



ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA SISTEMATIZAÇÃO DA FABRICAÇÃO  
DE REDES DE BRAGG NO LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E  
FOTÔNICA (LIF)

Talitha Trovão Vaz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck  
Alex Dante

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2020

ANÁLISES DE PARÂMETROS PARA SISTEMATIZAÇÃO DA FABRICAÇÃO DE  
REDES DE BRAGG NO LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E  
FOTÔNICA (LIF)

Talitha Trovão Vaz

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA  
A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Aprovada por: Prof. Marcelo Martins Werneck

Prof. Alex Dante

Prof. Cesar Cosenza de Carvalho

Prof. João Marcos Salvi Sakamoto

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2020

Vaz, Talitha Trovão

Análise de parâmetros para sistematização da fabricação de redes de Bragg no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF)/Talitha Trovão Vaz. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XIV, 94 p.: il.; 29, 7cm.

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 57 – 60.

1. Fabricação de redes de Bragg. 2. Planejamento experimental. 3. FBG. 4. Interrogação. 5. Redes gêmeas. I. Werneck, Marcelo Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# Agradecimentos

Agradeço à minha companheira de vida, Tábata. Posso dizer que tive o privilégio de fazer o que gosto com quem eu amo me apoiando.

Aos professores Marcelo Werneck e Alex Dante por todo o conhecimento e dedicação. Obrigada por me tornarem uma cientista.

À família LIF, em especial a todas as "bacurinhas" por todo suporte emocional nessa jornada de mais de três anos. Agradeço especialmente a minha vizinha de bancada, Larissa Maria e ao pseudo estrangeiro Roberto Mok. Agradeço também toda ajuda da Vanessa Vólaro, graças a você tive os conhecimentos necessários para o planejamento experimental empregado nessa pesquisa. Sou uma pessoa muito melhor do que entrei graças a todos vocês.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento a esta pesquisa.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE PARÂMETROS PARA SISTEMATIZAÇÃO DA FABRICAÇÃO  
DE REDES DE BRAGG NO LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E  
FOTÔNICA (LIF)

Talitha Trovão Vaz

Fevereiro/2020

Orientadores: Marcelo Martins Werneck

Alex Dante

Programa: Engenharia Elétrica

Neste trabalho foi descrito o desenvolvimento de uma análise de parâmetros visando a sistematização do processo de fabricação de redes de Bragg (FBG), considerando a infraestrutura do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF), que é composta de dois *lasers* distintos: íons de argônio com regime contínuo de irradiação ultravioleta com 244 nm; e Nd:YAG com regime pulsado com irradiação ultravioleta de 266 nm. Foi aplicado um planejamento experimental no *laser* de Nd:YAG com base na variação de tempo de exposição da fibra ao *laser*, e da energia média do pulso para otimização do processo de fabricação com esta fonte de luz. Considerando a otimização dos parâmetros intrínsecos das FBGs, foi determinado o ponto ótimo de fabricação, no qual os sensores foram submetidos a caracterizações envolvendo deformação mecânica e temperatura. Um universo amostral de sensores fabricados sob as mesmas condições, em cada fonte de luz, foi analisado para quantificação de incertezas associadas à fabricação. Foi obtido eficiência de fabricação de 20% como uso do *laser* de Nd:YAG. Por outro lado, no *laser* de argônio houve 100%, mas com incertezas associadas aos parâmetros muito dispersas. Simulações foram realizadas com a finalidade de verificar como os sensores fabricados se comportariam em situação de sensoriamento de sinais AC, baseando-se em sistemas de demodulação por redes gêmeas. Concluídas as análises, foi verificado que a otimização do sensoriamento de sinais AC foi obtido com a utilização de um sistema misto, envolvendo sensores fabricados nas duas fontes de *laser*.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PARAMETER ANALYSIS FOR SYSTEMATIZATION OF FIBER BRAGG  
GRATING FABRICATION AT PHOTONICS AND INSTRUMENTATION  
LABORATORY

Talitha Trovão Vaz

February/2020

Advisors: Marcelo Martins Werneck  
Alex Dante

Department: Electrical Engineering

This work describes the development of a parameter analysis aiming at the systematization of fiber Bragg grating (FBG) fabrication process, considering the infrastructure of the Photonics and Instrumentation Laboratory, which is composed of two different lasers: argon-ion with continuous wave ultraviolet irradiation with 244 nm; and pulsed Nd:YAG with ultraviolet irradiation with 266 nm. An experimental design was applied to the Nd:YAG laser based on the variation of fiber exposure time to the laser and the average pulse energy to optimize the fabrication process with this light source. Considering the optimization of the intrinsic parameters of the FBGs, the optimal manufacturing point was determined, and the sensors were under to characterizations involving mechanical deformation and temperature. A sample universe of sensors fabricated under the same conditions, in each light source, was analyzed to quantify the uncertainties associated. Manufacturing efficiency of 20 % was obtained using Nd:YAG laser. On the other hand, the argon-ion laser there was 100 %, but with very dispersed uncertainties. Simulations were performed to verify how the fabricated sensors would behave in AC signal sensing situation, based on twin-grating demodulation systems. After the analysis, it was verified that the optimization of the AC signal sensing was obtained with the use of a mixed system, involving sensors fabricated with the two laser sources.

# Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	2
1.3 Estruturação do trabalho . . . . .	2
<b>2 Fundamentos Teóricos</b>	<b>4</b>
2.1 Planejamento experimental . . . . .	4
2.1.1 Experimentos fatoriais em $2^k$ . . . . .	4
2.1.2 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) . . . . .	4
2.2 Fibra óptica . . . . .	6
2.2.1 Fotossensibilidade em fibras ópticas . . . . .	6
2.3 Redes de Bragg em fibras ópticas . . . . .	7
2.3.1 Tipos de FBGs . . . . .	10
2.3.2 Sensibilidade de uma FBG a deformação mecânica e temperatura . . . . .	11
2.4 Técnicas de fabricação de FBGs . . . . .	13
2.4.1 Gravação interna . . . . .	13
2.4.2 Gravação externa . . . . .	13
2.5 Técnicas de interrogação de FBGs . . . . .	15
2.5.1 Demodulação por comprimento de onda . . . . .	15
2.5.2 Demodulação por filtros sintonizáveis . . . . .	15
2.5.3 Demodulação por redes de Bragg gêmeas . . . . .	16
2.6 Fabricação de FBGs com <i>lasers</i> de Nd:YAG e íons de Argônio . . . . .	17
2.6.1 Fabricação com <i>laser</i> de Nd:YAG . . . . .	17
2.6.2 Fabricação com <i>laser</i> de íons de Argônio . . . . .	19

<b>3</b>	<b>Metodologia e Materiais</b>	<b>21</b>
3.1	Premissas experimentais . . . . .	21
3.2	Fabricação de FBGs no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) . . . . .	23
3.2.1	Inscrição com <i>laser</i> pulsado de Nd:YAG . . . . .	25
3.2.2	Inscrição com <i>laser</i> contínuo de íons de Argônio . . . . .	26
3.2.3	Variação de parâmetros no processo de fabricação da rede de Bragg . . . . .	27
3.2.4	Hidrogenação . . . . .	29
3.2.5	Caracterização das FBGs com base em deformação mecânica .	30
3.2.6	Caracterização das FBGs com base em variação de temperatura e avaliação de temperatura extrema . . . . .	31
3.3	Simulação de interrogação por redes gêmeas em <i>LABVIEW<sup>TM</sup></i> . . .	31
<b>4</b>	<b>Resultados e Discussões</b>	<b>33</b>
4.1	Otimização de processo com base no DCCR . . . . .	33
4.1.1	Comportamento do $\lambda_{Bragg}$ . . . . .	33
4.1.2	Comportamento do FWHM . . . . .	36
4.1.3	Comportamento da refletividade . . . . .	38
4.1.4	Comportamento do SLSR . . . . .	40
4.2	Caracterização de deformação mecânica . . . . .	42
4.3	Comparativo de aparatos experimentais de fabricação de FBG . . . .	43
4.3.1	Histogramas associados às FBGs fabricadas com laser de Nd:YAG . . . . .	44
4.3.2	Histogramas associados as FBGs fabricadas com laser de íons de argônio . . . . .	46
4.4	Caracterização de variação térmica e teste de apagamento sob temperatura extrema . . . . .	47
4.5	Responsividade dos perfis de convolução com redes gêmeas em simulação de sinal AC . . . . .	49
<b>5</b>	<b>Conclusões e trabalhos futuros</b>	<b>54</b>
5.1	Conclusões . . . . .	54
5.2	Trabalhos futuros . . . . .	55
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>57</b>
<b>A</b>	<b>Material complementar do planejamento experimental</b>	<b>61</b>
A.0.1	Amostra 1 . . . . .	61
A.0.2	Amostra 2 . . . . .	61



A.0.3 Amostra 3 . . . . .	61
<b>B Publicações</b>	<b>68</b>
<b>C Manual de operação diário do <i>laser</i> Nd:YAG</b>	<b>91</b>
<b>D Manual de operação diário do <i>laser</i> de Argônio</b>	<b>93</b>

# Lista de Figuras

2.1	Representação esquemática do DCCR de dois fatores. . . . .	5
2.2	a) Fibra óptica monomodo, b) Fibra óptica multimodo de índice de- grau, e c) Fibra óptica multimodo de índice gradual. . . . .	6
2.3	Estrutura de uma fibra óptica com proteções mecânicas. . . . .	7
2.4	Ilustração de uma rede de Bragg com modulação e período constantes, além do comportamento dos espectros refletido e transmitido, dada uma luz de largo espectro incidente. . . . .	8
2.5	Perfil de reflexão típico de uma FBG. . . . .	9
2.6	Representação do FWHM e do SLSR no espectro refletido de uma FBG. . . . .	9
2.7	Espectro típico de uma FBG Tipo I de período uniforme. . . . .	10
2.8	Espectro típico de uma FBG Tipo II. . . . .	11
2.9	Esquema básico de uma fabricação de FBG usando interferômetro. . .	13
2.10	Comportamento do feixe UV incidindo normal à superfície da máscara de fase. . . . .	14
2.11	Representação esquemática de uma FBG fabricada pela técnica ponto a ponto. . . . .	14
2.12	Diagrama esquemático da demodulação por comprimento de onda. . .	15
2.13	Diagrama esquemático da demodulação por redes gêmeas. . . . .	16
2.14	(a) Representação de duas redes de Bragg ideais, com seu respectivo perfil de convolução em (b). . . . .	17
2.15	Esquema experimental proposto por Ouellete e Martin. . . . .	18
2.16	Esquema experimental proposto por Russo <i>et al.</i> . . . . .	18
2.17	Espectro de uma FBG fabricada por Violakis <i>et. al.</i> usando <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	19
3.1	Disposição dos equipamentos usados durante a fabricação de FBGs com o <i>laser</i> de Nd: YAG. . . . .	22
3.2	Micrômetro do eixo x disposto na distância $D_0$ . . . . .	22
3.3	Arranjo experimental com o posicionamento da fibra tensionada por um peso padrão. . . . .	23

3.4	Especificações técnicas da fibra óptica utilizada. . . . .	24
3.5	Alicate decapador de fibra óptica. . . . .	24
3.6	Representação esquemática do aparato para fabricação de FBGs. . . . .	25
3.7	Diâmetro do feixe do <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	25
3.8	Adaptação da largura do feixe do <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	26
3.9	Raias verticais provenientes da incidência do <i>laser</i> de íons de argônio na fibra óptica. . . . .	27
3.10	Aparato para processo de hidrogenação. . . . .	30
3.11	Representação esquemática do teste de deformação mecânica. . . . .	31
3.12	Interface em <i>LABVIEW<sup>TM</sup></i> para simulação de sensoriamento por redes gêmeas. . . . .	32
4.1	Comportamento de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 1 conforme fluência. . . . .	34
4.2	Comportamento de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 2 conforme fluência. . . . .	35
4.3	Comportamento de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 3 conforme fluência. . . . .	35
4.4	Comportamento do FWHM da Amostra 1 conforme fluência. . . . .	36
4.5	Comportamento do FWHM da Amostra 2 conforme fluência. . . . .	37
4.6	Comportamento do FWHM da Amostra 3 conforme fluência. . . . .	37
4.7	Comportamento da refletividade da Amostra 1 conforme fluência. . . . .	38
4.8	Comportamento da refletividade da Amostra 2 conforme fluência. . . . .	39
4.9	Comportamento da refletividade da Amostra 3 conforme fluência. . . . .	39
4.10	Comportamento do SLSR da Amostra 1 conforme fluência. . . . .	40
4.11	Comportamento do SLSR da Amostra 2 conforme fluência. . . . .	41
4.12	Comportamento do SLSR da Amostra 3 conforme fluência. . . . .	41
4.13	Comportamento de $\lambda_{Bragg}$ de FBGs sem hidrogenação conforme deformação mecânica. . . . .	43
4.14	Comportamento de $\lambda_{Bragg}$ de FBGs com hidrogenação conforme deformação mecânica. . . . .	43
4.15	Valores associados ao $\lambda_{Bragg}$ de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	45
4.16	Valores associados ao FWHM de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	45
4.17	Valores associados a refletividade de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	45
4.18	Valores associados ao SLSR de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de Nd:YAG. . . . .	46
4.19	Valores associados ao $\lambda_{Bragg}$ de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	46

4.20	Valores associados ao FWHM de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	47
4.21	Valores associados a refletividade de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	47
4.22	Valores associados ao SLSR de FBGs fabricadas sob mesmas condições no <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	48
4.23	Comportamento das FBGs fabricadas no <i>laser</i> de íons de argônio com base em variação de temperatura. . . . .	48
4.24	Comportamento das FBGs fabricadas no <i>laser</i> Nd:YAG com base em variação de temperatura. . . . .	49
4.25	Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 1. . . . .	50
4.26	Comportamento da função convolução da Simulação 1. . . . .	50
4.27	Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 2. . . . .	51
4.28	Comportamento da função convolução da Simulação 2. . . . .	51
4.29	Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 3. . . . .	51
4.30	Comportamento da função convolução da Simulação 3. . . . .	52
4.31	Amplitude de potência das componentes harmônicas provenientes das simulações. . . . .	53
A.1	Superfície de resposta de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	61
A.2	Superfície de resposta do FHWM da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	62
A.3	Superfície de resposta do SLSR da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	62
A.4	Superfície de resposta da refletividade da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	63
A.5	Superfície de resposta de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	63
A.6	Superfície de resposta do FHWM da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	64
A.7	Superfície de resposta do SLSR da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	64
A.8	Superfície de resposta da refletividade da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	65
A.9	Superfície de resposta de $\lambda_{Bragg}$ da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	65
A.10	Superfície de resposta do FHWM da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	66

A.11 Superfície de resposta do SLSR da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	66
A.12 Superfície de resposta da refletividade da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição. . . . .	67
C.1 Dissipador de calor do <i>laser</i> Nd:YAG. . . . .	92
C.2 Disposição do cristal $2\omega$ do <i>laser</i> Nd:YAG. . . . .	92

# Lista de Tabelas

2.1	Variáveis codificadas de um planejamento DCCR com 2 variáveis independentes. . . . .	5
3.1	Variáveis naturais do DCCR com $E_p$ e $T$ como variáveis independentes.	28
3.2	Fluência do <i>laser</i> Nd:YAG com base nas variáveis do DCCR e sua relação com o tempo de exposição no <i>laser</i> de íons de argônio. . . . .	29
4.1	Faixas de aceitação de cada parâmetro de uma FBG fabricada comercialmente. . . . .	44

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

Descoberta por Hill *et. al.* [1], redes de Bragg em fibras ópticas são amplamente utilizadas para diversas aplicações em sensoriamento, como medição de temperatura [2], tensão mecânica [3], tensão elétrica [4] e corrente elétrica, biossensoriamento [5], entre outros. Em cada uma dessas aplicações, a fibra óptica com rede de Bragg oferece diversas vantagens, como: imunidade a interferência eletromagnéticas, isolamento elétrico, inércia química, multiplexação de vários sensores em uma única fibra óptica, fácil manutenção, pouco peso e compacta [6].

Uma rede de Bragg possui quatro parâmetros fundamentais para sua caracterização (explicitados em mais detalhe na seção 2.3): comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_{Bragg}$ ), largura à meia altura (do inglês *full-width-half maximum* - FWHM), razão de supressão de lóbulos laterais (do inglês *side lobe suppression ratio* - SLSR) e refletividade. Conforme o objeto de aplicação, o conjunto de parâmetros pode necessitar de um comportamento específico, necessitando de empresas especializadas para a fabricação conforme demanda.

Alguns laboratórios no Brasil, devido sua alta demanda por esses sensores, optam por possuir uma infraestrutura que possibilite a fabricação desses sensores, evitando o processo burocrático de importação, já que não há empresas no país com especialidade na fabricação de redes de Bragg.

O Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF), vinculado ao Programa de Engenharia Elétrica da COPPE-UFRJ, possui infraestrutura própria para a fabricação desses sensores, dispondo de duas fontes de radiação ultravioleta (UV) distintas: *laser* pulsado de Nd:YAG e *laser* contínuo de íons de Argônio. Neste trabalho é implementado um planejamento experimental adequado e é avaliado qualitativamente para avaliação das diferenças entre perfis de FBGs fabricados com as duas fontes UV. Além disso, também foram realizados ensaios de deformação

mecânica estática, variações de temperatura e temperatura de apagamento, verificando seu comportamento e estimando incertezas, além de simulações de deformação mecânica no regime dinâmico, objetivando a aplicação em sistemas de redes gêmeas com base em sinais AC.

Sendo assim, é esperado que esta dissertação transforme o conhecimento tácito obtido por usuários do laboratório em conhecimento explícito, de forma que o conhecimento seja cada vez mais aprimorado e difundido, otimizando o uso da infraestrutura do laboratório para a finalidade da fabricação de FBGs com padronização para uso em laboratórios de pesquisa. É almejado contribuir para este viés de pesquisa, interpretando como a alteração dos parâmetros na fabricação de uma rede de Bragg influencia no uso específico de sensoriamento baseado em deformação mecânica estática e comparando qualitativamente seu comportamento, devido a diferentes perfis fabricados.

## 1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é investigar e aprimorar sistematicamente a fabricação de redes de Bragg no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) de forma a guiar futuros usuários do laboratório com a configuração experimental utilizada neste estudo e, em médio prazo, promover o LIF a fornecedor alternativo e nacional de FBGs para outros laboratórios.

Os objetivos específicos visam o estudo dos perfis entre redes de Bragg gêmeas e avaliar como se comportam mediante deformação mecânica estática pré-estabelecida, e averiguar se a fonte de luz UV atuou positiva ou negativamente no perfil da FBG fabricada. Outro objetivo específico foi simular o comportamento de um conjunto de perfis reais de FBGs (fabricadas com as técnicas avaliadas) sob estresse mecânico dinâmico (60 Hz) a fim de explorar a aplicabilidade das FBGs nesse tipo de sensoriamento.

## 1.3 Estruturação do trabalho

Esta dissertação é composta por cinco capítulos e quatro apêndices. O presente Capítulo introduz a problemática estudada e lista os objetivos desejados com esta pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta todo o aporte teórico utilizado para estudo dos sensores, sua fabricação e o planejamento experimental utilizado.

O Capítulo 3 protocola todos os procedimentos experimentais utilizados da fabricação das redes de Bragg ao tratamento de dados.



No Capítulo 4 tem-se os resultados produzidos e as discussões pertinentes aos dados desta pesquisa.

O Capítulo 5 comenta-se sobre as conclusões e sugestões de futuros trabalhos.

No Apêndice A tem-se as superfícies de resposta geradas pelo planejamento experimental.

No Apêndice B está listado os trabalhos publicados provenientes do avanço desta pesquisa.

Nos Apêndices C e D têm-se os manuais de operação dos *lasers* de Nd:YAG e argônio, respectivamente.

# Capítulo 2

## Fundamentos Teóricos

### 2.1 Planejamento experimental

Com a finalidade de averiguar a reprodutibilidade dos parâmetros das FBGs fabricadas, explicitaremos nesta seção definições matemáticas que, ao decorrer do trabalho, embasaram o tratamento e interpretação dos dados gerados.

#### 2.1.1 Experimentos fatoriais em $2^k$

A principal vantagem em aplicar um delineamento experimental é a redução do número de ensaios sem perder informações acerca do comportamento das variáveis envolvidas. O planejamento com base em experimentos fatoriais em  $2^k$  se torna útil neste trabalho por proporcionar a modelagem de superfícies de resposta dados  $k$  fatores submetidos a análise. Este tipo de planejamento também é chamado de delineamento composto central, um dos mais relevantes métodos de modelagem de superfícies em segunda ordem.

#### 2.1.2 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Dadas as variáveis independentes A e B que se deseja avaliar, o delineamento composto central rotacional é representativo se A e B se comportarem nas proximidades do ótimo de cada uma delas [18]. Sejam  $a$  e  $b$  as respostas codificadas das variáveis A e B, respectivamente, a variável resposta  $y$  dada pela alteração dos valores de resposta é dada por:

$$y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \epsilon_{ij} \quad (2.1)$$

Com  $\mu$  sendo a média geral do experimento,  $\alpha_i$  o efeito do  $i$ -ésimo nível da variável A,  $\beta_j$  o efeito do  $j$ -ésimo nível da variável B,  $\gamma_{ij}$  é o efeito de interação entre as variáveis A e B e  $\epsilon_{ij}$  é o erro associado a aleatoriedade dos fatores envolvidos. No caso de

experimentos fatoriais em  $2^2$ ,  $i = 1, \dots, a$  e  $j = 1, \dots, b$  com  $a = b = 1$ . Supondo que A e B possuem níveis codificados sendo alto (+1) e baixo (-1), o DCCR também leva em conta a raiz quadrada entre a soma dos níveis alto e baixo de A e B ( $\pm 1,41$ ) (Figura 2.1). Sendo assim, a varredura de duas variáveis dependerá apenas de 11 observações (Tabela 2.1), sendo o ponto central (0,0) com 3 repetições. Os níveis codificados posteriormente serão representados em unidades naturais das variáveis envolvidas [19].

