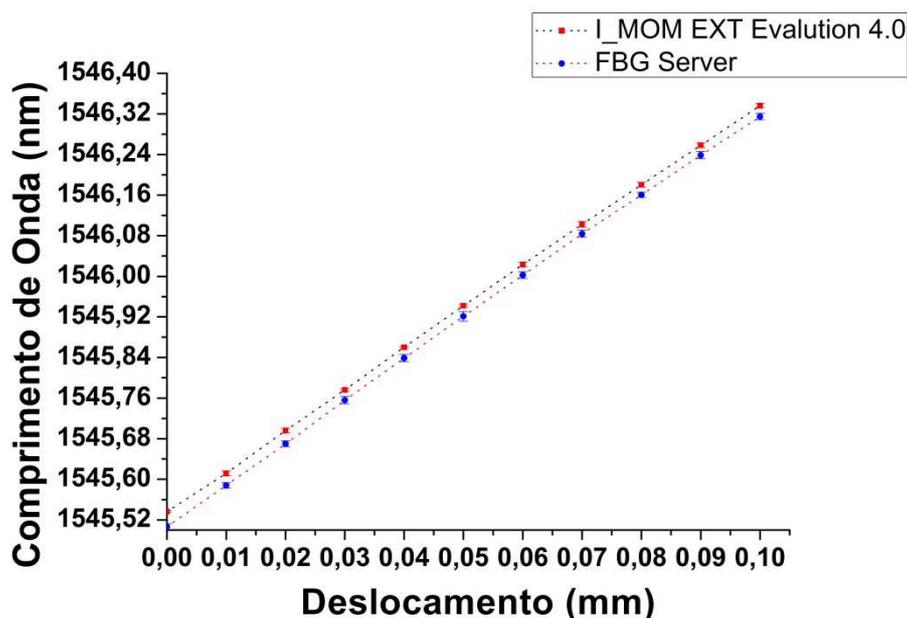


Figura 39 - Gráfico de comparação entre os comprimentos de onda adquiridos pelo I_MOM Ext Evaluation 4.0 e o FBG Server.

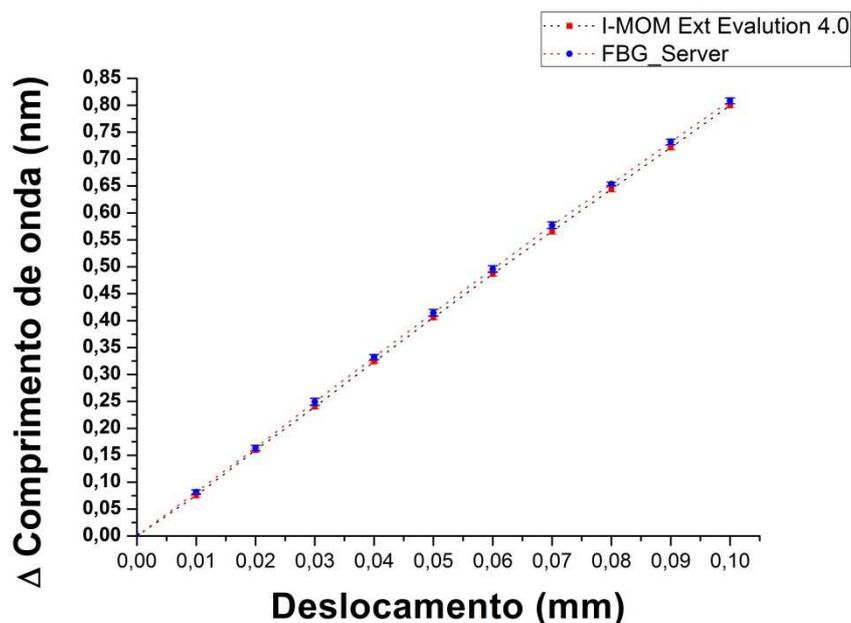


Figura 40 - Gráfica de comparação entre a variação do comprimento de onda pelo deslocamento longitudinal para os softwares I_MOM Ext Evaluation 4.0 e *FBG Server*.