Após a varredura completa dos parâmetros, uma série de análises é feita e o planejamento sofrerá uma validação (repetição) para verificar a reprodutibilidade e suas incertezas associadas.

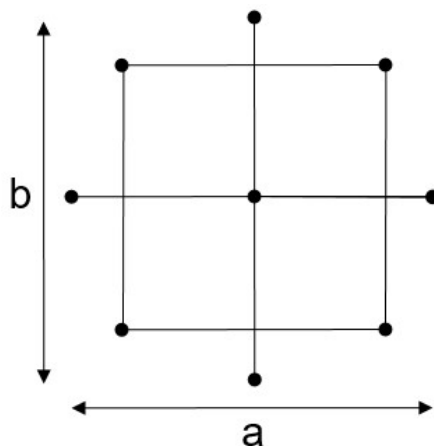


Figura 2.1: Representação esquemática do DCCR de dois fatores.

Tabela 2.1: Variáveis codificadas de um planejamento DCCR com 2 variáveis independentes.

Ensaio	Variável A	Variável B
1	-1	-1
2	1	-1
3	-1	1
4	1	1
5	-1,41	0
6	1,41	0
7	0	-1,41
8	0	-1,41
9	0	0
10	0	0
11	0	0

## 2.2 Fibra óptica

As fibras ópticas são guias de luz com comportamento dielétrico [7]. A luz é transportada no núcleo, com índice de refração  $n_1$ , sendo cercado por uma casca, de mesmo material, mas com índice de refração  $n_2$ , ligeiramente menor. A fibra óptica pode ser classificada conforme diâmetro do núcleo, sendo monomodo ou multimodo, e de índice degrau ou gradual, conforme Figura 2.2. Devido à alta fragilidade da fibra óptica, diversas camadas para proteção mecânica foram desenvolvidas para facilitar seu manuseio, como ilustrado na Figura 2.3. As fibras ópticas oferecem vantagens em relação a outros métodos de sensoriamento [8], como:

- Imunidade eletromagnética;
- Ausência de partes metálicas;
- Quimicamente inerte sob ambientes corrosivos;
- Dimensões compactas e material leve;
- Fácil manutenção, e:
- Multiplexação de diversos sensores em uma única fibra.

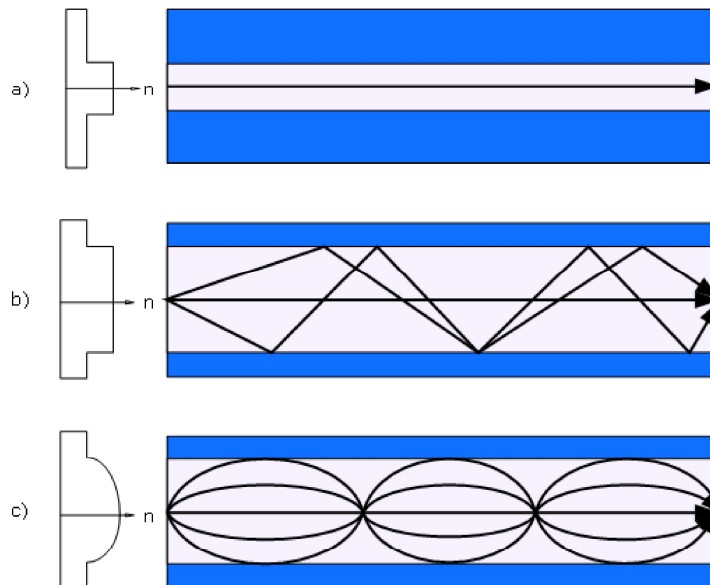


Figura 2.2: a) Fibra óptica monomodo, b) Fibra óptica multimodo de índice degrau, e c) Fibra óptica multimodo de índice gradual.

### 2.2.1 Fotossensibilidade em fibras ópticas

A primeira observação deste fenômeno foi em 1978 [1, 10] com experimentos realizados no Centro Canadense de Pesquisa em Comunicações. Ao irradiar uma fibra

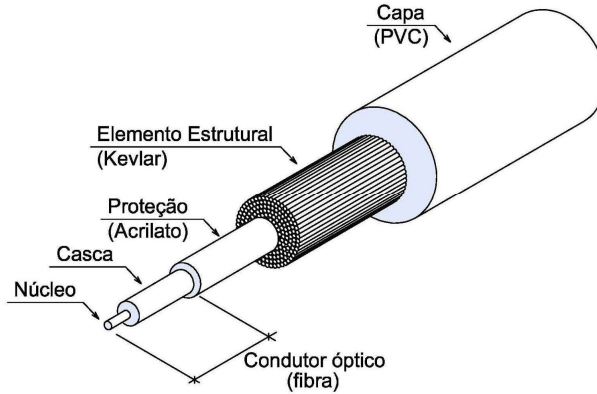


Figura 2.3: Estrutura de uma fibra óptica com proteções mecânicas [9].

óptica de sílica dopada com germânio de forma intensa com um *laser* de íons de argônio (488 nm), o espectro de reflexão aumentou gradativamente até se aproximar ao máximo de intensidade proveniente da fonte de luz usada. Inicialmente apelidado de *hill gratings*, esse fenômeno foi consequência de pesquisas sobre propriedades não-lineares da fibra de sílica dopada com germânio [11]. Seu uso primário foi concentrado em telecomunicações, mas na década de 90 sua utilização foi redirecionada para técnicas de sensoriamento.

Em fibras ópticas com dopagem de 3% de germânio, o índice de refração do núcleo é alterado em torno de  $10^{-5}$  [12]. No entanto, estudos promoveram o enriquecimento da fotossensibilidade de diversas maneiras, dentre elas o carregamento de hidrogênio (hidrogenação) [13], que permite diferença no índice de refração do núcleo da ordem de grandeza de  $10^{-3}$ .

## 2.3 Redes de Bragg em fibras ópticas

Do inglês *Fiber Bragg Grating*, uma FBG é uma modulação periódica no valor do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica. Tal modulação pode ser produzida ao expor as camadas fotossensíveis (núcleo e casca) de uma fibra óptica a um padrão de interferência na região espectral do ultravioleta. Pela lei de Bragg (Equação 2.2) [12, 14, 17], ao incidirmos um sinal luminoso em uma fibra óptica com esta modulação, o padrão de interferência construtiva entre os planos modulados com distância  $d$  reflete uma banda espectral estreita e de comprimento de onda bem definido.

$$2d \sin \theta = n \lambda \quad (2.2)$$

Em seu modo mais simples, uma FBG fabricada em uma fibra óptica monomodo tem sua modulação constante e feita perpendicularmente à direção da propagação lumi-

nosa. Portanto, a Equação 2.2 se reduz a um caso particular, conforme Equação 2.3 e Figura 2.4.

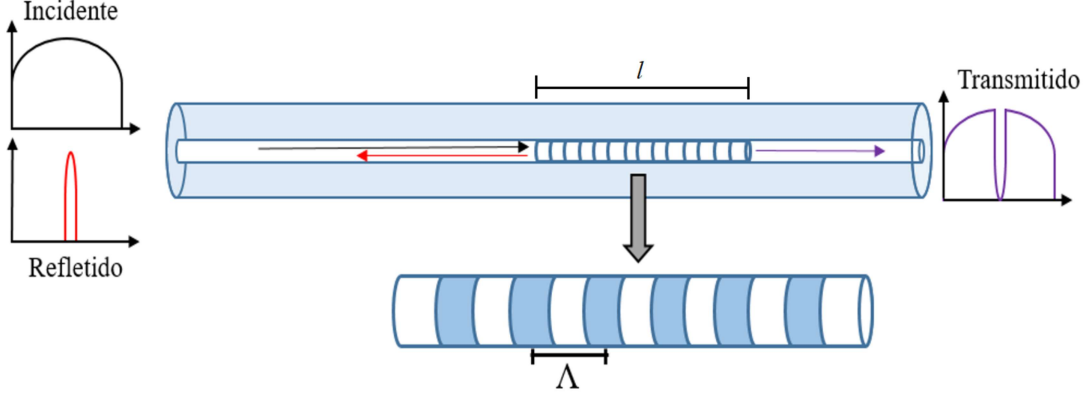


Figura 2.4: Ilustração de uma rede de Bragg com modulação e período constantes, além do comportamento dos espectros refletido e transmitido, dada uma luz de largo espectro incidente.

$$\lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (2.3)$$

onde  $\lambda_{Bragg}$  é o comprimento de onda central da banda espectral refletida após a inscrição do sensor,  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do núcleo, dado um modo de propagação, e  $\Lambda$  é a periodicidade da mudança de valor no índice de refração.

Considerando uma fibra óptica com índice de refração do núcleo  $n_0$ , o comportamento de  $n$  pode ser escrito como:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (2.4)$$

onde  $\Delta n$  é a amplitude da perturbação no valor do índice de refração do núcleo, e  $z$  é a distância no eixo longitudinal da fibra. Da Equação 2.4 observa-se que perfis mais extensos ao longo de  $z$  resultam em mais planos de refração e em maior refletividade, dada pela Equação 2.5

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (2.5)$$

com  $R(l, \lambda)$  dependente do comprimento  $l$  da grade de Bragg e do comprimento de onda  $\lambda$ ,  $\Omega$  é o coeficiente de acoplamento,  $\Delta k$  é o vetor de onda dessintonizador, e  $s^2 = \omega^2 - \Delta k^2$ . Especificamente em  $\lambda_{Bragg}$ ,  $\delta k = 0$ , portanto a refletividade máxima de uma FBG é dada por:

$$R(l, \lambda_{Bragg}) = \tanh^2(\Omega l) \quad (2.6)$$

Nota-se que a refletividade é diretamente proporcional ao comprimento  $l$  e ao au-

mento da diferença entre os índices de refração dos planos de refração e do núcleo. Um comportamento típico da refletividade de uma FBG se encontra na Figura 2.5.

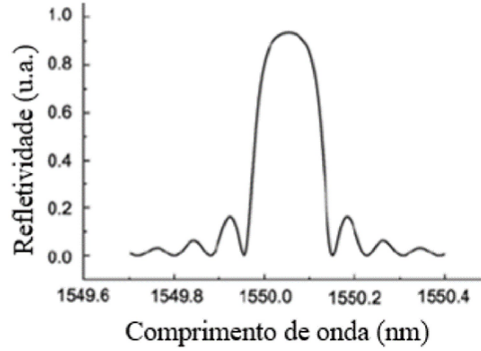


Figura 2.5: Perfil de reflexão típico de uma FBG.

A presença de lóbulos laterais é proveniente de reflexões das extremidades da grade inscrita. Um parâmetro que mensura a grandeza desses lóbulos com relação à potência em  $\lambda_{Bragg}$  é a razão de supressão de lóbulos laterais (*side lobe suppression ratio* - *SLSR*, em inglês), dado pela diferença em decibéis entre o pico principal e o maior lóbulo lateral, como na Figura 2.6.

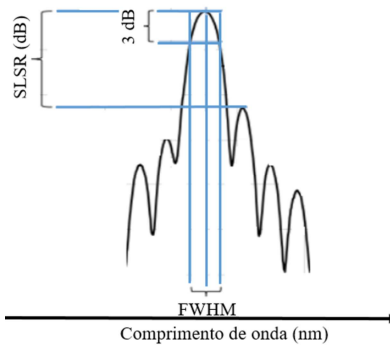


Figura 2.6: Representação do FWHM e do SLSR no espectro refletido de uma FBG.

Outro parâmetro a ser observado em fabricações de FBGs é a largura à meia altura, ou *full-width-half maximum* (FWHM), matematicamente descrita pela Equação 2.7:

$$\Delta\lambda = \lambda_{Bragg} s \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{N}\right)^2} \quad (2.7)$$

com  $N$  sendo o número de planos inscritos. Já  $s$  varia entre 0,5 e 1 e depende diretamente da refletividade. Este fator indica a largura do espectro refletido da FBG na metade da potência luminosa refletida (ou 3 dB abaixo do pico principal em escala logarítmica). A ilustração do SLSR e do FWHM localizados num espectro de reflexão se encontram na Figura 2.6.

### 2.3.1 Tipos de FBGs

A grade de Bragg a ser formada depende diretamente das condições de inscrição, como tipo de laser (contínuo ou pulsado), comprimento de onda da radiação UV e potência do laser, além das propriedades da própria fibra óptica. A literatura classifica as FBGs em três tipos [12, 14]:

#### FBG Tipo I

As FBGs consideradas do tipo I são formadas em fibras fotossensíveis normais e sob intensidade moderada de energia UV. O comportamento espectral de FBGs desse tipo se encontra ilustrado na Figura 2.7. Verifica-se que os espectros refletido e transmitido são complementares. Algumas metodologias de fabricação deste tipo de FBG são expostas na Seção 2.4 deste capítulo.

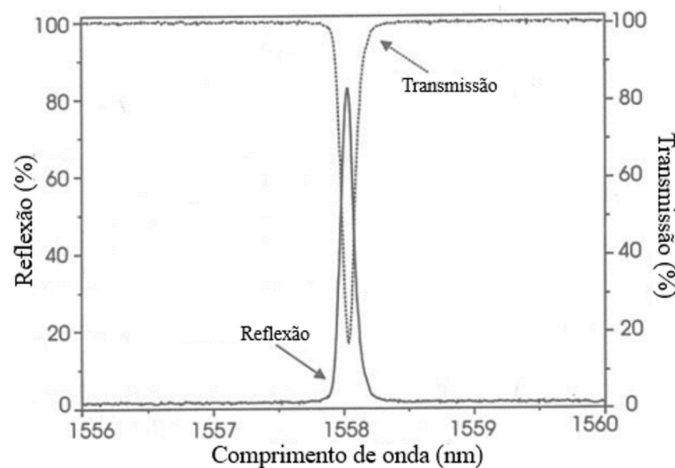


Figura 2.7: Espectro típico de uma FBG Tipo I de período uniforme (adaptado de [12]).

#### FBG Tipo IIA

As FBGs do tipo IIA possuem o mesmo comportamento espectral das FBGs tipo I, porém com mais complexidade em sua fabricação. A fabricação baseia-se em danos físicos na estrutura da fibra óptica com energia em torno de 30 mJ e pulso único. A FBG resultante tende a ter um espectro de reflexão mais irregular devido a concentrações de calor do feixe UV.

#### FBG Tipo II

O espectro de FBGs do tipo II diferem bastante dos do tipo I e IIA (Figura 2.8) e possui modulação periódica do índice de refração menor do que do tipo I. São fabricadas sob alta energia (acima de 0,5 J/pulso) e com um único pulso de *lasers*



do tipo excímero (energia proveniente da combinação de um gás nobre com um gás reativo). FBGs desse tipo suportam até 1000 °C por um certo tempo (4 horas) antes de apagar a inscrição[12].

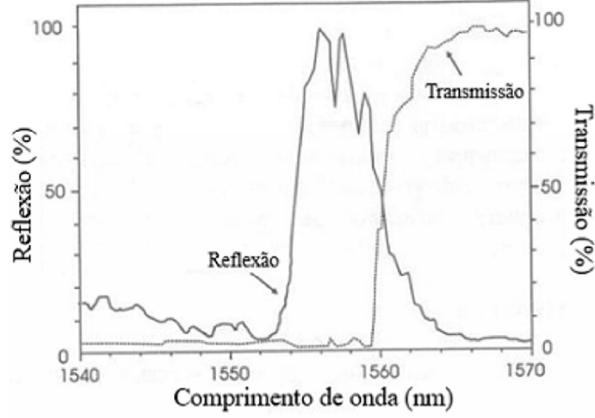


Figura 2.8: Espectro típico de uma FBG Tipo II (adaptado de [12]).

### 2.3.2 Sensibilidade de uma FBG a deformação mecânica e temperatura

O índice de refração efetivo  $n_{eff}$ , assim como o espaço entre os planos de modulação  $\Lambda$  são diretamente afetados por deformação mecânica longitudinal e temperatura. Derivando parcialmente a Equação 2.3 com relação a temperatura, tem-se:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta T} = 2n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \quad (2.8)$$

Substituindo a Equação 2.3 na Equação 2.8,

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta T} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \lambda_{Bragg} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \lambda_{Bragg} \quad (2.9)$$

Rearranjando os termos, tem-se:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \Delta T + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Delta T \quad (2.10)$$

O primeiro termo da equação refere-se ao coeficiente de expansão térmica da sílica, chamado de  $\alpha$  e o segundo termo representa o coeficiente termo-óptico do material, renomeado como  $\eta$ .

Com isso, o comportamento da FBG quando submetida a variações de temperatura obedece a Equação 2.11.

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2.11)$$

A contribuição de deformação mecânica também pode ser calculada ao derivar a Equação 2.3 com relação ao deslocamento longitudinal:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta L} = 2n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} + 2\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \quad (2.12)$$

Substituindo a Equação 2.3 na Equação 2.12:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} \Delta L + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \Delta L \quad (2.13)$$

Pode-se dividir a Equação 2.13 pelo comprimento da FBG ( $L_{FBG}$ ):

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg} L_{FBG}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial L} \frac{\Delta L}{L_{FBG}} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} \frac{\Delta L}{L_{FBG}} \quad (2.14)$$

Denominando de  $\epsilon$  a razão entre a variação do comprimento do sensor sobre seu comprimento inicial, pode-se substituir na Equação 2.14, que resulta em:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \frac{\partial\Lambda}{\Lambda} \frac{L_{FBG}}{\partial L} \epsilon + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial L} L_{FBG} \epsilon \quad (2.15)$$

Rearranjando, tem-se:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = \frac{(\partial\Lambda)/\Lambda}{(\partial L/L_{FBG})} \epsilon + \frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{(\partial L/L_{FBG})} \epsilon \quad (2.16)$$

O primeiro termo da Equação 2.16 refere-se à dilatação das grades e da FBG em si. Como os dois fenômenos se encontram no mesmo local da fibra óptica, o valor dessas derivadas são iguais entre si. O segundo termo é referente ao coeficiente fotoelástico da fibra óptica, também chamado de  $\rho_e$ . A Equação 2.16 é reduzida aos termos:

$$\frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\lambda_{Bragg}} = (1 - \rho_e) \epsilon \quad (2.17)$$

Sendo assim, os efeitos inerentes a FBG descritos pelas Equações 2.11 e 2.17 se comportam linearmente. Para fibra de sílica dopada com germânio:  $\rho_e = 0,22$ ,  $\alpha = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\eta = 8,6 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

Substituindo essas constantes nas Equações 2.11 e 2.17, para  $\lambda_{Bragg}$  próximo a 1550 nm, a resposta para esses efeitos correspondem a 1,2 pm/ $\mu\epsilon$  e 14,2 pm/ $^\circ\text{C}$ . A literatura indica que FBGs usuais (Tipo I) conseguem suportar até aproximadamente 600  $^\circ\text{C}$  quando não hidrogenadas, e até 1000  $^\circ\text{C}$  quando sofrem hidrogenação [15].

## 2.4 Técnicas de fabricação de FBGs

### 2.4.1 Gravação interna

Este método de inscrição contribuiu para a descoberta da fotossensibilidade em fibras ópticas. Como o processo funciona somente no comprimento de onda de excitação do laser usado na inscrição, a modulação no índice de refração é pequena, só tendo refletividade considerável caso a grade de Bragg possua dezenas de centímetros de comprimento.

### 2.4.2 Gravação externa

#### Interferometria

Foi a primeira técnica surgida após a gravação interna [16]. Conhecida também por Método Holográfico Transverso, consiste na interferência entre dois feixes UV (Figura 2.9) com alta coerência espacial e temporal. Nesta técnica de inscrição pode-se alterar o  $\lambda_{Bragg}$  de acordo com o tamanho dos braços do interferômetro. As características da fonte UV escolhida também se relacionam com a FBG fabricada nesta modalidade.

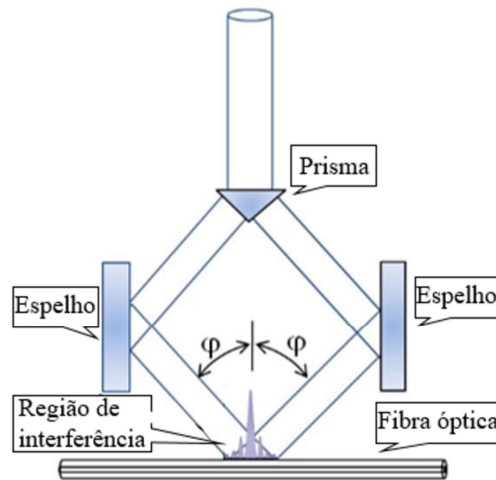


Figura 2.9: Esquema básico de uma fabricação de FBG usando interferômetro (adaptado de [8]).

#### Máscara de fase

Amplamente utilizada hoje, é o método mais eficiente para fabricação de FBGs. A máscara de fase (Figura 2.10) constrói um padrão de difração devido às suas ranhuras e imprime um padrão de interferência na região fotossensível da fibra óptica [12]. Fontes UV que não possuem alta coerência de feixe podem ser úteis para fabricação de FBGs ao utilizar uma máscara de fase, já que não há necessidade de modificar o caminho ótico do feixe. Diferente da técnica de interferometria, o  $\lambda_{Bragg}$

não pode ser alterado, a não ser que se tracione a fibra óptica ao ser inscrita, ou que se troque a máscara de fase. A relação entre o espaçamento entre as grades da máscara de fase  $\Lambda_{pm}$  e  $\lambda_{Bragg}$  é dada pela Equação 2.18:

$$\Lambda_{pm} = \frac{N\lambda_{Bragg}}{n_{eff}} \quad (2.18)$$

com  $N \geq 1$  inteiro e indica a ordem do período da grade.

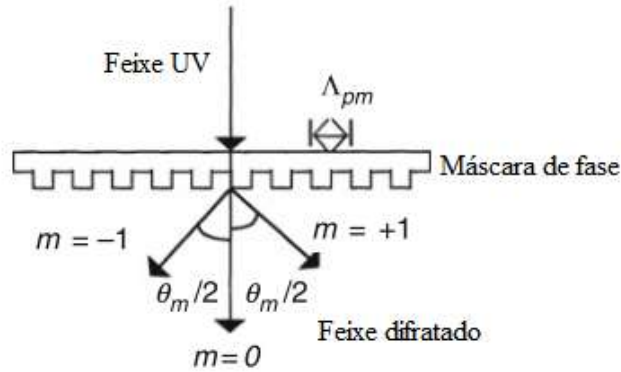


Figura 2.10: Comportamento do feixe UV incidindo normal à superfície da máscara de fase (adaptado de [17]).

### Ponto a ponto

Técnica também utilizada para fabricação de grades de longo período (*long-period gratings*), a técnica ponto a ponto é caracterizada pela construção de um único plano de interferência por incidência de luz UV. O espaçamento entre os planos de interferência é determinado pelo próprio usuário e a fibra a ser inscrita se move por uma plataforma para que o plano seguinte seja inscrito (Figura 2.11).

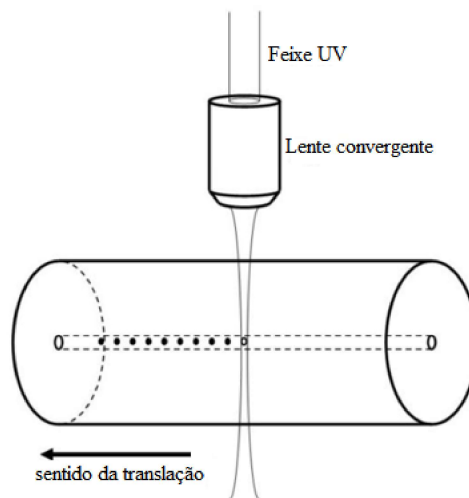


Figura 2.11: Representação esquemática de uma FBG fabricada pela técnica ponto a ponto.

## 2.5 Técnicas de interrogação de FBGs

Nesta seção introduziremos o estado da arte das técnicas de interrogação encontradas na literatura, com ênfase nas metodologias usando redes gêmeas.

### 2.5.1 Demodulação por comprimento de onda

Neste tipo de demodulação, o ato de interrogar mede diretamente o valor de  $\lambda_{Bragg}$  da FBG utilizada e seu comportamento quando está sob influência de algum fenômeno externo mensurável. Um diagrama esquemático utilizado neste tipo de interrogação se encontra na Figura 2.12. Basicamente, uma fonte de banda larga (como um *Amplified Spontaneous Emission* - ASE, por exemplo) incide na FBG e o espectro refletido é encaminhado pela porta 3 do circulator óptico para um OSA (*Optical Spectrum Analyzer*). Mesmo sendo uma técnica de fácil implementação, esta modalidade de demodulação não é adequada para detecção de pequenas variações de comprimento de onda (<50 pm), principalmente em situações de alta frequência, como em ambientes sob vibração.

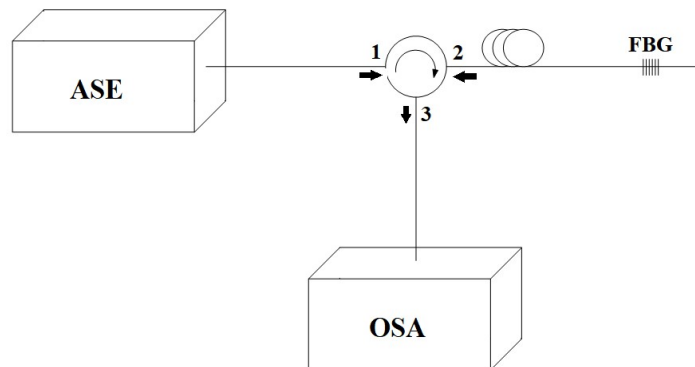


Figura 2.12: Diagrama esquemático da demodulação por comprimento de onda.

### 2.5.2 Demodulação por filtros sintonizáveis

A utilização de redes de Bragg para sensoriamento pode ser feita aproveitando diversos meios de sintonização, como filtro Fabry-Perot. No trabalho de Assumpção Ribeiro *et. al.* [20], os autores propuseram um algoritmo de otimização para aquisição do sinal de saída gerado quando a FBG sofre deformação mecânica proveniente de um sinal de alta tensão aplicado em cerâmicas tipo PZT. É importante atentar que o FWHM da FBG foi um fator determinante para a otimização proposta.

Em geral, a demodulação por filtros sintonizáveis, além de possuírem custo de implementação alto, dependem de que o FWHM da FBG seja igual ou maior que a variação total em  $\lambda_{Bragg}$  quando submetido a variações do mensurável em questão [21].

### 2.5.3 Demodulação por redes de Bragg gêmeas

No sensoriamento com redes de Bragg gêmeas, uma das FBGs é o sensor submetido ao fenômeno mensurável, enquanto outra FBG atua como um filtro fixo de sinal, em alguns casos, inerte a efeitos do mensurado [? ]. Para que as FBGs sejam consideradas gêmeas, os dois  $\lambda_{Bragg}$  devem estar próximos entre si. Uma montagem experimental exemplificando este tipo de demodulação se encontra na Figura 2.13.

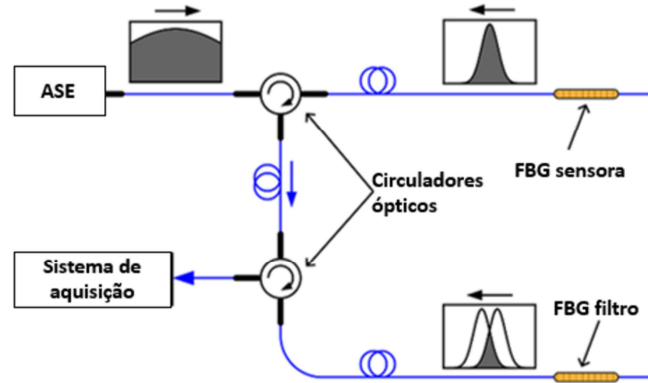


Figura 2.13: Diagrama esquemático da demodulação por redes gêmeas (adaptado de [22]).

A interrogação se baseia na região de interseção entre os dois perfis de reflexão, que matematicamente é representada pela convolução entre os dois perfis [? ]. Sendo duas funções contínuas  $g(x)$  e  $f(x)$ , a convolução é dada pela Equação 2.19.

$$g(x) * f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) * f(x - \tau) d\tau \quad (2.19)$$

Em termos práticos, o valor da área de interseção entre os espectros de reflexão das FBGs se altera conforme a FBG sensora tem seu  $\lambda_{Bragg}$  alterado, conforme influência de deformação mecânica longitudinal [23]. Neste contexto, a curva de convolução ideal é dada pela interseção de dois perfis de reflexão idealmente quadrados, ilustrado na Figura 2.14. Como não se tem na prática perfis ideais de FBGs, surge a necessidade da obtenção de FBGs com perfis que mais se aproximam do ideal para esse tipo de técnica de demodulação. Percebe-se a vantagem da utilização de redes gêmeas em sensoriamento envolvendo sinais dependentes do tempo, como sinais AC.

A região de interseção entre as redes de Bragg (ou entre a rede e o filtro utilizado, como exemplificamos anteriormente) deve possuir preferencialmente um comportamento linear [24–27] no entorno do ponto de operação (ponto em vermelho na Figura 2.14(b), o que chama a atenção para o estudo do perfil das FBGs usadas neste tipo de demodulação. Percebe-se então que sensores com perfis mais abruptos (menor FWHM) [12] e sem lóbulos laterais são os mais favoráveis para esse tipo de medida, embora a faixa de operação seja reduzida devido à consequente redução da

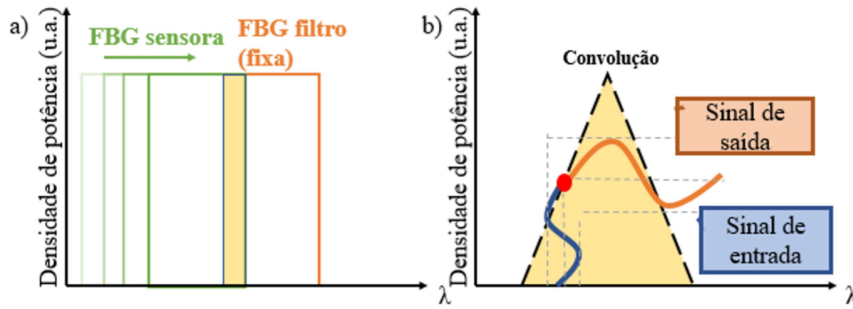


Figura 2.14: (a) Representação de duas redes de Bragg ideais, com seu respectivo perfil de convolução em (b).

faixa de operação da FBG sensora devido ao FWHM mais estreito da FBG filtro.

As vantagens de se utilizar redes gêmeas para a modulação envolvem tanto a simplificação da montagem experimental quanto a redução de custos. O uso de redes gêmeas também promove um aumento de acurácia na aquisição de dados, em comparação às técnicas de interrogação que usam equipamentos comerciais, embora não seja possível recuperar o espectro de reflexão ou transmissão de uma dada FBG com esse tipo de demodulação.

## 2.6 Fabricação de FBGs com *lasers* de Nd:YAG e íons de Argônio

Nesta seção se encontra uma breve revisão sobre a fabricação de FBGs, especificamente com os *lasers* de Nd:YAG e íons de Argônio. O detalhamento sobre essas fontes de luz se encontram nas seções 3.2.1 e 3.2.2 desta dissertação.

### 2.6.1 Fabricação com *laser* de Nd:YAG

A primeira tentativa de uso do *laser* de Nd:YAG para fabricação de FBGs foi publicada em 1994 por Ouellette e Martin [28]. Além da prévia hidrogenação, para aumentar a refletividade os autores implementaram uma plataforma translacional. Após 1 min de incidência com 200 mW, o resultado foi uma FBG de comprimento total de 1,5 cm e refletividade de 98,5%. O arranjo experimental se encontra ilustrado na Figura 2.15.

No ano de 2011, dois trabalhos [29, 30] divulgaram a implementação de um sistema de inscrição de FBGs usando esse *laser* em seus respectivos laboratórios.

No trabalho de Russo *et al* [29], o aparato experimental é composto conforme Figura 2.16. Percebe-se o uso de uma lente cilíndrica antes de incidência da radiação UV na máscara de fase, no intuito de incidir mais energia na seção transversal da fibra.

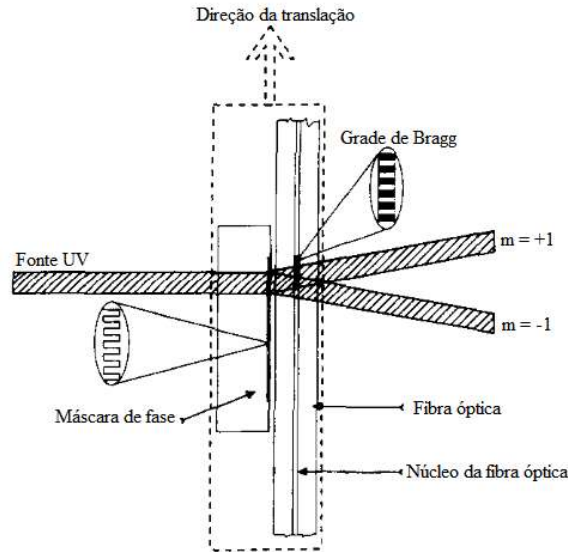


Figura 2.15: Esquema experimental proposto por Ouellete e Martin (adaptado de [28]).

Os autores citaram a presença de muitos lóbulos laterais e propuseram o processo de apodização, um tratamento pós-fabricação que reduz os lóbulos laterais sem perdas de potência no comprimento de onda de Bragg. As FBGs tiveram um tempo de inscrição variando entre 10 min e 15 min de exposição, dependendo da energia média do pulso usado em cada caso. Os resultados indicam que houve uma repetibilidade no processo de fabricação, embora não deixe explícito os parâmetros utilizados.

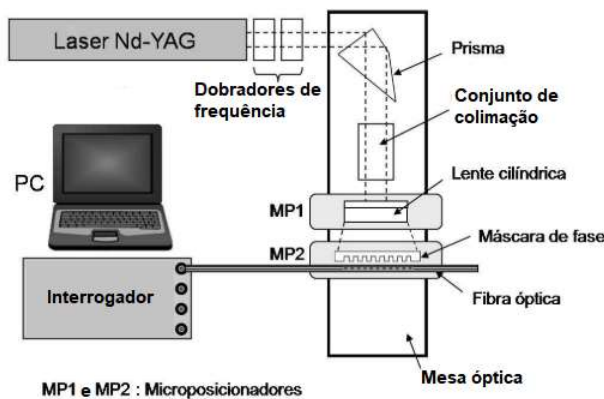


Figura 2.16: Esquema experimental proposto por Russo *et. al.* (adaptado de [29]).

No trabalho de Rodríguez *et. al.* [30], o aparato experimental foi proposto sem nenhuma alteração no caminho ótico da fonte UV e com a técnica de máscara de fase. Foi observado tempos diferentes de exposição e como isso alterou o espectro de transmissão da FBG inscrita sem prévia hidrogenação. Os autores concluíram que o máximo de transmitância possível neste estudo foi de 25% para uma incidência de 40 mJ por pulso a uma taxa de 20 Hz durante 10 min.



O *laser* de Nd:YAG é utilizado também para fabricação de TFBGs (do inglês *tilted fiber Bragg grating*), redes de Bragg fabricadas com uma angulação com relação a direção das grades da máscara de fase [31]. *Lasers* com menor coerência são preferíveis para fabricação de TFBGs por proporcionar a inscrição de mais grades, potencializando a interação do campo evanescente com o meio externo, fenômeno útil para certas aplicações.

## 2.6.2 Fabricação com *laser* de íons de Argônio

O *laser* de íons de argônio está presente desde a descoberta de sensores baseados em redes de Bragg [1]. Mesmo com décadas de pesquisa dedicadas a esse assunto, ainda hoje a literatura cita o uso desse *laser*, mas propondo mudanças na fibra óptica utilizada, como no trabalho de Limberger *et al* [32]. Na ocasião, os autores propuseram a fabricação de FBGs em fibras dopadas com germânio, mas sem hidrogenação. O processo foi facilitado devido às especificações de fibra, com 9  $\mu\text{m}$  de diâmetro de núcleo e apenas 40  $\mu\text{m}$  de diâmetro da casca. Foi fabricada uma FBG sem lóbulos laterais e com refletividade em torno de 10%, com comprimento da grade de 0,6 mm e intensidade de trabalho do *laser* de 401 kJ/cm<sup>2</sup>.

Já no trabalho de Violakis *et. al.* [33] foi demonstrado que, além da dopagem com germânio e a hidrogenação prévia, a dopagem com bismuto e alumínio (Bi-Al) proporcionou a fabricação de FBGs de alta refletividade. Como ilustrado na Figura 2.17, os autores fabricaram uma FBG de 1,4 mm com 97% de refletividade. Foi usada uma lente cilíndrica para concentração de energia do feixe UV e a técnica de fabricação foi a máscara de fase.

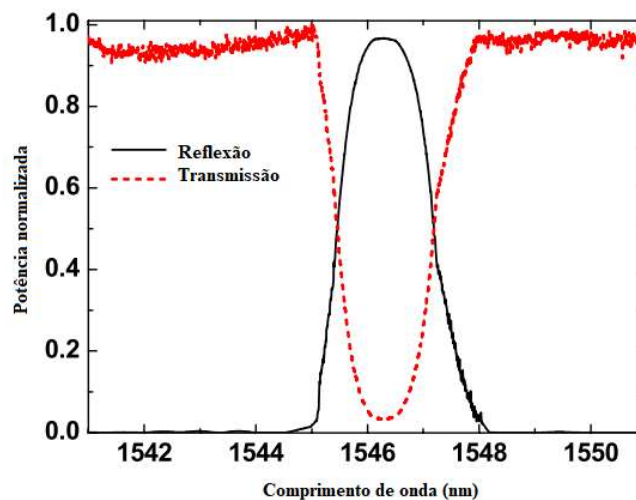


Figura 2.17: Espectro de uma FBG fabricada por Violakis *et al* usando *laser* de íons de argônio (adaptado de [33]).

Já no trabalho publicado em 2014 por Violakis *et. al.* [34], foi proposta uma

comparação entre o *laser* de íons de argônio e o *laser* excímero de ArF, levando em conta a variação da concentração do dopante Bi-Al e como as FBGs se comportam em altas temperaturas.

# Capítulo 3

## Metodologia e Materiais

### 3.1 Premissas experimentais

Como a tecnologia de fabricação de FBGs é muito ampla e os aparatos experimentais envolvendo óptica livre possui complexidades na montagem e operação, definimos previamente os parâmetros ambientais que se manteriam aproximadamente fixos, com a finalidade de eliminar variáveis que eventualmente pudessem alterar os resultados dos experimentos.

Sabemos que a temperatura influencia no  $\lambda_{Bragg}$  da FBG fabricada. Sendo assim, mantivemos a mesma máscara de fase em todo o processo, e estabelecemos uma temperatura ambiente média da sala de fabricação com o *laser* Nd:YAG de  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$  e da sala de fabricação com o *laser* de íons de argônio de  $(22 \pm 1)^\circ\text{C}$ .

Com a disposição experimental dos equipamentos no aparato com o *laser* de Nd:YAG (Figura 3.1), determinamos a menor distância entre o trecho de fibra a ser inscrito e a máscara de fase sem que houvesse um excesso de tensão longitudinal ao posicionarmos a fibra (Figura 3.2). A *distância zero* no parafuso micrométrico do eixo x em todo espaço amostral de sensores fabricados foi  $D_0 = (0,5000 \pm 0,0002)\text{cm}$  e com a fibra totalmente em contato com a face da máscara de fase.

Eliminamos também variações de posição dos aparatos experimentais, não retirando os suportes da fibra e não movendo a máscara de fase desde o início do processo experimental. De toda forma, o fato de não medirmos o ângulo entre o trecho de fibra e a máscara de fase pode ocasionar a ocorrência de lóbulos laterais na FBG fabricada.

Além disso, a força longitudinal no trecho de fibra também foi estimada e padronizada. Ao fixarmos as extremidades do trecho de fibra óptica para a gravação do sensor, colocamos uma massa fixa  $m = (17,870 \pm 0,005)\text{g}$  composta por um ímã e uma pequena barra metálica. Houve a necessidade de adequar o conjunto de suporte da fibra para que o peso aplicado não danificasse a fibra pelo excesso

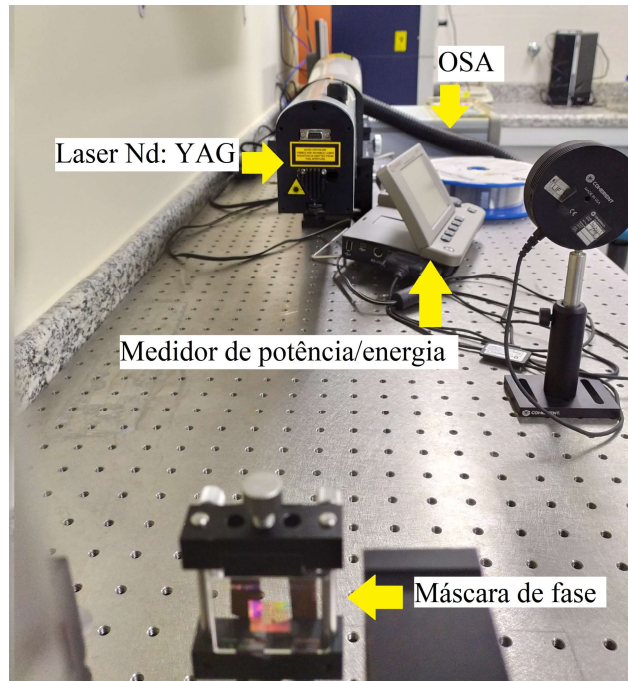


Figura 3.1: Disposição dos equipamentos usados durante a fabricação de FBGs com o *laser* de Nd: YAG.

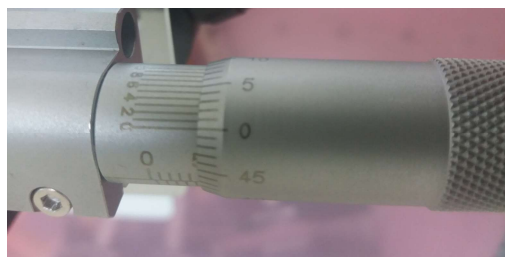


Figura 3.2: Micrômetro do eixo x disposto na distância  $D_0$ .

de curvatura. Fabricamos em uma impressora 3D um cilindro que suavizava a curvatura da fibra óptica, mantendo o peso aplicado estável e sem danos ao caminho óptico (Figura 3.3). Os posicionadores da Thorlabs garantem que a fibra óptica esteja igualmente posicionada por ter um chanfro que se encaixa na fibra óptica de acordo com seu diâmetro.