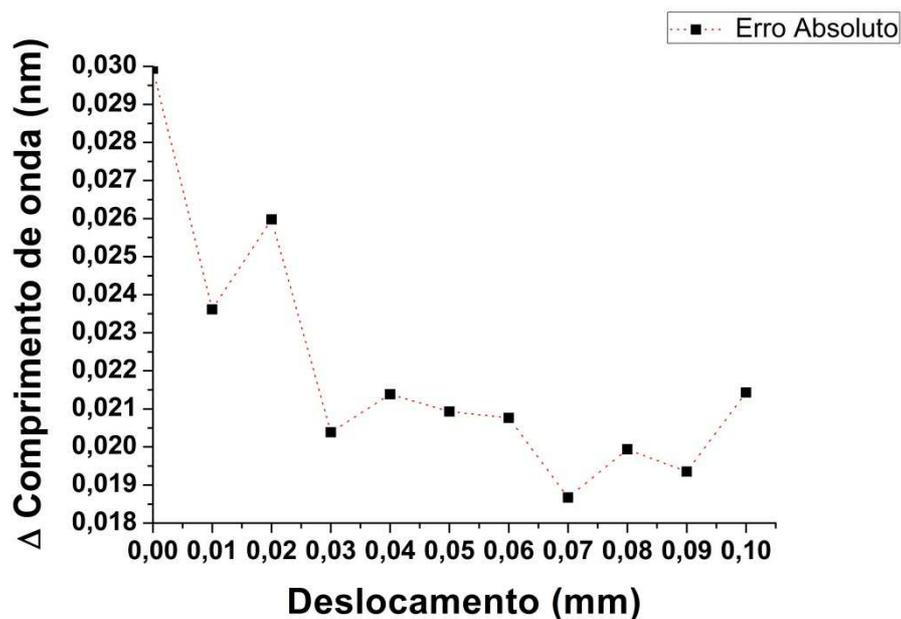


Figura 41 - Gráfico representando o erro absoluto entre as medições feitas pelos software I_MOM Ext Evaluation 4.0 e o *FBG Server*.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS SOFTWARES COMERCIAIS E FBG SEVER

Como já foi citado na seção 3.1, o I_MOM tem uma resolução muito reduzida em relação ao Sm_125, sendo que este tem uma banda de leitura de 80 nm com aquisição de 512 pontos contra uma banda de 50 nm com 10000 pontos aquisitados pelo Sm_125. Quanto menor a resolução do interrogador mais difícil se torna detectar os picos com precisão. Como o projeto objetivou o desenvolvimento

de um software integrado para os dois interrogadores é necessário que o mesmo algoritmo de detecção de pico possa ser aplicado para os dois sistemas de interrogação, assim sendo, o mesmo não pode ser afetado pela diferença de resolução dos sistemas. A Figura 42 apresenta um gráfico com as diferenças entre os espectros adquiridos pelos dois interrogadores.

Para verificar o erro causado por uma variação de resolução, calculou-se o erro absoluto entre as medições feitas pelos *softwares* comerciais de cada interrogador, o *I_MOM EXT Evaluation 4.0* e o *Enlight*, e entre os dados adquiridos pelo *FBG Server* para os dois interrogadores, os gráficos das Figuras 43 e 44 apresentam esses dados respectivamente. O erro absoluto foi calculado subtraindo os dados adquiridos pelo *Enlight* dos dados adquiridos pelo *I-MOM Ext Evaluation 4.0*. O mesmo processo foi aplicado ao *FBG Server*.

Analisando-se os gráficos das Figuras 43 e 44 pode-se observar que apesar de alto, o erro absoluto entre os dados adquiridos pelo *FBG Server* para os dois interrogadores é menor e mais constante que para os *softwares* comerciais dos dois equipamentos, demonstrando que a utilização do *FBG Server* para os dois interrogadores mostra-se mais precisa do que utilizando os *softwares* comerciais, em se tratando da utilização dos dois equipamentos para medir a mesma FBG.