Na disposição experimental dos suportes ópticos na fabricação de FBGs com *laser* de íons de argônio, tanto a distância entre a fibra e a máscara de fase quanto a tensão longitudinal da fibra colocada no suporte foram ajustados manualmente durante todo o processo de fabricação, sem que houvesse padronização na tensão longitudinal, devido a dificuldade de posicionamento da fibra óptica na incidência do feixe *laser*, que possui diâmetro do feixe pequeno (3 mm), em comparação ao diâmetro do feixe do *laser* de Nd:YAG (9 mm).

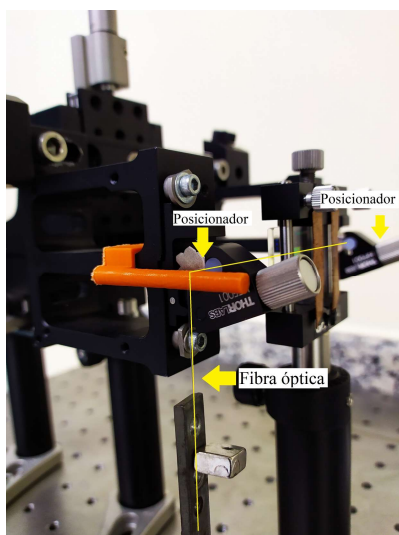


Figura 3.3: Arranjo experimental com o posicionamento da fibra tensionada por um peso padrão.

## 3.2 Fabricação de FBGs no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF)

Nesta seção detalharemos toda a infraestrutura utilizada para fabricação de redes de Bragg no que tange os objetivos deste trabalho.

A fibra óptica utilizada foi o modelo Fibercore SM1500(4,2/125) (Figura 3.4). Em cada tentativa de fabricação do sensor, retiramos mecanicamente o revestimento de acrilato com o auxílio de um alicate decapador Clauss®CFS-2 (Figura 3.5), restando apenas o núcleo e a casca expostos para a incidência de radiação UV, com 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro total. A região sem acrilato não é precisamente medida, mas em todo processo retiramos comprimento igual ou ligeiramente maior (entre 10 mm e 12 mm) do que a extensão da máscara de fase.

As máscaras de fase são da fabricante Ibsen Photonics. As duas possuem comprimento de onda preferencial de 244 nm, mas em cada aparato houve uma máscara de fase com espaçamento entre grades diferente: 1052,40 nm no aparato com Nd:YAG, resultando em um comprimento de onda de Bragg em torno de 1535,3 nm; e 1063,26 nm com comprimento de onda de Bragg em torno de 1551,5 nm.

O circulador óptico escolhido para o acoplamento entre os componentes optoeletrônicos foi adquirido da empresa Optolink com faixa de operação em 1550 nm. A fonte de luz usada para incidência na fibra óptica foi um SLED da fabricante DenseLight com comprimento de onda central de 1543,7 nm e FWHM de 44,8 nm.

O analisador de espectro óptico usado durante o processo de fabricação foi o OSA Thorlabs 202C, com largura espectral de luz entre 600-1700 nm. Sua principal finalidade na tomada de dados é a determinação de  $\lambda_{Bragg}$  e o posterior cálculo de

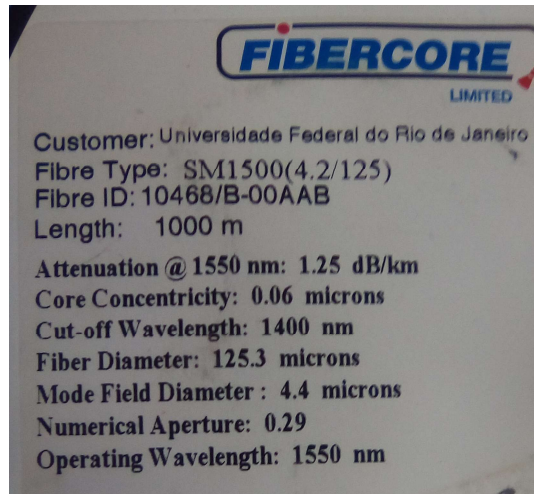


Figura 3.4: Especificações técnicas da fibra óptica utilizada.



Figura 3.5: Alicate decapador de fibra óptica.

refletividade dos sensores. Já a determinação do FWHM e do SLSR são fornecidos pelo interrogador SM125 da fabricante Micron Optics. Seu uso na análise dos dados desta dissertação é de suma importância, já que a interrogação na aplicação dos sensores é usualmente feita por este equipamento.

O diagrama esquemático dos equipamentos utilizados na fabricação de FBGs nas duas fontes UV se encontra na Figura 3.6, que é composto de: 1) Fonte UV, 2) Máscara de fase, 3) Cordão de fibra óptica, 4) Circulador óptico, 5) Fonte de luz, 6) Analisador de espectro e 7) Computador. Previamente ao posicionamento da fibra sem acrilato no suporte com parafusos micrométricos, limpamos com álcool isopropílico para que não incida sujeiras na máscara de fase. O início da inscrição na fibra óptica se dá retirando o medidor de energia do caminho óptico do *laser* UV, e daí monitoramos o tempo de exposição. Dado fim a gravação da FBG, cortamos o sensor fabricado e reposicionamos um novo trecho na face da máscara de fase. Este procedimento prévio se dá de forma análoga mesmo quando a fibra se encontra hidrogenada.

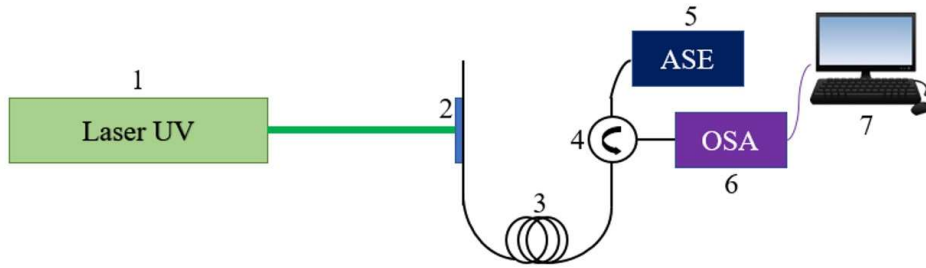


Figura 3.6: Representação esquemática do aparato para fabricação de FBGs.

### 3.2.1 Inscrição com *laser* pulsado de Nd:YAG

O *laser* Nd:YAG (*Neodymium-doped yttrium aluminum garnet*) é um *laser* de estado sólido com comprimento de onda fundamental na região do infravermelho. O modelo utilizado nessa pesquisa é da fabricante Quantel modelo Q-Smart 850 mJ, com comprimento de onda fundamental de 1064 nm. Para alcançarmos o ultravioleta, acoplamos dois dobradores de frequência ( $2\omega$  e  $4\omega$ ), resultando num comprimento de onda de 266 nm.

Nos primórdios dos estudos que culminou nesta dissertação, a ideia era redimensionar o feixe do *laser* para que a irradiação fosse mais efetiva no trecho de fibra óptica. A Figura 3.7 mostra a largura do feixe sem intervenções, medido por um papel fotossensível, medindo  $(0,9 \pm 0,1)$  cm.

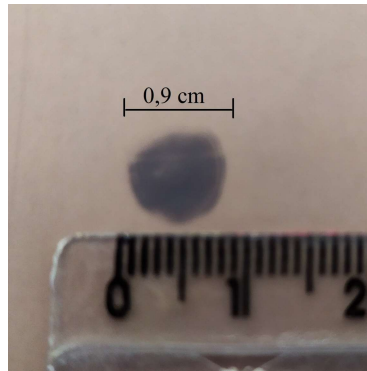


Figura 3.7: Diâmetro do feixe do *laser* de Nd:YAG.

Pelo fato das lentes não possuírem nenhum recobrimento que proporcionasse o uso em *lasers* pulsados, mesmo com baixa energia houve dano em uma das lentes cilíndricas devido ao excesso de concentração do feixe de luz. Por questões de avanço nos experimentos, decidimos não prosseguir com o redimensionamento do feixe desta forma. Adaptamos a largura do feixe *laser* com o auxílio de duas placas de cobre e colocamos afixadas na frente da máscara de fase (Figura 3.8), com abertura de  $(0,7 \pm 0,1)$  cm, ligeiramente menor que a largura total da máscara de fase, que é de 1 cm.

Os parâmetros do *laser* se mantiveram em *default*, exceto o Fl-Qs Dly, que

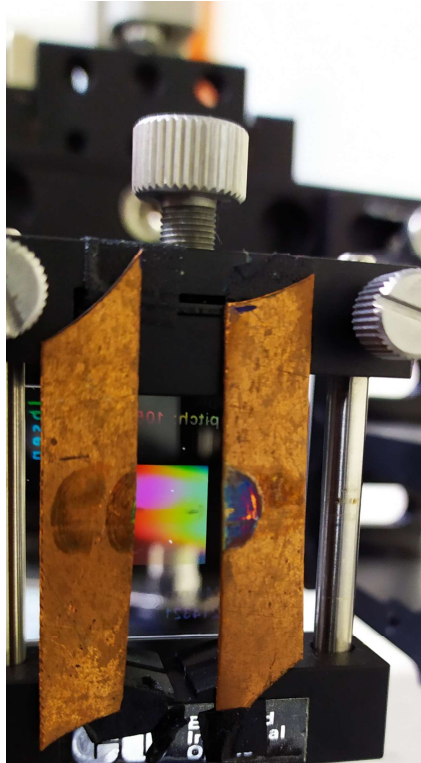


Figura 3.8: Adaptação da largura do feixe do *laser* de Nd:YAG.

determina o tempo de abertura de cada pulso, dada a taxa de repetição fixa de 10 Hz. A modificação do Fl-Qs Dly é um dos parâmetros que capacita o operador a determinar a energia de saída do *laser*, sendo o menor valor ( $215 \mu\text{s}$ ) que retorna a máxima energia (aproximadamente 100 mJ em 266 nm). Uma forma alternativa de alteração da energia de forma controlada é a variação do potenciômetro localizado na parte superior do dobrador de frequência  $4\omega$ , mantendo a abertura do pulso do *laser* em  $215 \mu\text{s}$ .

O procedimento básico de operação do *laser* se encontra descrito no Apêndice C.

### 3.2.2 Inscrição com *laser* contínuo de íons de Argônio

O *laser* de íons de Argônio é um *laser* de estado gasoso que contém todas as raias de emissão do Argônio, mas a raia de interesse é o azul (488 nm) acoplado com cristal dobrador de frequência, produzindo um comprimento de onda resultante de 244 nm. O modelo usado no LIF é o *laser* Coherent Innova 300C MotoFred acoplado com todo o conjunto necessário para a geração de UV. Devido a dificuldade de estabilização de potência do *laser*, definimos a corrente da fonte fixa em 35 A. Sendo assim, não há a possibilidade de variação da energia deste *laser* devido a sensibilidade de toda a óptica aberta que compõe o caminho óptico no interior do *laser*, sendo todas as FBGs fabricadas para este trabalho com potência de  $(95 \pm 3) \text{ mW}$ .

Como o feixe é de alta coerência, não foi necessário pensarmos em redimensi-



onamento do feixe, e é por este mesmo motivo que ao posicionarmos o trecho de fibra a ser inscrito na máscara de fase, devemos verificar se há a formação de raias de divergência verticais (Figura 3.9), fenômeno produzido pela própria geometria da fibra óptica, que atua como uma lente cilíndrica, dispersando o feixe verticalmente, o que garante que o feixe está incidindo em sua maior parte na seção transversal da fibra. Este procedimento é feito com um parafuso micrométrico disposto de forma vertical, de forma a modificar a altura dos posicionadores da fibra óptica.

O procedimento básico de operação do *laser* de Argônio se encontra descrito no Apêndice D.

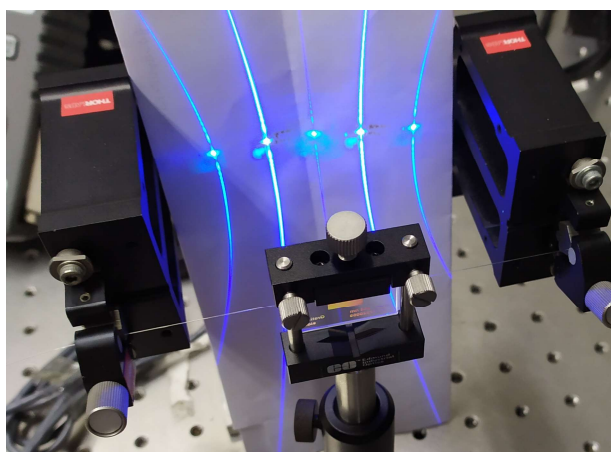


Figura 3.9: Raias verticais provenientes da incidência do *laser* de íons de argônio na fibra óptica.

### 3.2.3 Variação de parâmetros no processo de fabricação da rede de Bragg

Com a finalidade de observar se, e como, ocorre alteração no perfil da FBG, elencamos variáveis potencialmente significativas, sendo cada uma delas analisada de forma independente em cada rodada de fabricação.

Levando em conta que o *laser* de Nd:YAG possui dois parâmetros variáveis pelo operador (potência/energia do pulso e tempo de exposição), e o *laser* de íons de argônio possui potência fixa (dada uma determinada corrente) e só é possível variar o tempo de exposição, definimos que o planejamento experimental fosse embasado na fabricação de redes de Bragg especificamente com o *laser* pulsado, não sendo viável o mesmo estudo para o aparato com o *laser* de argônio por haver apenas uma variável.

Sendo assim, as variáveis independentes que compõem a superfície de resposta de cada planejamento experimental são denominadas como:

- Energia média do pulso da fonte UV ( $E_p$ ), e

- Tempo de exposição da fibra à radiação UV, estabelecendo um máximo de tempo de 60 s ( $T$ ).

O fato de termos duas variáveis independentes e controláveis pelo operador nos permitiu usar o planejamento experimental do tipo DCCR, capaz de fazer uma superfície de resposta afim de encontrarmos o ponto ótimo de fabricação dos sensores com este aparato experimental.

Para realização de toda análise estatística das amostras estudadas, usamos o *software* comercial Statistica. Cada variável de resposta terá os efeitos estimados, análise de variância e superfície de resposta correspondente em cada caso.

Cada parâmetro intrínseco da FBG ( $\lambda_{Bragg}$ , Refletividade, FWHM e SLSR) será considerado como variável resposta e irá gerar uma superfície de resposta distinta. Assim, nosso objetivo é atender todos os parâmetros com apenas um valor de cada variável independente proveniente das curvas de otimização. Não sendo possível a escolha de parâmetros que satisfaçam ao mesmo tempo todas as variáveis resposta, avaliaremos a escolha com base na aplicação a ser usada, que no caso nos refere à deformação mecânica.

As variáveis independentes codificadas traduzidas em valores naturais se encontram na Tabela 3.1. Com isso, cada par associado de energia e tempo terá um conjunto de quatro variáveis resposta.

Tabela 3.1: Variáveis naturais do DCCR com  $E_p$  e  $T$  como variáveis independentes.

Ensaio	$E_p$ ( $\pm 2mJ$ )	$T$ ( $\pm 1s$ )
1	38	23
2	73	23
3	38	48
4	73	48
5	20	35
6	90	35
7	55	10
8	55	60
9	55	35
10	55	35
11	55	35

Para estabelecer a relação entre *lasers* de modos de incidência distintos, aplicamos o planejamento experimental com base nas duas variáveis controláveis no aparato com Nd:YAG, conforme Tabela 3.1, e a partir disso, calculamos a fluência  $F$  de cada ensaio, dada pela Equação 3.1:

$$F = P_{laser}T \quad (3.1)$$

sendo  $P_{laser}$  a potência total em watts de saída do *laser* e  $T$  o tempo de exposição da

fibra à radiação UV em segundos. A fluência no caso do *laser* de Nd:YAG depende do tempo total de exposição da fibra ao *laser*. No caso de *lasers* contínuos, a fluência é igual a potência do *laser* multiplicada pelo tempo de exposição em segundos, já que não há tempo de pulso. No entanto, em *lasers* pulsados, a fluência é proporcional à frequência de pulso e o tempo de abertura para incidência de cada pulso.

Com base no DCCR realizado no aparato com Nd: YAG, a Tabela 3.2 indica a fluência do *laser* pulsado, dado Fl-Qs Dly de 215  $\mu$ s e frequência de 10 Hz, e quanto tempo de exposição equivale ao *laser* contínuo de Argônio. É com base nesta tabela que concluímos que há uma inviabilidade de comparação direta entre os dois *lasers*, dado processo de irradiação distinto. Mesmo com a diminuição da potência do *laser* Nd:YAG e aumentando o tempo da janela de irradiação do *laser*, ainda assim não teríamos tempo suficiente para uma inscrição no *laser* contínuo de íons de Argônio.

Pensando nisso, uma alternativa de comparação viável para os dois aparatos experimentais consiste em realizar um volume grande de repetições (50 vezes nas mesmas condições) e avaliar as dispersões de cada parâmetro de resposta. Após esta estimativa, avaliaremos a resposta das FBGs fabricadas com base nos testes de temperatura realizados.

Tabela 3.2: Fluência do *laser* Nd:YAG com base nas variáveis do DCCR e sua relação com o tempo de exposição no *laser* de íons de argônio.

$P_{Nd:YAG}(\pm 10mW)$	$T_{Nd:YAG}(\pm 1s)$	$F(.10^{-3}J)$	$T_{Ar}(s)$
200	38	16	0,2
380	23	19	0,2
380	48	39	0,4
550	10	12	0,1
550	38	45	0,4
550	60	71	0,7
730	23	36	0,4
730	48	75	0,8
900	35	68	0,7

### 3.2.4 Hidrogenação

Para endossar nosso planejamento experimental, fabricamos também FBGs submetidas à hidrogenação para quantificar a influência deste efeito, com base nos parâmetros fundamentais da FBG. Não houve a avaliação do efeito de hidrogenação nas FBGs fabricadas no *laser* de íons de argônio pois a intensidade energética da luz é muito baixa para viabilizar a fabricação de FBGs não-hidrogenadas com essa fonte de luz na faixa de tempo estipulado para fabricação (até 5 min).

A hidrogenação é feita colocando o trecho de fibra a ser trabalhado dentro de uma câmara preenchida com gás de hidrogênio puro (99,99999%). A disposição do

aparato de hidrogenação se encontra representado na Figura 3.10. A medição da pressão dos cilindros é dada pelos medidores 1 e 2. O medidor 3 representa a pressão no interior da câmara de hidrogenação. O trecho de fibra é inserido já com conector na câmara.

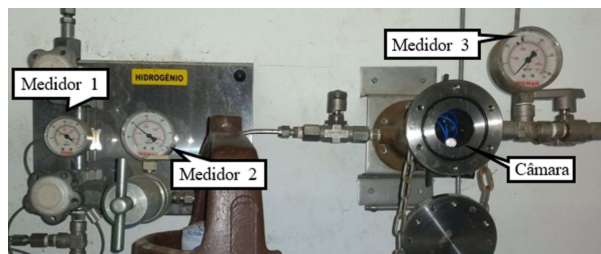


Figura 3.10: Aparato para processo de hidrogenação.

Em todas as vezes que foi necessário este processo, a fibra óptica ficou imersa no gás hidrogênio por 7 dias ininterruptos sob uma pressão de 1600 psi.

### 3.2.5 Caracterização das FBGs com base em deformação mecânica

No intuito de verificar se a hidrogenação influencia no uso da FBG para um futuro sensoriamento, fizemos a caracterização de deformação mecânica das FBGs fabricadas no *lasers* de Nd:YAG, mantendo a temperatura ambiente aproximadamente a mesma de  $(24,0 \pm 0,5)$  °C para evitar interferências no comportamento durante os testes.

Escolhemos 4 FBGs para a caracterização de deformação mecânica: 2 provenientes dos melhores parâmetros das FBGs não hidrogenadas, e 2 provenientes dos melhores parâmetros das FBGs hidrogenadas. O teste foi feito com um recipiente de massa  $(9,882 \pm 0,002)$  g, e com o acréscimo de massas iguais no valor de  $(1,026 \pm 0,002)$  g (equivalente a 1 ml de água deionizada) até o valor total máximo de  $(30,405 \pm 0,002)$  g, que equivale ao suporte preenchido com 20 ml de água. O teste também foi feito no sentido decrescente para verificar se foi realizado dentro do regime elástico da fibra óptica, e eliminar a possibilidade de pequenas variações de temperatura entre o início e o fim do teste.

A FBG durante o teste se encontra livre no ar, com o auxílio de um suporte mecânico para fixação nesta posição. Um diagrama esquemático do experimento está representado na Figura 3.11, onde um interrogador realiza a leitura do  $\lambda_{Bragg}$  conforme a massa é adicionada no recipiente preso na extremidade da fibra óptica, livre no ar. O comportamento de seu espectro durante toda a medida foi observado com o auxílio do interrogador SM125 da Micron Optics.

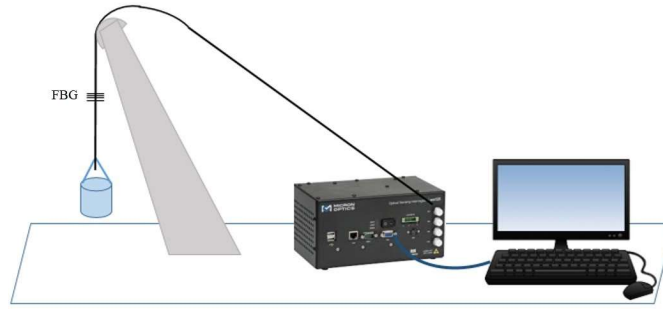


Figura 3.11: Representação esquemática do teste de deformação mecânica.