O fato de o erro ser menor entre medições feitas com os dois interrogadores da mesma rede de Bragg em fibra ótica utilizando-se o *FBG Server* facilita o processamento dos dados quando é necessária a utilização dos dois interrogadores, como, por exemplo, para calibração é melhor utilizar o Sm_125 por conta da sua resolução mais alta. Porém para os testes que necessitam de uma frequência de aquisição maior utiliza-se o *I_MOM*.

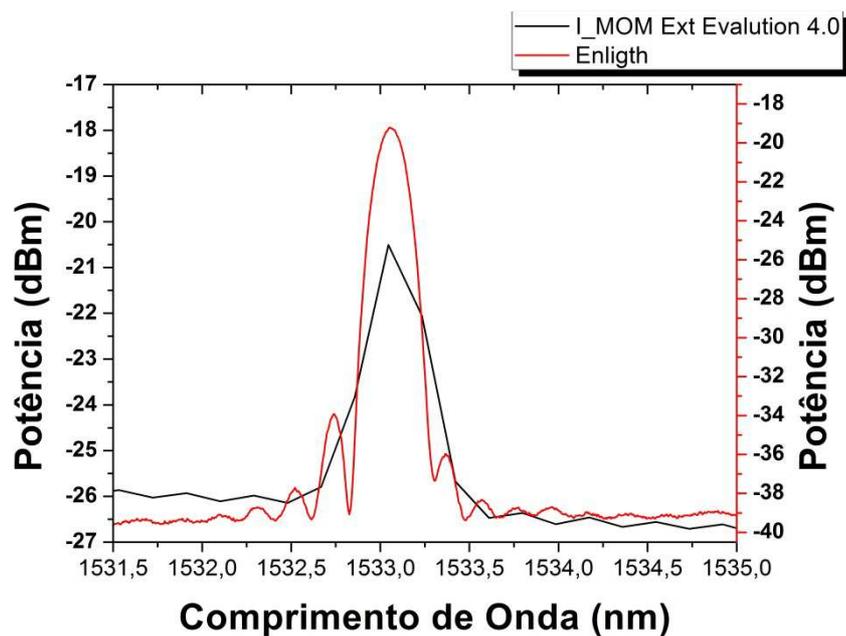


Figura 42 - Gráfico representando os espectros de uma rede adquiridos pelos dois interrogadores utilizados no projeto. Pode ser observada a diferença entre a resolução dos dois equipamentos onde a linha vermelha representa o espectro adquirido com o Sm_125 sendo que o mesmo possui uma banda de 50 nm com 10000 pontos e a linha preta referente ao I_MOM cuja banda é de 80 nm com 512 pontos aquisitados.

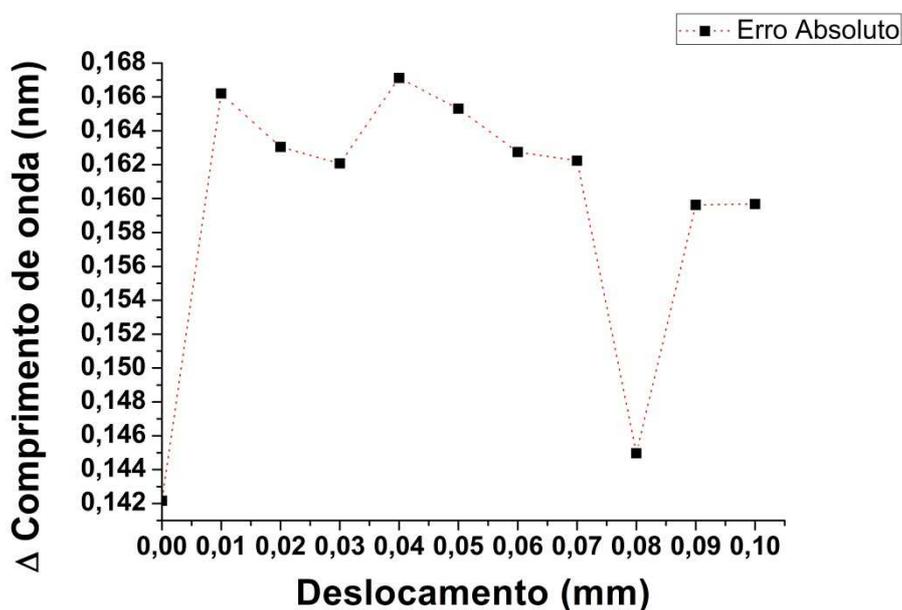


Figura 43 - Erro absoluto entre os softwares comerciais Enlighth e I_MOM Ext Evaluation 4.0.