### 3.2.6 Caracterização das FBGs com base em variação de temperatura e avaliação de temperatura extrema

Outro viés comparativo entre os dois *lasers* é comparar o comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  quando submetido a variações de temperatura.

Escolhemos aleatoriamente dois pares de FBGs dentro do conjunto de repetições, sendo duas correspondentes dos melhores parâmetros das FBGs fabricadas no *laser* de Nd:YAG, e duas fabricadas no *laser* de íons de argônio. Aproveitamos este teste, também, para avaliar a possibilidade de redução dos lóbulos laterais em caso de temperatura extrema.

Usamos novamente o interrogador óptico SM125 com 4 canais para avaliarmos os espectros de reflexão de cada FBG. No primeiro teste, dispusemos os 4 sensores dentro de um forno e monitoramos sua temperatura interna. O teste foi realizado iniciando em temperatura ambiente de  $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$  e encerrando no máximo de temperatura que o forno fornece (em torno de  $200^\circ\text{C}$ ). Monitoramos os espectros a cada  $10^\circ\text{C}$  de variação e acompanhamos em tempo real a variação de  $\lambda_{Bragg}$ .

Em um segundo momento, usamos os mesmo sensores em outra estufa de capacidade maior, uma mufla de capacidade de até  $1800^\circ\text{C}$ . Com as mesmas FBGs usadas anteriormente, iniciamos o teste em temperatura ambiente até a observação do apagamento dos sensores, com taxa de aumento de temperatura contínua e de  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ .

## 3.3 Simulação de interrogação por redes gêmeas em *LABVIEW*<sup>TM</sup>

Pensando numa aplicação futura da otimização da fabricação de FBGs no LIF, investigamos qual seria o melhor perfil para aplicações utilizando especificamente a demodulação por redes gêmeas. Para isso, desenvolvemos uma interface em *LABVIEW*<sup>TM</sup> que simula a situação de uma FBG filtro, sem estímulos a variação

de  $\lambda_{Bragg}$ , e uma sensora, que sofrerá uma perturbação perfeitamente senoidal, simulando por exemplo um sensor de corrente elétrica AC baseado em efeito magnetostrictivo no material em que a FBG sensora está fixada.

Os perfis de reflexão foram extraídos previamente do interrogador Micron Optics SM125. Os perfis normalizados nos auxiliam a visualizar a qualidade do perfil das FBGs escolhidas (Figura 3.12). A convolução resultante no programa é feita sem nenhuma alteração prévia de  $\lambda_{Bragg}$ , supondo as duas na mesma temperatura ambiente. A linha vermelha vertical indica o ponto onde se iniciará a oscilação da FBG sensora (ponto de operação).

Ao inserirmos parâmetros sobre o sinal de entrada senoidal (amplitude e frequência), temos em função do tempo o sinal de saída e a transformada de Fourier discreta correspondente a estes parâmetros de entrada. A interface gráfica para o usuário se encontra ilustrada na Figura 3.12.

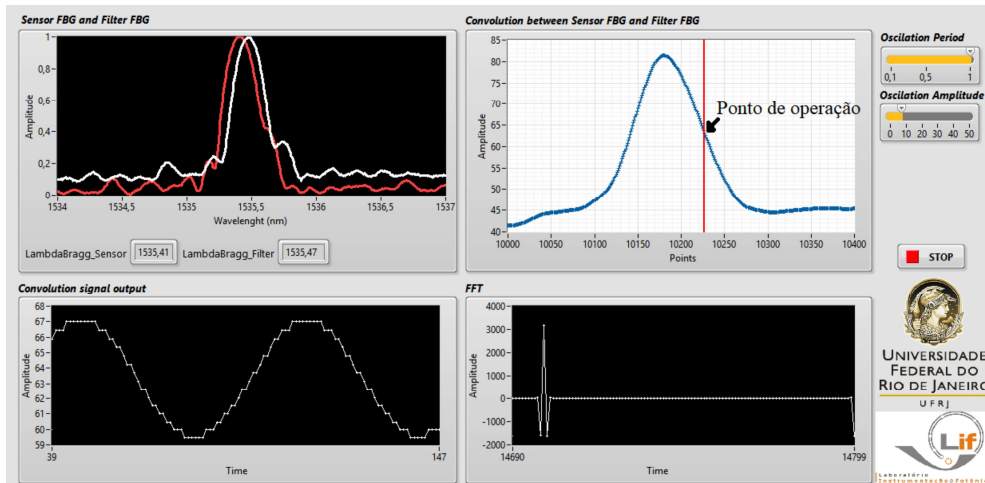


Figura 3.12: Interface em *LABVIEW<sup>TM</sup>* para simulação de sensoriamento por redes gêmeas.

# Capítulo 4

## Resultados e Discussões

### 4.1 Otimização de processo com base no DCCR

Nesta seção apresentaremos o comportamento das variáveis estudadas com base no planejamento DCCR, de três espaços amostrais distintos, sendo:

- **Amostra 1:** FBGs sem hidrogenação e sem tamanho pré-definido, significando apenas que  $l_{FBG} \leq 0,9cm$ ;
- **Amostra 2:** FBGs sem hidrogenação e com tamanho definido de  $(7\pm 1)$  mm, e
- **Amostra 3:** FBGs com hidrogenação e com tamanho definido de  $(7\pm 1)$  mm.

Todos os resultados obtidos estão embasados nas premissas experimentais listadas na seção 3.1 e seguem os valores das variáveis independentes na fabricação de FBGs usando o laser de Nd:YAG conforme Tabela 3.1. As resultantes numéricas  $adj$  e  $r^2$  correspondem ao quanto a superfície de resposta está adequada aos valores das variáveis resposta (com os melhores comportamentos se aproximando de 1), e  $P_{error}$  representa a incerteza da variável resposta, de acordo com a análise do *Statistica*. O material complementar gerado para a interpretação desses dados se encontra no Apêndice A.

#### 4.1.1 Comportamento do $\lambda_{Bragg}$

Teoricamente, por não haver alteração da máscara de fase, o  $\lambda_{Bragg}$  não deveria sofrer alterações. Como a energia do laser de Nd:YAG é grande e fornece uma troca de calor com a sílica da fibra óptica, associamos o comportamento desta variável com trocas de calor durante o processo de inscrição.

##### Amostra 1

Observamos que, por conta da falta de controle da extensão da FBG a ser gravada, houve pouco ajuste desta variável, de forma que a análise de variância associada a





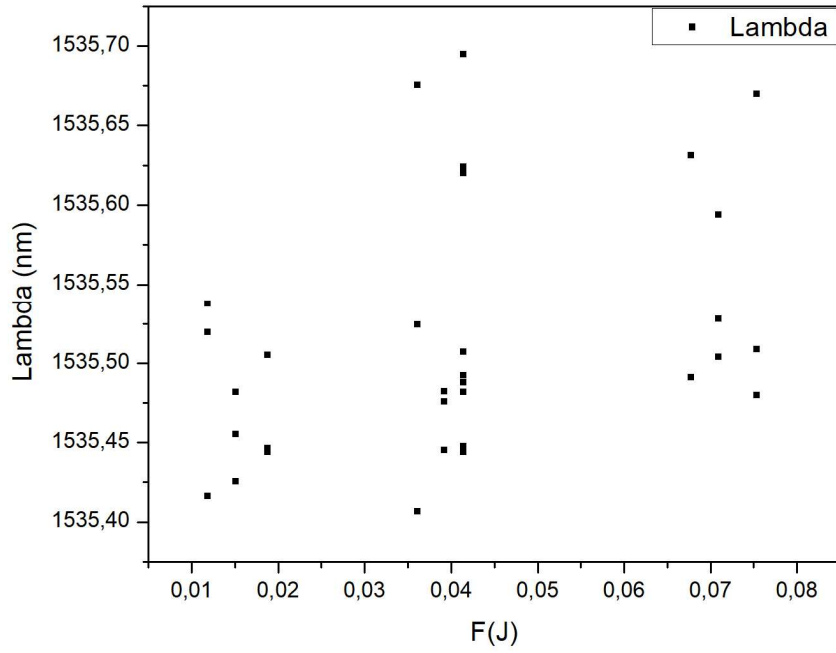


Figura 4.2: Comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  da Amostra 2 conforme fluência.

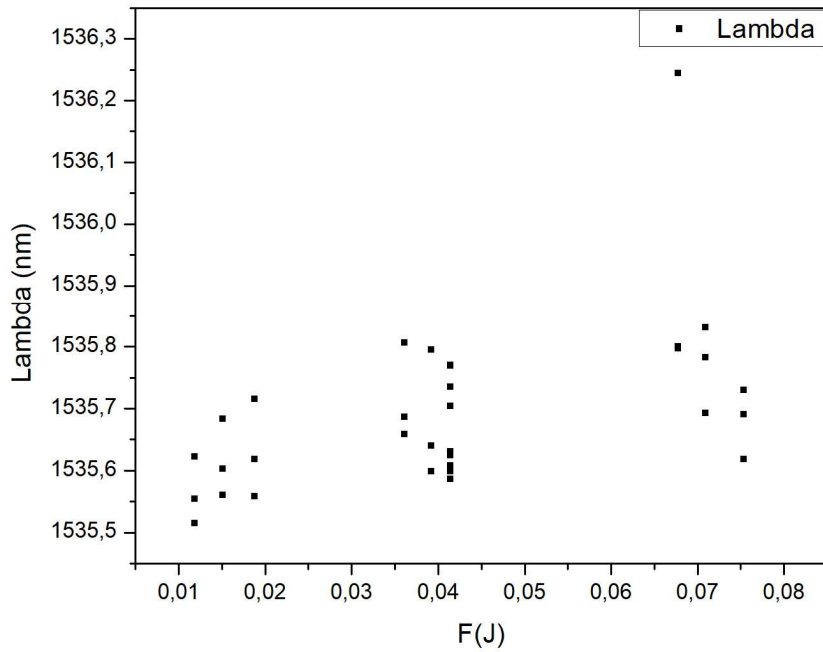


Figura 4.3: Comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  da Amostra 3 conforme fluência.

## 4.1.2 Comportamento do FWHM

### Amostra 1

Observa-se uma grande dispersão nos extremos da fluência (Figura 4.4), mantendo um comportamento mais aceitável em fluências médias. A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,23598$ ,  $r^2 = 0,3076$  e erro puro de  $P_{error} = 0,005$ .

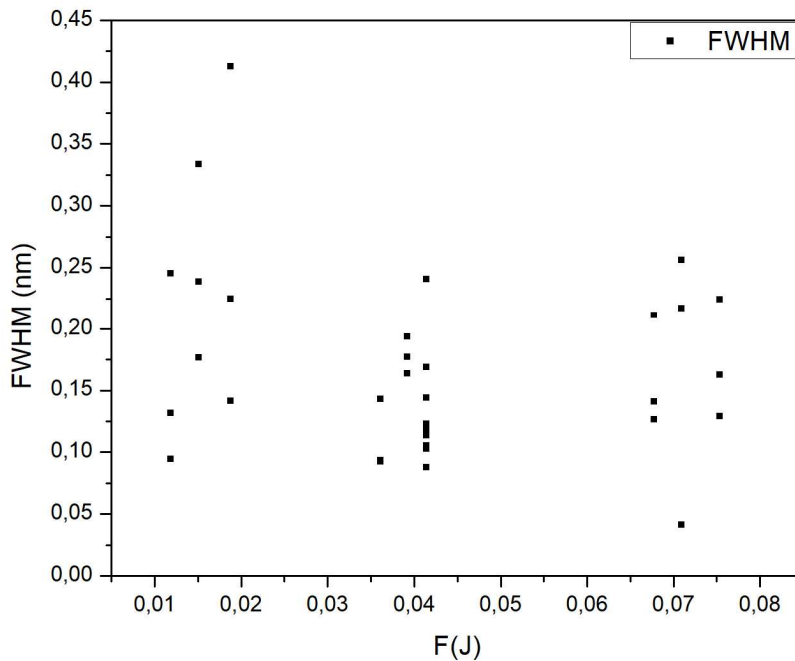


Figura 4.4: Comportamento do FWHM da Amostra 1 conforme fluência.

### Amostra 2

No caso da Amostra 2 (Figura 4.5), foi observado valores maiores do que os obtidos na Amostra 1, além de valores mais dispersos por toda a distribuição de fluência. A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,06089$ ,  $r^2 = 0,14893$  e erro puro de  $P_{error} = 0,028$ .

### Amostra 3

Os resultados obtidos na Amostra 3 (Figura 4.6) apontam uma pequena tendência a diminuição dos valores do FWHM, mas com uma dispersão maior nas fluências maiores. A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,25313$ ,  $r^2 = 0,32315$  e erro puro de  $P_{error} = 0,037$ .

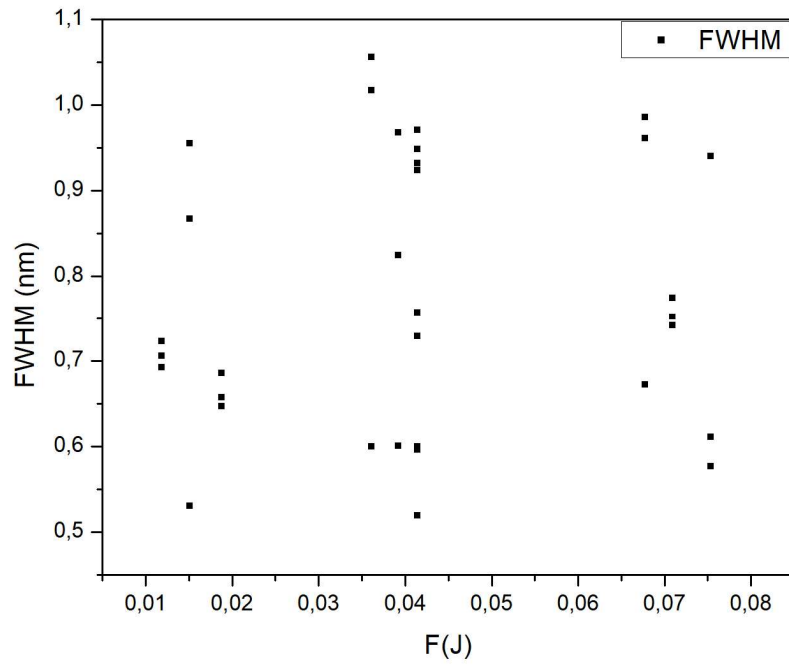


Figura 4.5: Comportamento do FWHM da Amostra 2 conforme fluência.

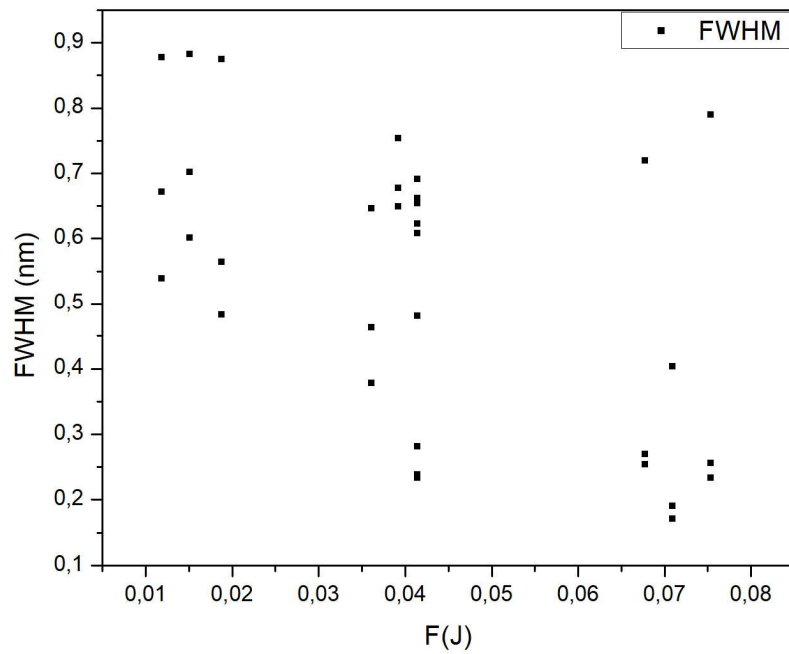


Figura 4.6: Comportamento do FWHM da Amostra 3 conforme fluência.

### 4.1.3 Comportamento da refletividade

#### Amostra 1

Foram obtidos valores menores em fluências menores e uma grande dispersão conforme aumento da fluência, dificultando o ajuste do modelo (Figura 4.7). A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,05646$ ,  $r^2 = 0,11543$  e erro puro de  $P_{error} = 410$ .

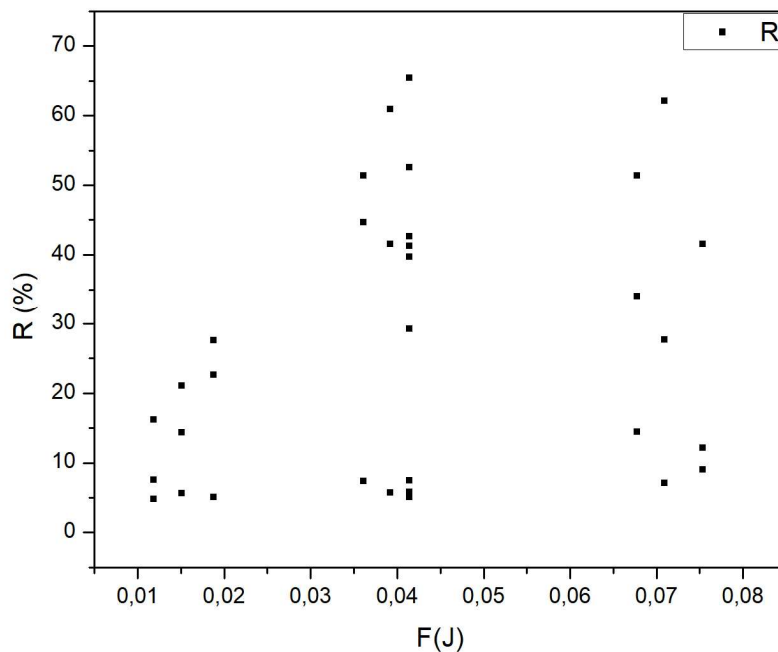


Figura 4.7: Comportamento da refletividade da Amostra 1 conforme fluência.

#### Amostra 2

Embora tenha sido obtido aproximadamente a mesma faixa de dispersão da Amostra 1 para este parâmetro, houveram mais resultados em refletividades menores em todos os valores de fluência estudados (Figura 4.8). A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,0173$ ,  $r^2 = 0,04801$  e erro puro de  $P_{error} = 268$ .

#### Amostra 3

Ao mesmo tempo que houve uma tendência de aumento da refletividade conforme aumento da fluência, houve uma distribuição de valores maior (Figura 4.9). A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,48765$ ,  $r^2 = 0,53568$  e erro puro de  $P_{error} = 342$ .

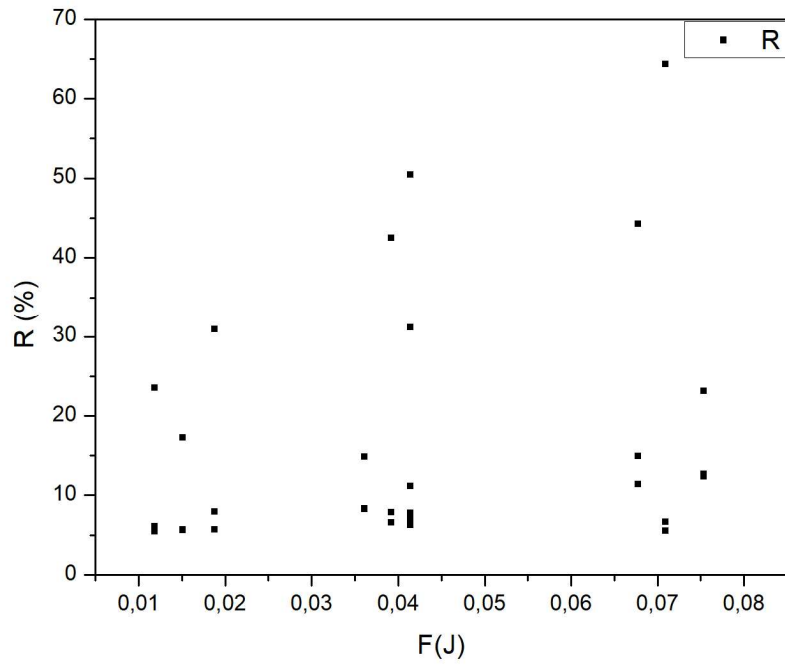


Figura 4.8: Comportamento da refletividade da Amostra 2 conforme fluência.