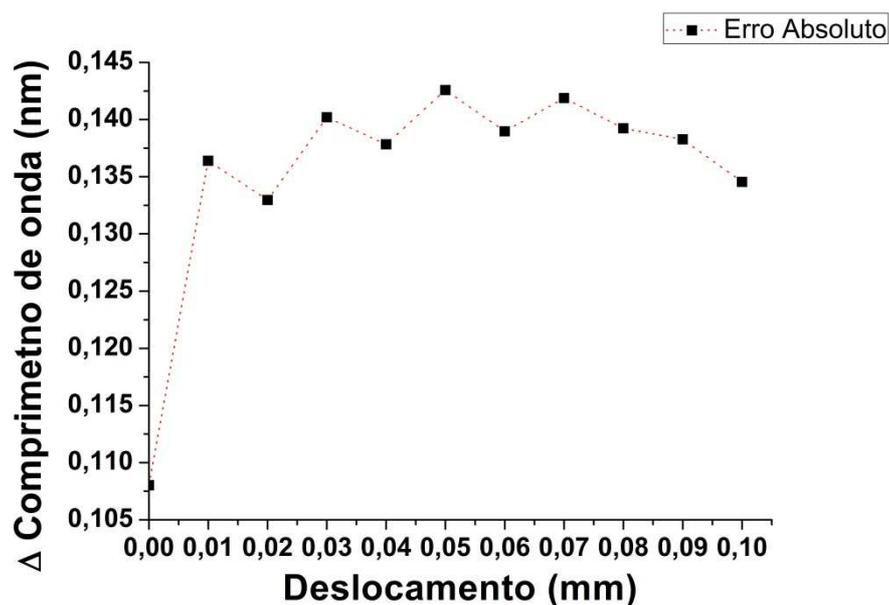


Figura 44 - Erro Absoluto do *FBG Server* entre os dois sistemas de interrogação.

5.5 CAPACIDADE DE INTEGRAÇÃO DO *FBG SERVER*

A capacidade de integração do *FBG Server* com outros softwares através do protocolo de comunicação OPC foi testada utilizando-se o software supervisor Elipse E3. Esse é um software supervisor, de criação nacional, utilizado em indústrias nacionais e internacionais. Para o teste, um gráfico de variação de comprimento de onda por tempo e um indicador numérico foram criados como mostrado na Figura 37.

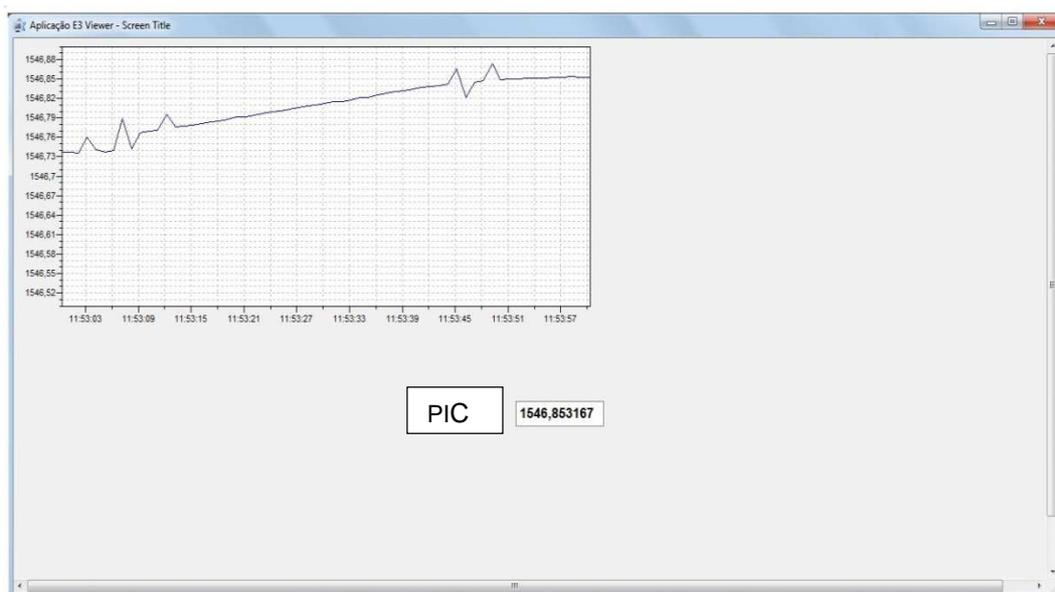


Figura 45 - Tela criada no software supervisor Elipse E3 para avaliar a capacidade de integração do *FBG Server* com softwares que disponibilizam comunicação via protocolo OPC.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os sensores do tipo FBG estão se tornando uma tecnologia emergente e madura que está saindo dos campos de pesquisa para aplicação em áreas industriais. Esse fato leva a um segundo ponto que é o tratamento dos dados desses sensores. Atualmente os sistemas de interrogação possuem softwares para o processamento dos dados adquiridos pelos mesmos, mas estes são muito limitados para as aplicações exigidas pela indústria. Este trabalho teve como resultado o desenvolvimento de um software capaz de integrar os dois sistemas de interrogação disponíveis na UTFPR - Câmpus Curitiba em uma única interface, além do desenvolvimento de todo o algoritmo de detecção dos picos das FBGs, e formas de compartilhamento desses dados com outros softwares comerciais.

O algoritmo de detecção e picos desenvolvido apresentou-se extremamente simples e eficaz, sendo o mesmo facilmente escrito em qualquer linguagem de programação, podendo tornar o mesmo, um sistema multiusuário e multiplataforma. O algoritmo foi testado utilizando-se um sistema de calibração de deformação aplicando um deslocamento de 0,1 mm a FBG. Os resultados demonstram que mesmo havendo uma diferença entre os dados resultantes do software comercial para o interrogador Sm_125 e do algoritmo desenvolvido, essa é menor do que incerteza das medições dos mesmos. Para o I_MOM, os comprimentos de onda de pico detectados pelo software I_MOM Ext Evaluation 4.0 e o algoritmo desenvolvido tiveram uma diferença de até 30 pm, o que significa um erro muito grande, mas em contra partida analisando-se o deslocamento do pico medido pelos dois obtém-se um valor abaixo de 8 pm o que é aceitável para um sistema com baixa resolução como o I_MOM.

Levando-se em consideração que o que é desejável de um sistema de interrogação é a leitura do deslocamento de um comprimento de onda de referência, o qual é o pico de reflexão de Bragg numa FBG, pode-se dizer que o algoritmo de detecção e pico desenvolvido é funcional para os dois sistemas de interrogação apresentados neste desenvolvimento, pois, apesar de existir uma diferença entre os valores de comprimento de onda de pico encontrados pelos softwares comerciais e este, os valores de deslocamento de comprimento de onda do pico detectado por eles é muito próximo e dentro da incerteza de cada sistema. Assim, pode-se afirmar que o algoritmo de detecção de pico desenvolvido durante

este trabalho pode substituir os softwares comerciais para esses sistemas de interrogação. Outro ponto importante que demonstra a validade do algoritmo aparece nos testes utilizando os dois interrogadores, pois os resultados demonstram que o erro absoluto ao se medir a mesma rede de Bragg com os dois softwares comerciais e com o algoritmo desenvolvido, o erro absoluto entre os dois é muito maior do que os medidos entre o algoritmo proposto. Isso significa que quando é necessário utilizar os dois equipamentos para analisar uma FBG, é mais vantajoso utilizar o mesmo algoritmo de detecção, pois o erro absoluto gerado pela diferença de resolução diminui.