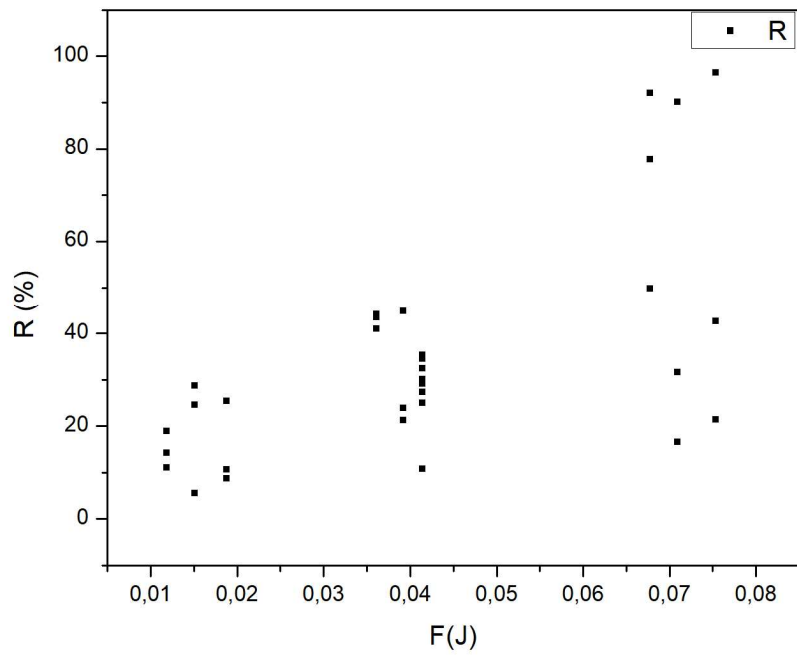


Figura 4.9: Comportamento da refletividade da Amostra 3 conforme fluência.

#### 4.1.4 Comportamento do SLSR

##### Amostra 1

Não foi observado nenhuma tendência nos resultados obtidos e os valores médios ficaram abaixo de 10 dB em todas as fluências estudadas (Figura 4.10). A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,44565$ ,  $r^2 = 0,53227$  e erro puro de  $P_{error} = 3$ .

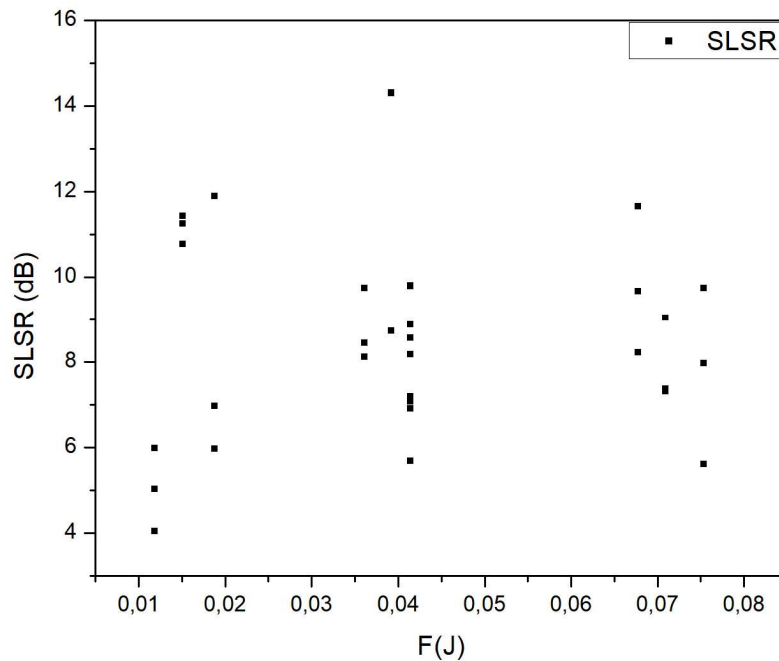


Figura 4.10: Comportamento do SLSR da Amostra 1 conforme fluência.

##### Amostra 2

Houve uma distribuição aproximadamente igual de valores em todas as fluências, mas foi obtido valores acima de 10 dB na Amostra 2 (Figura 4.11) em comparação com a Amostra 1. A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,01211$ ,  $r^2 = 0,10472$  e erro puro de  $P_{error} = 3$ .

##### Amostra 3

Foi observado uma tendência a diminuição do parâmetro SLSR no caso da Amostra 3 (Figura 4.12), principalmente em altas fluências. A análise de variância associada a essa variável resposta obteve os seguintes parâmetros:  $adj = 0,6068$ ,  $r^2 = 0,64366$  e erro puro de  $P_{error} = 3$ .

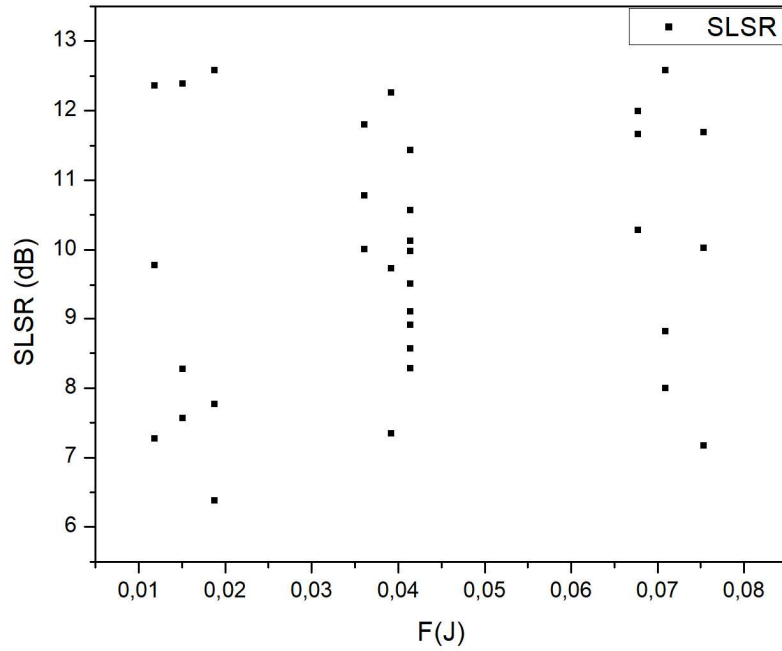


Figura 4.11: Comportamento do SLSR da Amostra 2 conforme fluência.

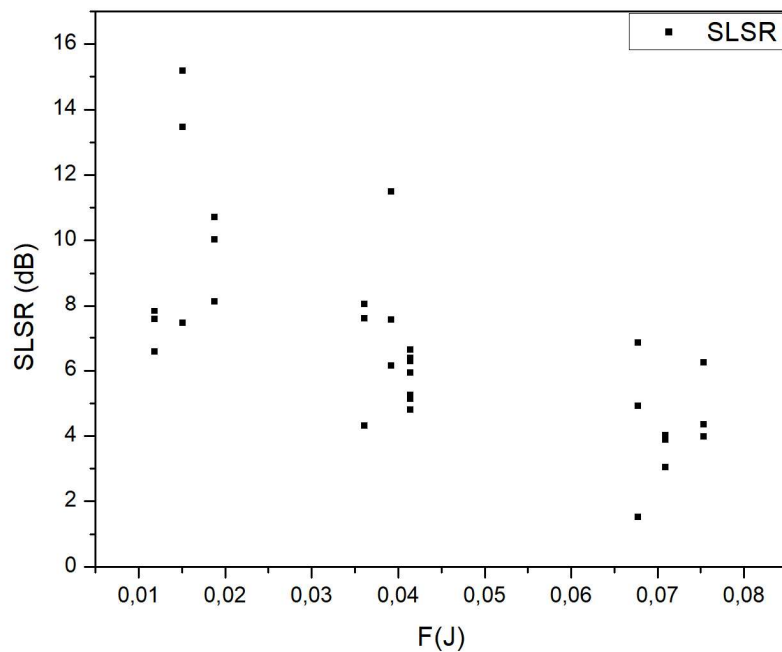


Figura 4.12: Comportamento do SLSR da Amostra 3 conforme fluência.

### Conclusões gerais sobre as amostras

Com base em todas as análises feitas comparando as amostras 1, 2 e 3, concluímos que não houve um ajuste estatisticamente adequado (acima de 0,8) em nenhuma

análise de variância de cada parâmetro. Além disso, verificamos que:

- A amostra 1 (sem hidrogenação e sem tamanho pré-definido) foi inconclusiva para avaliarmos os parâmetros das FBGs, justamente pelo não controle do comprimento efetivo de inscrição da FBG, não sendo útil para nenhuma futura aplicação em sensoriamento de variáveis AC;

- A Amostra 2 (sem hidrogenação e com tamanho definido) apresentou um melhor comportamento, tanto de tendências quanto de valores médios das variáveis de resposta (em comparação aos valores médios comerciais), podendo ser aplicáveis para futuros sensoriamentos;

- A Amostra 3 (com hidrogenação e com tamanho definido) nos retornou melhores valores de refletividade, o que é importante para evitarmos ruído quando há monitoramento de  $\lambda_{Bragg}$ , porém obteve resultados de SLSR baixos com relação ao padrão comercial, dificultando o uso em sistemas de redes gêmeas.

Como uma parte dos objetivos deste trabalho é a aplicação das FBGs fabricadas em sistemas com variáveis dinâmicas usando sistema de interrogação com redes gêmeas, as FBGs não precisam obrigatoriamente de alta refletividade, mas sim um SLSR próximo aos valores comercialmente utilizados.

Sendo assim, baseando-se nas superfícies de resposta do planejamento experimental, podemos definir que para fabricação de FBGs com *laser* Nd:YAG, os melhores parâmetros são:

- Em situação de fibra não-hidrogenada: 55 mJ/pulso e 60 s de exposição.
- Em situação de fibra hidrogenada: 38 mJ/pulso e 48 s de exposição.

## 4.2 Caracterização de deformação mecânica

Conforme descrito na seção 3.2.5, usamos FBGs das melhores condições de contorno de fabricação das amostras 2 e 3 para observamos se a hidrogenação ocasionaria alguma alteração no comportamento da FBG sob deformação mecânica.

O par de FBGs da Amostra 2 foi feito com 55 mJ de energia média do pulso e tempo de exposição de 60 s (Figura 4.13), enquanto na Amostra 3 usamos FBGs com 38 mJ de energia média do pulso e 48 s de tempo de exposição (Figura 4.14). O comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  com relação a deformação mecânica  $\epsilon$  se comportou da mesma forma nas duas situações, com  $\rho_\epsilon = (1,122 \pm 0,004)pm/\mu\epsilon$  e todos os ajustes lineares com  $r^2 = 0,999$ .



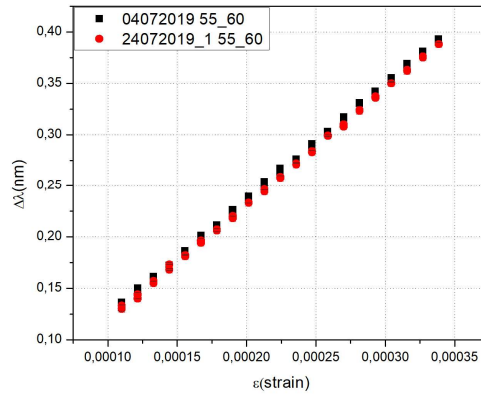


Figura 4.13: Comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  de FBGs sem hidrogenação conforme deformação mecânica.

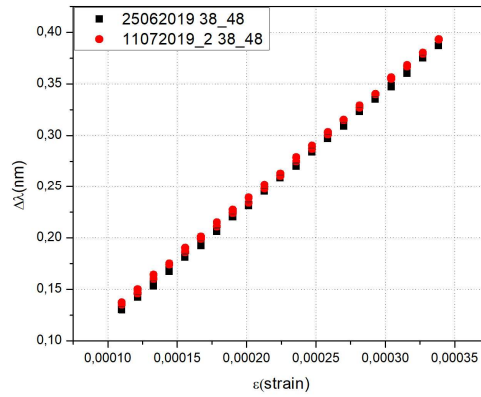


Figura 4.14: Comportamento de  $\lambda_{Bragg}$  de FBGs com hidrogenação conforme deformação mecânica.

### 4.3 Comparativo de aparatos experimentais de fabricação de FBG

Conforme comentado na seção 3.2.3, propusemos a fabricação de 50 unidades de FBGs em cada aparato experimental distinto para estudo comparativo, avaliando separadamente o comportamento de cada uma das quatro variáveis de resposta.

Como a hidrogenação não mostrou significativas melhorias de forma geral no processo de fabricação com o *laser* de Nd:YAG, foi feito a fabricação conforme os melhores parâmetros definidos pelo planejamento experimental da Amostra 2 (sem hidrogenação), que foi de 55 mJ de energia do pulso com 60 s de exposição.

As FBGs fabricadas no *laser* de íons de argônio foram previamente hidrogenadas e o tempo de exposição foi definido conforme se encerrava o aumento de potência de cada  $\lambda_{Bragg}$ , o que durou em média 5 min de exposição.

Todas as FBGs usadas nessa seção foram fabricadas e seu espectro extraído dois dias após sua fabricação. Observamos que a eficiência de inscrição do *laser* de íons de argônio se manteve em 100% após os dois dias, enquanto no caso da fabricação no *laser* de Nd:YAG, 50% apagou após os dois dias, 30% tinha o pico de reflexão ilegível pelos parâmetros de leitura do interrogador óptico e apenas 20% se manteve (10 FBGs).

As comparações de faixas de aceitação de cada parâmetro estão baseadas nas faixas de aceitação associadas às FBGs comerciais fabricadas pela Technica SA, indicadas pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Faixas de aceitação de cada parâmetro de uma FBG fabricada comercialmente.

Parâmetro	Valores associados
$\lambda_{Bragg}$	$\pm 0,5$ nm
FWHM	$\pm 0,3$ nm
Refletividade	$> 80\%$
SLSR	$> 12$ dB

### 4.3.1 Histogramas associados às FBGs fabricadas com laser de Nd:YAG

Devido ao apagamento da maioria das FBGs resultantes do processo de fabricação usando o *laser* de Nd: YAG, os histogramas foram feitos com base nas 10 FBGs legíveis pelo interrogador SM125.

Apesar da baixa eficiência obtida na fabricação de FBGs com o laser de Nd: YAG, foi obtido com sucesso uma faixa de variação de menos de 0,5 nm do  $\lambda_{Bragg}$  das FBGs (Figura 4.15), o que mostra que nosso processo é comparável a processos comerciais neste quesito.

Os valores obtidos do FWHM estão ilustrados na Figura 4.16. Observamos dois valores com maior frequência de ocorrência, mas todos os valores encontrados ficaram abaixo da faixa considerada como referência para FBGs comerciais (Tabela 4.1), o que mostra que foi possível atingir excelente estabilidade no processo de fabricação também neste quesito, dando confiabilidade para essas FBGs no caso de filtro de sinal. Também observamos uma incerteza associada menor do que o usualmente reportado nas especificações de FBGs comerciais.

Observamos que a refletividade está abaixo da faixa comercializável, conforme Figura 4.17. Embora a FBG seja reconhecida pelo analisador de espectro, a relação entre o sinal e o ruído de fundo pode prejudicar o sensoriamento.

Assim como a refletividade, o SLSR resultou em valores muito abaixo do valor usual de FBGs comerciais (Figura 4.18).

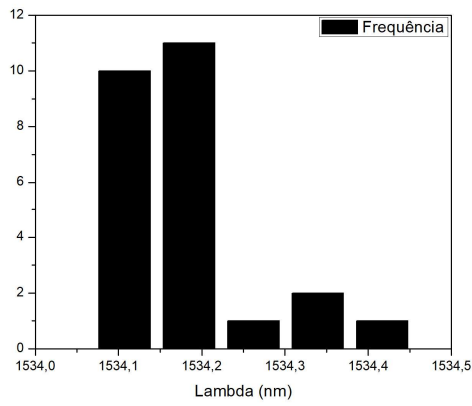


Figura 4.15: Valores associados ao  $\lambda_{Bragg}$  de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de Nd:YAG.

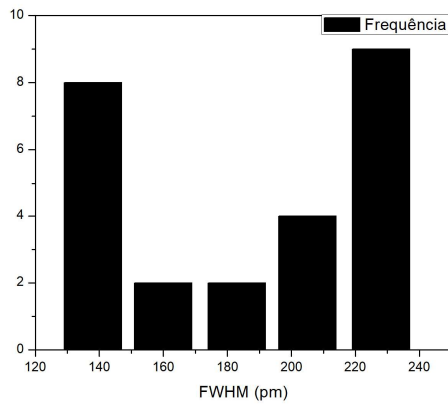


Figura 4.16: Valores associados ao FWHM de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de Nd:YAG.

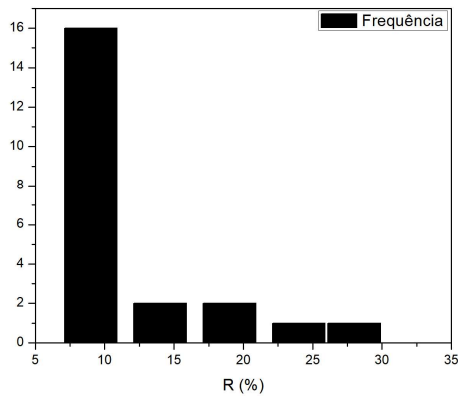


Figura 4.17: Valores associados a refletividade de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de Nd:YAG.

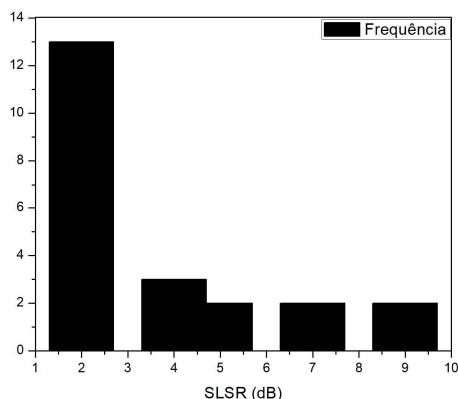


Figura 4.18: Valores associados ao SLSR de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de Nd:YAG.

### 4.3.2 Histogramas associados as FBGs fabricadas com laser de íons de argônio

Os histogramas foram feitos com base nas 50 FBGs fabricadas sob condições aproximadamente iguais de parâmetros.

A variação de  $\lambda_{Bragg}$  se apresentou um pouco maior (mais de 0,5 nm) que o usual das FBGs comerciais, conforme Figura 4.19, mas que ainda assim possibilita o uso em aplicações comerciais e em processos de pesquisa científica.

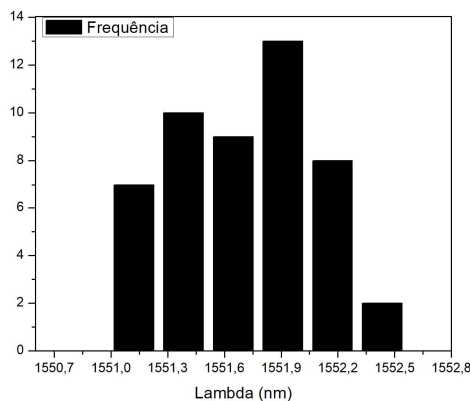


Figura 4.19: Valores associados ao  $\lambda_{Bragg}$  de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de íons de argônio.

Os valores de FWHM, além de serem superior ao usual vendido comercialmente (acima de 1 nm), também apresentam uma faixa de aceitação acima do padrão que a indústria fornece ( $\pm 0,5$  nm) (Figura 4.20).

A Figura 4.21 mostra que a refletividade obteve uma quantidade satisfatória aos valores usuais de FBGs comerciais, mas também tivemos um grande número de

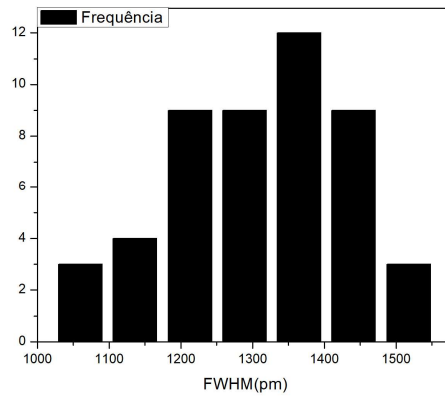


Figura 4.20: Valores associados ao FWHM de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de íons de argônio.

FBGs com refletividade em torno de 50%. Esse comportamento pode ser justificado por uma possível hidrogenação desigual de toda a fibra óptica (partes em contato com o reservatório de hidrogênio podem ter obtido menos absorção do gás).

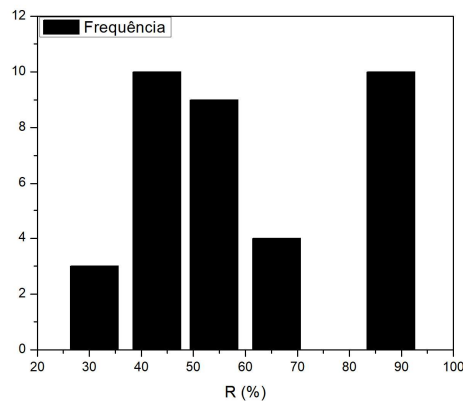


Figura 4.21: Valores associados a refletividade de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de íons de argônio.

A maioria dos valores encontrados para o SLSR estão abaixo do padrão das FBGs comerciais, mas tiveram uma boa repetibilidade em torno dos 10 dB (Figura 4.22).