Sabendo-se que para um equipamento se tornar vantajoso para a indústria, o mesmo deve ser de fácil integração com os mais diversos sistemas existentes. Para tal o *FBG Server* foi desenvolvido para poder se comunicar com os mais diversos sistemas e para ser facilmente integrado aos mesmos. Os testes demonstraram que o *FBG Server* se integra facilmente a sistemas supervisórios e softwares de tratamento de dados através do protocolo OPC sendo que, o mesmo, como forma de teste foi integrado com o Eclipse E3, um software supervisório utilizado em indústrias. Além disso, outro objetivo foi desenvolver o software para que o mesmo fosse fácil de ser adaptado para as pesquisas executadas dentro do grupo de pesquisa. Isso foi executado através da criação de uma VI do *FBG Server*, sendo que esta já está sendo aplicada em dois experimentos por alunos do grupo de pesquisa sendo uma desenvolvida para facilitar o processamento dos dados adquiridos e outra para executar um controle de temperatura em malha fechada.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos através dessa dissertação, sugere-se como trabalhos futuros:

- 1- Aplicação da VI desenvolvida em controles em malha fechada utilizando FBGs como elemento sensor.
- 2- Aplicar o algoritmo desenvolvido em espectros adquiridos por outros interrogadores diferentes dos mencionados neste trabalho.

- 3- Desenvolver uma interface para transformar um sistema de interrogação com mais de um canal de leitura em um equipamento multiusuário.
- 4- Desenvolver o *FBG Server* em linguagem de programação Java para tornar o mesmo multi-plataforma.

REFERÊNCIAS

BALL,G. A.; MOREY,W. W.; CHEO,P. K. Fiber Laser Source/Analyzer for Bragg Grating Sensor Array Interrogation. **JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY**, V. 12. n. 4, 1994.

BLAIS,F.; RIOUX,M. Real-Time Numerical Peak Detector.**Signal Processing**. V.11, p.145-155, 1986.

BODENDORF T.; MÜLLER M. S.; HIRTH F.; KOCH A. W. Comparison of different peak detection algorithms with regards to spectrometric fiber Bragg grating interrogation systems, **The International symposium on Optomechatronic Technologies**, 2009.

COOPER,D.J.F.; SMITH,P.W.E. Limits in wavelength measurement of optical signals. **J. Opt. Soc. Am. B.V.** 21, n. 5, 2004.

EZBIRI, A., KANELLOPOULOS, S., HANDEREK, V. High resolution instrumentation system for fibre-bragg grating aerospace sensors. **Optics Communications**, v. 150, p. 43-48, 1998.

HAMAMATSU Photonics K.K. InGaAs Linear Sensors. Japão: 2009, 6 p.

HARAMONI,N. Sistema Para Interrogação De Redes De Bragg Utilizando Laser Edf Sintonizado Mecanicamente. . Dissertação (mestrado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection fiber fabrication. *Applied Physics Letters*, v.32, p. 647-649, 1978.

HILL, K. O., MELTZ, G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263-1276, 1997.

IBSEN PHOTONICS A/S. **I-MOM E-USB 2.0 Product specification**. Dinamarca 2009. 7 p.

JIANG,J.; LIU,T.; LIU,K.; ZHANG,Y. Investigation of peak wavelength detection of fiber Bragg grating with sparse spectral data. *Optical Engineering*.V. 51, n.3, 2012.

KASHYAP, R. *Fiber Bragg Gratings*, San Diego: Academic Press, 1999.

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**. V. 18, n. 16, 1993.

LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. Characterization of single-mode optical fiber filters. **APPLIED OPTICS**. V. 20, n. 3, 1981.

MELLE,S.M.; ALAVIE,A.T.; KARR,S.; COROY,T.; LIU,K.; MEASURES,R.M. A Bragg Grating-Tuned Fiber Laser Strain Sensor System. **IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS**, V. 5, n. 2, 1993.

MELTZ, G., MOREY, W. W. GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 20, p. 823-825, 1989.
Morey,W.W.; Meltz,G.; Glenn,W.H. Fiber Optic Bragg Grating Sensors. **SPIE Fiber Optic and Laser Sensors VII**. V.1169, p.98-107, 1989.

MICRON OPTICS. Sm_125 Optical Sensing Interrogator Instruction Manual. Atlanta: 2004. 66 p.

NAIDU, D. K., FISHER, R. B. A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of stripe to sub-pixel accuracy. **British Machine Vision Conference**, p. 217-255, Berlin 1991.

NEGRI,L.; NIED,A.; KALINOWSKI,H.; PATERNO,A. Benchmark for Peak Detection Algorithms in Fiber Bragg Grating Interrogation and a New Neural Network for its Performance Improvement. *Sensors*. V.11, p. 3466-3482, 2011.

NIWCZAS, P., WILLSHIRE, A. J., DZIUDA, L., MC DONALD, J. R. Performance Analysis of the Fiber Bragg Grating Interrogation System based on a Arrayed Waveguide grating. **IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference**, p. 1513-1517, Colorado 2003.

OTHONOS, A., KALLI, K., Fiber Bragg Gratings: Fundamental and Applications in Telecommunications and sensing, Artech House, 1999.]

PATERNO, A. S.; ARRUDA, L. V. R.; KALINOWSKI, H. J. Approximation Methods Of Optical Spectra: An Analysis Of The Application Of Constructive Rbf Networks In Fiber Optic Sensing. **Learning and Nonlinear Models - Revista da Sociedade Brasileira de Redes Neurais (SBRN)**, Vol. 3, n. 2, p. 61-70, 2005.

PATERNO, A. S. Sistemas de sensoriamento em fibra ótica. Análise e implementação com aplicação na instrumentação de processos petroquímicos. Tese (doutorado). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PATERNO, A.S.; NEGRI, L.H.; ZILLI, G.; CUNHA, C.; WANG, Y.; PATYK, R.L.; KALINOWSKI, H.J.; FABRIS, J.L. FBG Interrogation and the Benchmark for Algorithms in the Processing of Experimental Data. **IEEE**, 2011.

PATERNO, A.S.; SILVA, J. C. C.; MILCZEWSKI, M. S.; ARRUDA, L. V. R.; KALINOWSKI, H. J. Radial-basis function network for the approximation of FBG sensor spectra with distorted peaks. **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY**. V.17, p.1039–1045, 2006.

PAWEL, G. Optical Fiber Sensors. Disponível em <<http://www.immt.pwr.wroc.pl/~gasiior/>> Acesso em: 20 Jul. 2012.

SLATER, J. C. Interaction of Waves in Crystals. *Reviews of Modern Physics*, v. 30, p. 197-222, 1958.

ZHAO, J., Na Object –Oriented Simulation Program for Fiber Bragg Gratings, Tese (Doutorado), Johannesburg ,2001.

ZHAOXIA, W.; HAILI, Y. Fiber Bragg Grating Peak Wavelength Detection Technique Based on Wavelet Analysis. **International Conference on Internet Computing and Information Services**, 2011.

ANEXO A

Tabela de comandos para configuração e aquisição de dados do Sm_125

Tabela 3: Comandos Para Sm_125

Comando (Porta 50000)	Função
#IDN?	Retorna o nome e a versão do instrumento
#GET_SYSTEM_IMAGE_ID	Retorna a versão do software instalado no interrogador
#SET_IP_ADDRESS	Muda o endereço de <i>IP</i> do instrumento
#SET_IP_NETMASK	Muda a mascara de sub rede do instrumento
#GET_IP_ADDRESS	Retorna o endereço de <i>IP</i> do instrumento
#GET_IP_NETMASK	Retorna a mascara de sub rede do instrumento
#GET_DATA	Retorna o espectro do sinal.
Comando (Porta 55000)	Função
#SET_PEAK_THRESHOLD_CH1	Seta o threshold do canal 1 em dBm para o algoritmo de detecção de pico interno.
#GET_PEAK_THRESHOLD_CH1	Retorna o threshold do canal 1 em dBm para o algoritmo de detecção de pico interno.
#SET_PEAK_WIDTH_CH1	Seta a largura do pico a ser detectado pelo algoritmo de detecção de pico interno, no canal 1
#GET_PEAK_WIDTH_CH1	Retorna a largura do pico a ser detectado pelo algoritmo de detecção de pico interno, no canal 1
#GET_PEAKE_AND_LEVELS	Retorna o comprimento de onda e a amplitude de cada pico detectado pelo algoritmo.