#### 4.4 Caracterização de variação térmica e teste de apagamento sob temperatura extrema

Foram realizados testes conforme descrito na seção 3.2.6. O teste primário consistiu em aumento de temperatura de  $(23 \pm 1)$  °C até 200 °C continuamente e foi medido o  $\lambda_{Bragg}$  a cada 10 °C (Figuras 4.23 e 4.24). Os coeficientes de expansão térmica de

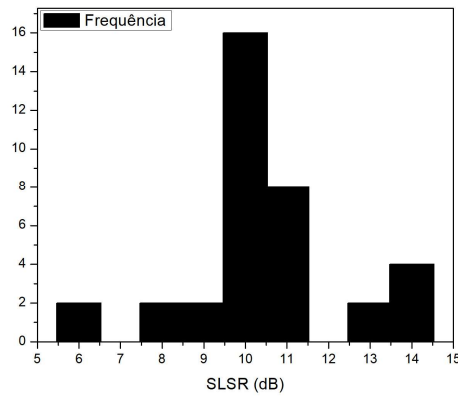


Figura 4.22: Valores associados ao SLSR de FBGs fabricadas sob mesmas condições no *laser* de íons de argônio.

cada FBG foram:

- FBG ch1 (fabricada no *laser* de íons de argônio):  $(11,7 \pm 2)$  pm/°C
- FBG ch2 (fabricada no *laser* de íons de argônio):  $(12,7 \pm 2)$  pm/°C
- FBG ch3 (fabricada no *laser* de Nd:YAG):  $(11,4 \pm 2)$  pm/°C
- FBG ch4 (fabricada no *laser* de Nd:YAG):  $(12,4 \pm 2)$  pm/°C

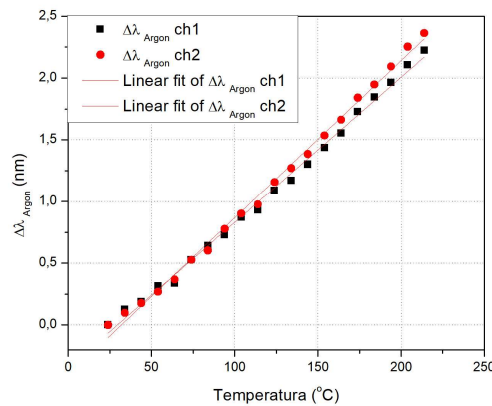


Figura 4.23: Comportamento das FBGs fabricadas no *laser* de íons de argônio com base em variação de temperatura.

Realizou-se um segundo teste referente à temperatura, para se verificar a resistência das FBGs quando submetidas a temperaturas extremas até o apagamento. Com o auxílio de um termopar, iniciamos o processo em temperatura ambiente de  $(24 \pm 1)$  °C e subimos continuamente a temperatura até  $(820 \pm 1)$  °C, temperatura de apagamento da última FBG.

Corroborando a literatura[15], as duas FBGs que não passaram por hidrogenação prévia sofreram apagamento em temperaturas mais baixas: uma com 440 °C e outra com 560 °C. Foi atribuído essa diferença de temperatura de apagamento à baixa

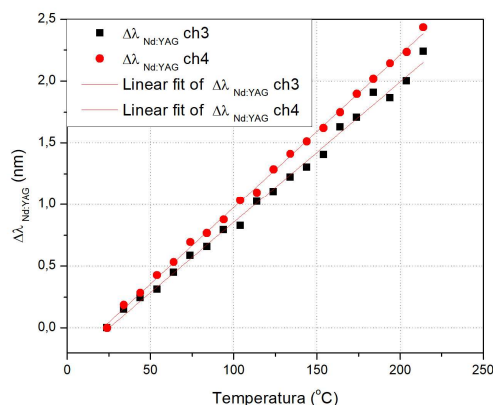


Figura 4.24: Comportamento das FBGs fabricadas no *laser* Nd:YAG com base em variação de temperatura.

refletividade, o que aumenta a relação sinal-ruído do interrogador. Enquanto isso, as duas FBGs hidrogenadas e inscritas no *laser* de íons de argônio sofreram apagamento em 820 °C, uma com 10 min de exposição a essa temperatura, e outra com 15 min de exposição na mesma temperatura. Foi observado a redução dos lóbulos laterais a partir dos 750 °C, mas é necessário avaliar a necessidade desse processo, já que a FBG em todo o seu perfil de reflexão apresenta mais irregularidades.

Esse experimento permitiu concluir ainda que as FBGs fabricadas com esse processo podem ser utilizadas em ambientes com temperaturas elevadas, o que amplia ainda mais as possibilidades de aplicações dessas FBGs.

## 4.5 Responsividade dos perfis de convolução com redes gêmeas em simulação de sinal AC

As simulações a seguir tem como objetivo verificar em qual situação temos o melhor comportamento senoidal do sinal de saída, dados os espectros das FBGs fabricadas. Cada par de FBGs foi escolhido aleatoriamente do conjunto de 50 repetições de cada fonte UV. Em cada simulação o ponto de operação foi escolhido dentro da faixa mais linear da função de convolução entre as FBGs testadas, e os parâmetros de entrada da senoide foram selecionados de acordo com a maior amplitude possível, dados a curva de convolução e o ponto de operação.

### Simulação 1

A simulação 1 tem duas FBGs consideradas gêmeas fabricadas no *laser* de Nd:YAG. Os perfis de reflexão normalizados das FBGS utilizadas estão na Figura 4.25. A diferença entre os valores de  $\lambda_{Bragg}$  é de 20 pm. A função de convolução resultante

dos dois perfis de reflexão usados se encontra na Figura 4.26.

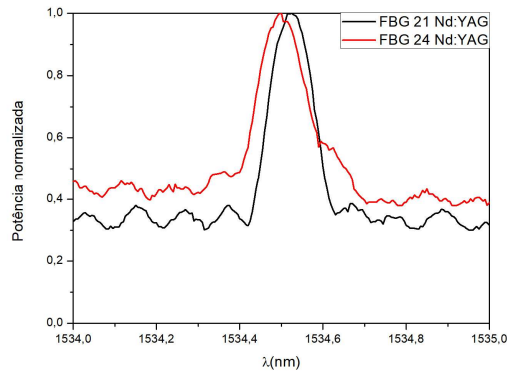


Figura 4.25: Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 1.

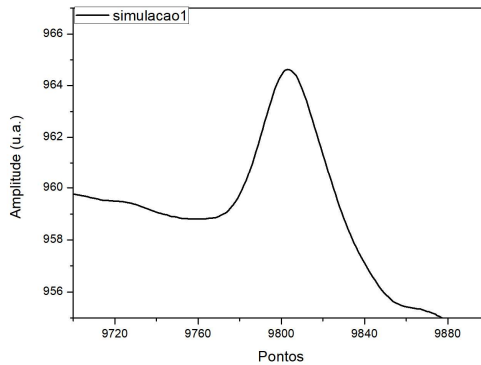


Figura 4.26: Comportamento da função convolução da Simulação 1.

## Simulação 2

A simulação 2 tem duas FBGs consideradas gêmeas fabricadas no *laser* de íons de argônio. Os perfis de reflexão normalizados das FBGs utilizadas estão na Figura 4.27. A diferença entre os valores de  $\lambda_{Bragg}$  é de 800 pm. A função de convolução resultante dos dois perfis de reflexão usados se encontra na Figura 4.28.

## Simulação 3

A simulação 3 tem duas FBGs, sendo a FBG sensora fabricada no *laser* de Nd:YAG e a FBG filtro fabricada no *laser* de íons de argônio. Como as máscaras de fase utilizadas na fabricação dos sensores foram diferentes em cada *laser*, alteramos o algoritmo da simulação para promover a aproximação dos dois perfis de reflexão. A FBG fabricada no *laser* de Nd: YAG foi deslocada de forma que o  $\lambda_{Bragg}$  se encontrasse a 700 pm a direita do  $\lambda_{Bragg}$  da FBG filtro, posição mais favorável



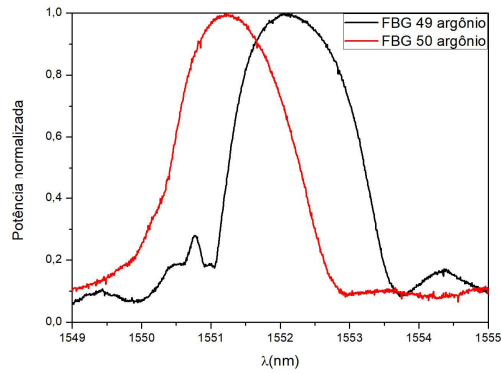


Figura 4.27: Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 2.

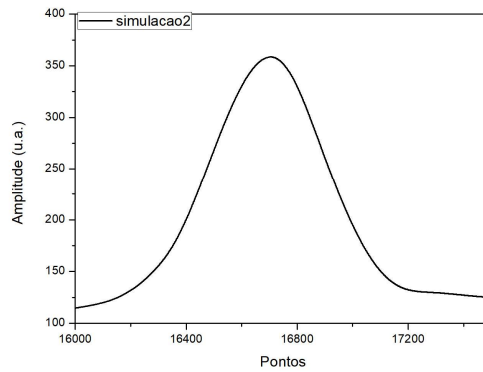


Figura 4.28: Comportamento da função convolução da Simulação 2.

para a imposição da perturbação senoidal na FBG sensora. Os perfis de reflexão normalizados das FBGs utilizadas estão na Figura 4.29. A função de convolução resultante dos dois perfis de reflexão usados se encontra na Figura 4.30.

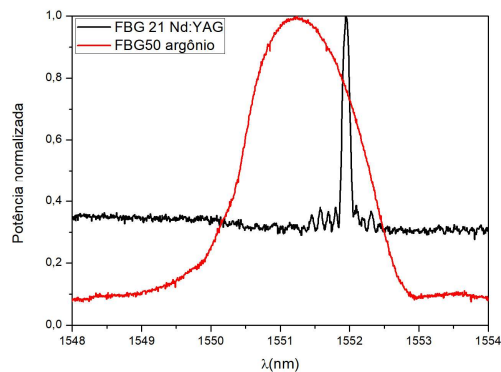


Figura 4.29: Perfis de reflexão das FBGs utilizadas na Simulação 3.

Com as funções de convolução obtidas nas simulações, um sinal senoidal puro foi aplicado a uma das FBGs de cada um dos 3 pares, com o objetivo de simular

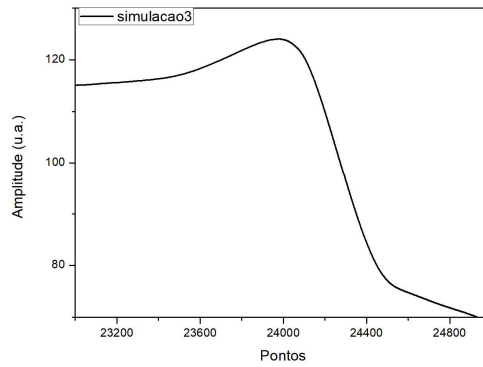


Figura 4.30: Comportamento da função convolução da Simulação 3.

um sensor de variável AC, como corrente ou tensão elétricas. Tal simulação, que foi realizada no programa desenvolvido em LabVIEW, nos permitiu analisar, ao menos qualitativamente e de forma preliminar, qual combinação de perfis de FBG seria mais adequada para esse tipo de sensoriamento.

É importante destacar que muitos trabalhos técnico-científicos têm apresentado soluções ópticas para o sensoriamento de tensão e corrente elétrica AC, principalmente para o setor de transmissão e distribuição de energia elétrica (alta tensão). Neste sentido, os sistemas de interrogação que utilizam FBGs gêmeas são os mais adequados para esse tipo de sensoriamento, uma vez que permitem maiores taxas de aquisição e linearidade e, principalmente, maior flexibilidade de customização às especificidades para cada tipo de sensor quando comparados aos interrogadores comerciais de FBG.

Portanto, para um sistema de interrogação com FBGs gêmeas, os perfis das FBGs utilizadas é de grande importância, pois afeta diretamente a qualidade do sinal de saída. Tal efeito pode ser verificado nas Figuras 4.26, 4.28 e 4.30, que mostra a composição espectral - obtida através da função FFT (*fast fourier transform*) - dos sinais senoidais produzidos nas simulações em LabVIEW para as três funções de convolução estudadas. É possível observar claramente que o sinal senoidal aplicado à FBG da simulação 3 seria reproduzido na saída de um hipotético sensor de alta tensão (ou corrente) com maior fidelidade quando comparado ao obtido nas simulações 1 e 2, de acordo com a análise das componentes harmônicas do sinal de saída das simulações (Figura 4.31). Este resultado mostra que os perfis das FBGs indicados na Figura 4.29 (que produziram o espectro de convolução da Figura 4.30) são os mais adequados para aplicação em um sensor de variável dinâmica, pois permitiram maior fidelidade do sinal aplicado ao sensor (componentes harmônicas menores na análise do sinal de saída).

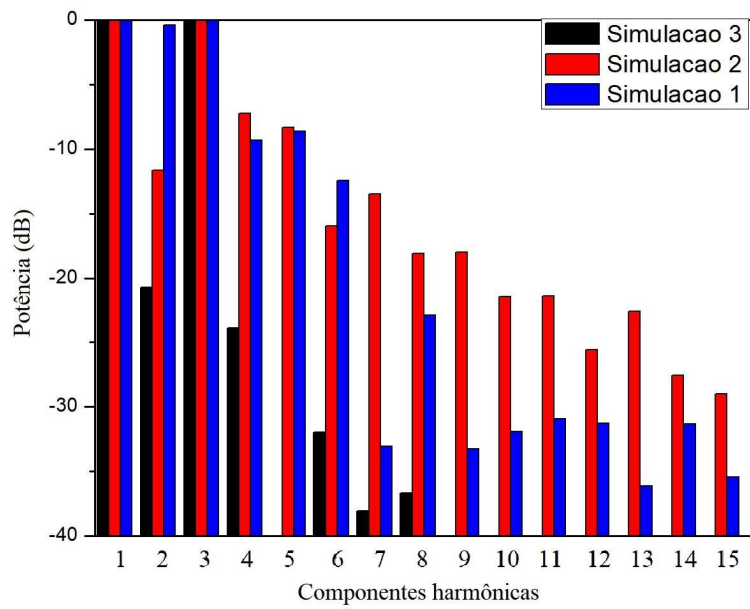


Figura 4.31: Amplitude de potência das componentes harmônicas provenientes das simulações.

# Capítulo 5

## Conclusões e trabalhos futuros

### 5.1 Conclusões

Nesse trabalho foi possível implementar um planejamento experimental dedicado à fabricação de redes de Bragg com base na infraestrutura disponível no Laboratório de Instrumentação e Fotônica. Com isso, a continuidade de fabricação de FBGs estará baseada no tratamento estatístico proposto nessa dissertação, otimizando o tempo gasto pelo operador na fabricação, e melhorando a eficiência do processo quando observamos o comportamento de parâmetros de resposta com base nas configurações do *laser* de Nd:YAG. Concluímos que o *laser* de Nd:YAG é capaz de produzir FBGs de FWHM estreito, sendo útil para monitoramento de  $\lambda_{Bragg}$  de forma precisa. Também podemos observar que o *laser* de íons de argônio possui uma alta taxa de repetibilidade em parâmetros como a refletividade, sendo assim considerado como fonte de luz primordial para fabricação de FBGs, sendo o *laser* de Nd:YAG mais adequado como solução rápida e paliativa em eventuais pausas para manutenção.

Mesmo com as dispersões associadas à fabricação de FBGs com o *laser* de Nd:YAG, diversos trabalhos foram desenvolvidos (Apêndice B), mostrando que é possível a utilização de FBGs mesmo com pouca repetibilidade no processo.

O fato de termos dois *lasers* com mecanismos de incidência diferentes (pulsado e contínuo) permitiu também avaliar como esse efeito poderia afetar a fabricação dos sensores, e permitiu observar principalmente que o uso das duas fontes pode ser complementar, uma vez que os parâmetros das FBGs podem sofrer variações e aumentam o leque de possibilidades nas aplicações científicas ou industriais.

Em outra demonstração de concordância com padrões comerciais internacionais obtida nas FBGs fabricadas no LIF, os testes de temperatura e deformação mecânica resultaram em valores muito próximos aos encontrados na literatura, o que nos permite concluir que nossas FBGs encontram grande potencial de aplicação em conjunto ou em substituição àquelas encontradas no mercado que, em sua maioria,

são atualmente importadas de outros países com relativo alto custo.

Ainda em relação à temperatura, observamos que o apagamento das FBGs ocorreu em temperaturas abaixo do indicado na literatura, conforme indicado nas discussões da seção 4.4, ao considerarmos que o apagamento das FBGs não-hidrogenadas foi devido à baixa refletividade, e o apagamento das FBGs hidrogenadas foi devido ao tempo de exposição em altas temperaturas (entre 10 e 15 min com temperatura de 820 °C). Embora abaixo do que já descrito na literatura, as FBGs fabricadas ainda são viáveis para aplicações em ambientes com temperaturas hostis.

No que envolve o sensoriamento envolvendo demodulação de redes gêmeas, observamos que o conjunto composto pela FBG filtro feita no *laser* de argônio e a FBG sensora feita no *laser* de Nd:YAG proporcionou melhor resposta em situação simulada de entrada de sinal senoidal, o que fornece um privilégio ao LIF pela possibilidade de escolha da melhor combinação de FBGs que seja mais adequada a certa aplicação, mesmo tendo como melhoria futura o aumento da repetibilidade dos parâmetros.

## 5.2 Trabalhos futuros

Tendo em vista as dispersões observadas como resultado deste trabalho, fica claro que um aparato experimental com dispositivos capazes de isolar o sistema óptico de vibrações, gradientes de temperatura e principalmente que permita o posicionamento e alinhamento micrométricos da fibra óptica em relação à máscara de fase é fundamental para a obtenção de repetibilidade na fabricação das FBGs.

Além disso, especificamente no caso do *laser* de Nd: YAG, faz-se necessária a aquisição de um conjunto de lentes adequadas ao comprimento de onda utilizado para a adequada colimação do feixe de luz e, conseqüentemente, gravação de FBGs com melhores taxas de repetibilidade e menor dispersão de parâmetros.

É possível também a construção de um algoritmo automatizado de análise dos parâmetros de resposta, dado o espectro da FBG fabricada. Esta etapa tornará o processo mais mecanizado e poderá evitar o uso de algoritmo de aproximação de funções de *softwares* terceirizados, além de fornecer um *datasheet* completo e padronizado dos sensores fabricados, podendo alimentar um banco de dados.

Percebe-se também a necessidade de ajuste no posicionamento do trecho de fibra óptica no aparato mecânico. Embora tenha sido feito um suporte de apoio para controlarmos a tensão longitudinal, pode-se automatizar o processo de posicionamento com eixos de rotação e motores de passo, capazes de manter o estiramento da fibra e agilizar o processo de fabricação sequencial de FBGs, apenas dependendo de que o operador retire o revestimento dos espaços destinados para a incidência do laser.

O sensoriamento por demodulação de redes gêmeas usando FBGs fabricadas com

os dois *lasers* em simultâneo deve ser explorado mais detalhadamente, incluindo a proposta de uma aplicação em situação real com sinal AC para compararmos com os resultados simulados.

É interessante também a implementação de outras técnicas de fabricação de FBGs, como a técnica interferométrica, e conseqüentemente a análise de dispersão que este processo acarretará, com a finalidade de expandir as possibilidades de fabricação de FBGs.

# Referências Bibliográficas

- [1] HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., et al. “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, *Applied Physics Letters*, v. 32, n. 10, pp. 647–649, 1978. ISSN: 10773118. doi: 10.1063/1.89881.
- [2] GARÇÃO, L. A. *Compensação de Temperatura para Sensores de Corrente Elétrica Baseados em Redes de Bragg em Fibras Ópticas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, 2017.
- [3] MORAES, I. G. D. *Estudo de Sensor de Campo Magnético baseado em Fibra Óptica com Rede de Bragg e Filme Fino de Terfenol-D*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, 2017.
- [4] BARROS, R. C. D. S. *Sensores a fibra óptica com tecnologia FBG para medida de temperatura e alta tensão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2010.
- [5] SRINIVASAN, R., UMESH, S., MURALI, S., et al. “Bare fiber Bragg grating immunosensor for real-time detection of Escherichia coli bacteria”, v. 10, n. 2, pp. 224–230, 2017. ISSN: 18640648. doi: 10.1002/jbio.201500208.
- [6] BELGHACHI, A., WOMENI, T. B. H. M., MIRJALILI, S. R. & V. “Optical Fiber Sensors: An Overview”, *Capsaicin Sensitive Neural Afferentation and the Gastrointestinal Tract from Bench to Bedside*, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.68547>.
- [7] YEH, C. *Handbook of Fiber Optics*. 1990. ISBN: 9780127704555. doi: 10.1016/B978-0-12-770455-5.50017-1.
- [8] WERNECK, M. M., ALLIL, R. C. S. B., RIBEIRO, B. A., et al. “A Guide to Fiber Bragg Grating Sensors”. In: Cuadrado-Laborde, C. (Ed.), *Current*

*Trends in Short- and Long-period Fiber Gratings*, IntechOpen, cap. 1, Rijeka, 2013. doi: 10.5772/54682. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/54682>>.

- [9] “Fibra Óptica ou Cabo de Cobre?” Disponível em: <<http://fabiomontoro.blogspot.com/2013/03/fibra-optica-ou-cabo-de-cobre.html>>.
- [10] KAWASAKI, B. S., HILL, K. O., JOHNSON, D. C., et al. “Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers”, *Optics Letters*, v. 3, n. 2, pp. 66, 1978. ISSN: 0146-9592. doi: 10.1364/ol.3.000066.
- [11] HILL, K. O., MELTZ, G. “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 15, n. 8, pp. 1263–1276, 1997. ISSN: 07338724. doi: 10.1109/50.618320.
- [12] OTHONOS, A., KALLI, K. *Fiber Bragg Gratings*. 1999.
- [13] LEMAIRE, P., ATKINS, R., MIZRAHI, V., et al. “High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres”, *Electronics Letters*, v. 29, 1993. doi: 10.1049/el:19930796.
- [14] KERSEY, A. D., M. M. J. “Fiber Bragg Grating High-Magnetic-Field Probe”, *10th Optical Fibre Sensors Conference*, pp. 53–56, 1994.
- [15] ZHANG, B., KAHIRIZI, M. “High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating”, *Sensors (Peterborough, NH)*, v. 7, n. 4, pp. 586–591, 2007.
- [16] MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H. “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method”, *Opt. Lett.*, v. 14, n. 15, pp. 823–825, 1989. doi: 10.1364/OL.14.000823.
- [17] KASHYAP, R. *Fiber Bragg Gratings*. ISBN: 9780123725790.
- [18] MATEUS, N. B., BARBIN, D., CONAGIN, A. “Viabilidade de uso do delineamento composto central”, *Acta Scientiarum : Technology*, v. 23, n. 0, pp. 1537–1546, 2001. ISSN: 1807-8664. doi: 10.4025/actascitechnol.v23i0.2795.
- [19] MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C., ANDERSON-COOK, C. M. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. John Wiley & Sons, 2009. ISBN: 9780470174463.



- [20] DE ASSUMPÇÃO RIBEIRO, B., WERNECK, M. M., DA SILVA-NETO, J. L. “Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements”, *IEEE Sensors Journal*, v. 13, n. 4, pp. 1259–1264, 2013. ISSN: 1530437X. doi: 10.1109/JSEN.2012.2232290.
- [21] DE ASSUMPÇÃO RIBEIRO, B. *Transformador de potencial óptico baseado em FBG-PZT com demodulação por redes gêmeas e filtro fabry-perot*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, 2011.
- [22] DANTE, A. *Módulo sensor óptico com grades de Bragg em fibra óptica e cerâmicas piezoelétricas para medida de alta tensão com transformadores de potencial*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2016.
- [23] FUSIEK, G., NIEWCZAS, P. “Laboratory investigation of an intensiometric dual FBG-based hybrid voltage sensor”, *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, v. 9634, pp. 96341H, 2015. doi: 10.1117/12.2195025.
- [24] DE NAZARÉ, F. V. B., WERNECK, M. M. “Compact optomagnetic Bragg-grating-based current sensor for transmission lines”, *IEEE Sensors Journal*, v. 15, n. 1, pp. 100–109, 2015. ISSN: 1530437X. doi: 10.1109/JSEN.2014.2337518.
- [25] HAN, J., HU, H., WANG, H., et al. “Temperature-Compensated Magnetostrictive Current Sensor Based on the Configuration of Dual Fiber Bragg Gratings”, *Journal of Lightwave Technology*, v. 35, n. 22, pp. 4910–4915, 2017. ISSN: 0733-8724. doi: 10.1109/JLT.2017.2766119.
- [26] LIU, H., OR, S. W., TAM, H. Y. “Magnetostrictive composite-fiber Bragg grating (MC-FBG) magnetic field sensor”, *Sensors and Actuators, A: Physical*, v. 173, n. 1, pp. 122–126, 2012. ISSN: 09244247. doi: 10.1016/j.sna.2011.11.005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2011.11.005>>.
- [27] HUANG, W., ZHANG, W., ZHEN, T., et al. “A cross-correlation method in wavelet domain for demodulation of FBG-FP static-strain sensors”, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 26, n. 16, pp. 1597–1600, 2014. ISSN: 10411135. doi: 10.1109/LPT.2014.2327969.
- [28] MARTIN, J., OUELLETTE, F. “Novel writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings”, v. 30, n. 10, 1994.

- [29] RUSSO, N. A., NORIEGA, S. B., DUCHOWICZ, R. “Implementación de Sistema Óptico para Grabado de Redes de Bragg en Fibra Óptica Optical System Development for Fiber Bragg Grating Writing”, v. 22, n. 2, pp. 121–130, 2011.
- [30] RODRÍGUEZ, Y. E. B., PÉREZ, G. B., MIXCÓATL, J. C., et al. “Fiber Bragg grating fabrication for the implementation of sensors in the electronics and optoelectronics laboratory at BUAP”, *22nd Congress of the International Commission for Optics: Light for the Development of the World*, v. 8011, n. November 2011, 2011. ISSN: 0277786X. doi: 10.1117/12.901960.
- [31] KAMEYAMA, A., KATT, M., YOKOTANI, A. “A simplified fabrication technique for tilted fiber bragg grating for the simultaneous measurement of refractive index and temperature of liquids”, *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, v. 9, n. 3, pp. 230–233, 2014. ISSN: 18800688. doi: 10.2961/jlmn.2014.03.0009.
- [32] LIMBERGER, H. G., VIOLAKIS, G., SANDOZ, F., et al. “Fabrication of Fiber Bragg Gratings in 40  $\mu\text{m}$  Diameter Low GeO<sub>2</sub>Silica Fiber Using cw-Ar+-Laser”. In: *Optical Fiber Communication Conference and Exhibition/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC)*, 2010. ISBN: 9781557528841. doi: 10.1364/nfoec.2010.jwa22.
- [33] VIOLAKIS, G., LIMBERGER, H. G., MASHINSKY, V., et al. “Strong fiber Bragg gratings in Bi-Al co-doped H<sub>2</sub>-loaded optical fibers using CW-Ar+laser”. In: *2011 Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference*. IEEE, 2011. doi: 10.1364/ofc.2011.otuc3.
- [34] VIOLAKIS, G., LIMBERGER, H. G., MASHINSKY, V. M., et al. “Stability of fiber Bragg gratings fabricated using UV Ar+and ArF excimer in Bismuth-Aluminum-co-doped silica fibers”. In: *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, n. 1, pp. 1–3. OSA, 2014. ISBN: 9781557529930. doi: 10.1109/OFC.2014.6886745.

# Apêndice A

## Material complementar do planejamento experimental

Neste apêndice mostramos o material complementar referente ao tratamento de dados que compõe o planejamento experimental proposto.

Usamos o *software* Statistica com significância  $\alpha = 0,05$  em todas as análises realizadas.

### A.0.1 Amostra 1

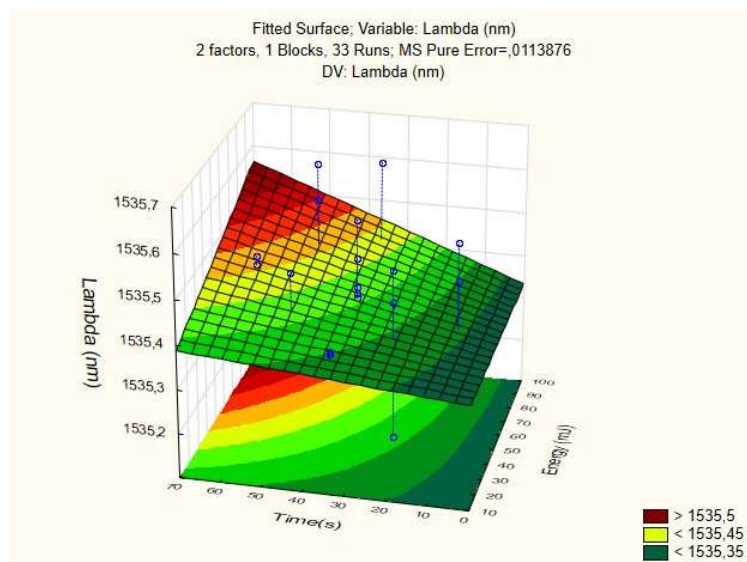


Figura A.1: Superfície de resposta de  $\lambda_{Bragg}$  da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

### A.0.2 Amostra 2

### A.0.3 Amostra 3

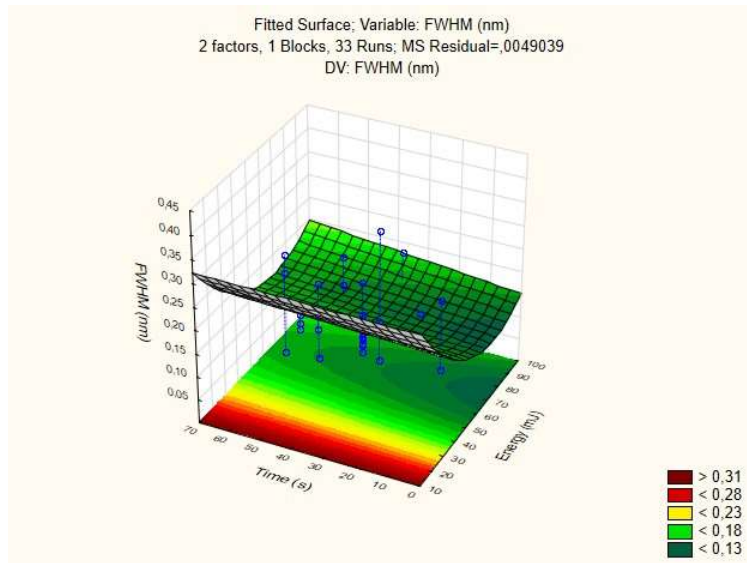


Figura A.2: Superfície de resposta do FWHM da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

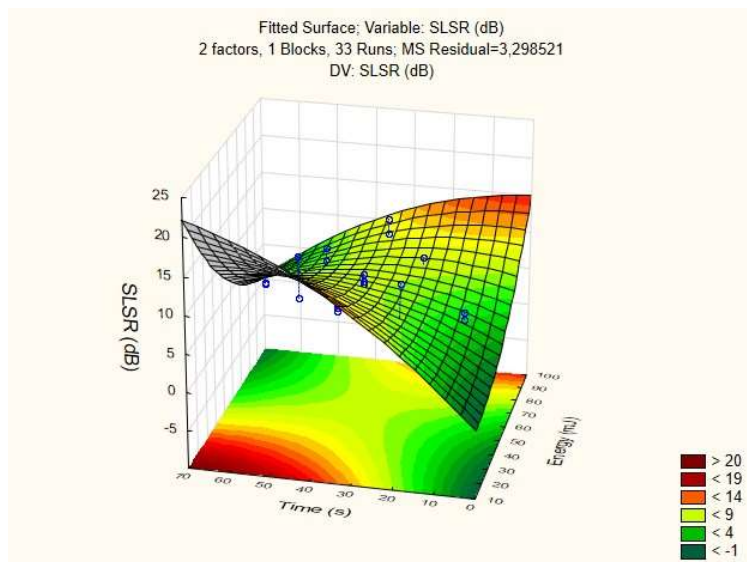


Figura A.3: Superfície de resposta do SLSR da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

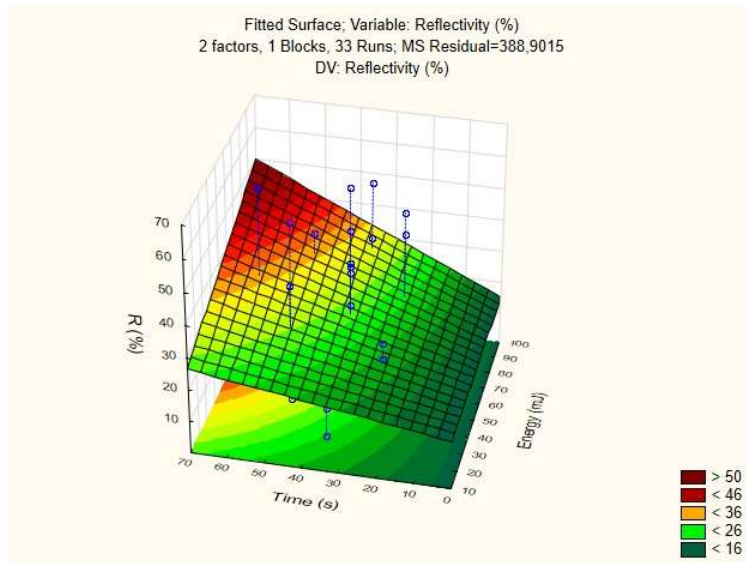


Figura A.4: Superfície de resposta da refletividade da Amostra 1 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

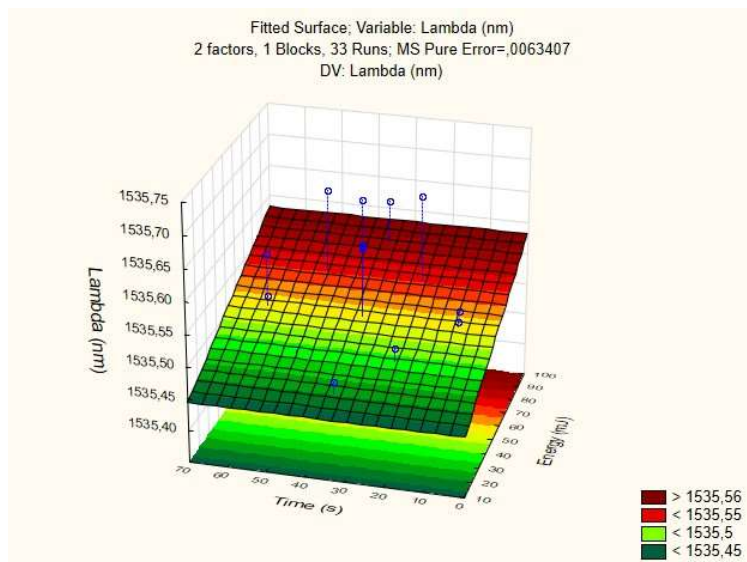


Figura A.5: Superfície de resposta de  $\lambda_{Bragg}$  da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

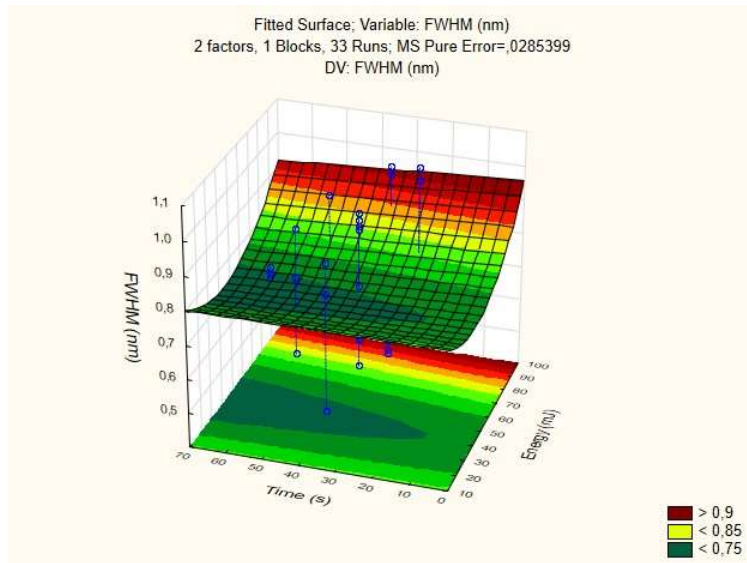


Figura A.6: Superfície de resposta do FWHM da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

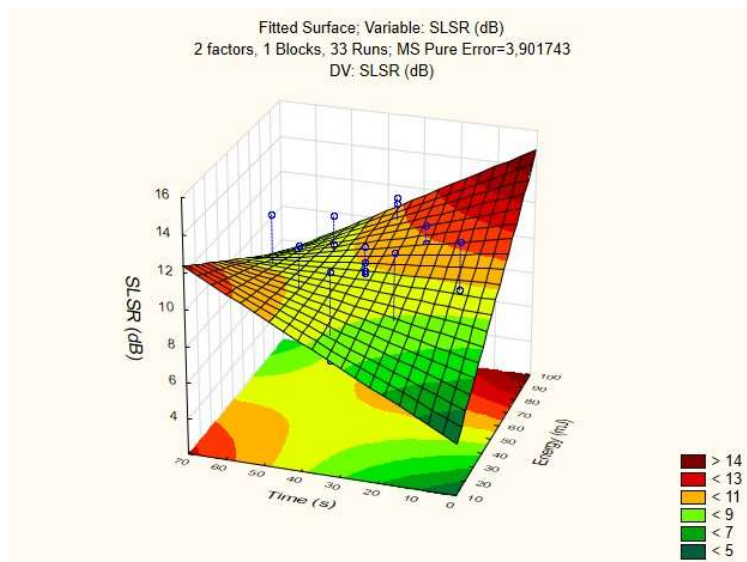


Figura A.7: Superfície de resposta do SLSR da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

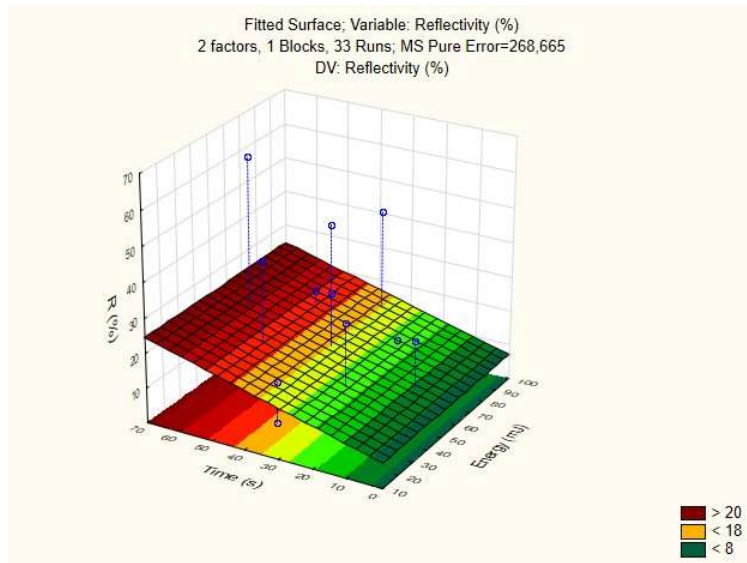


Figura A.8: Superfície de resposta da refletividade da Amostra 2 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

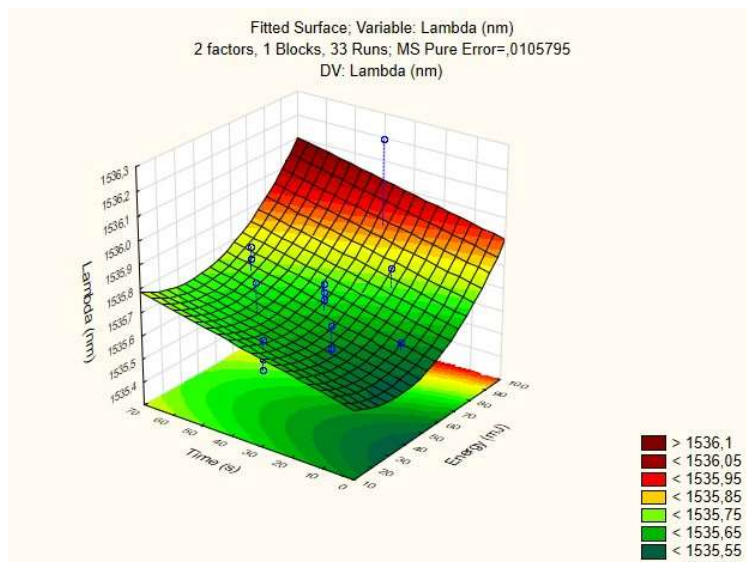


Figura A.9: Superfície de resposta de  $\lambda_{Bragg}$  da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

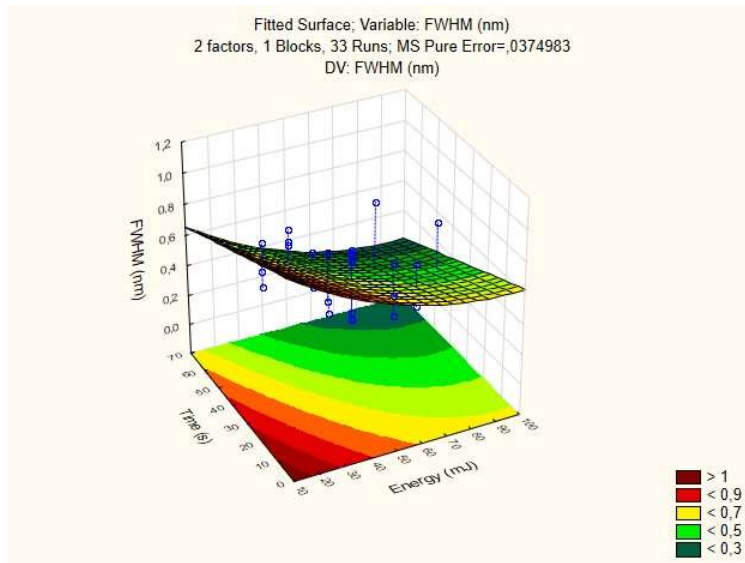


Figura A.10: Superfície de resposta do FWHM da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

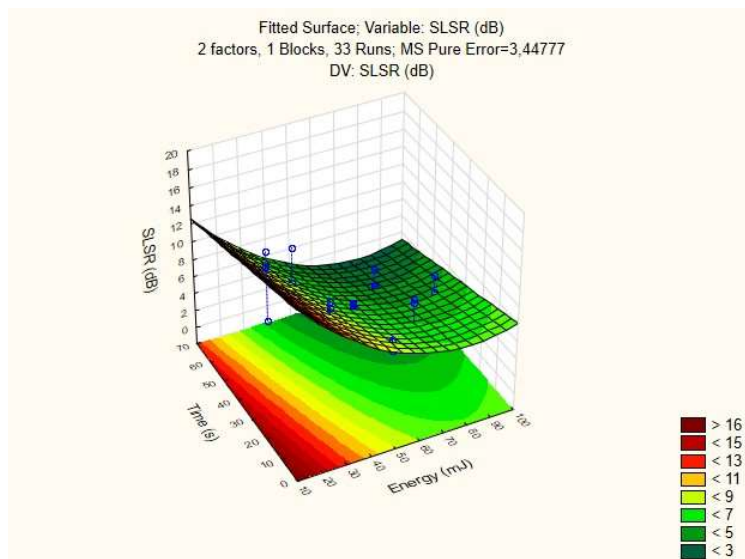


Figura A.11: Superfície de resposta do SLSR da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.



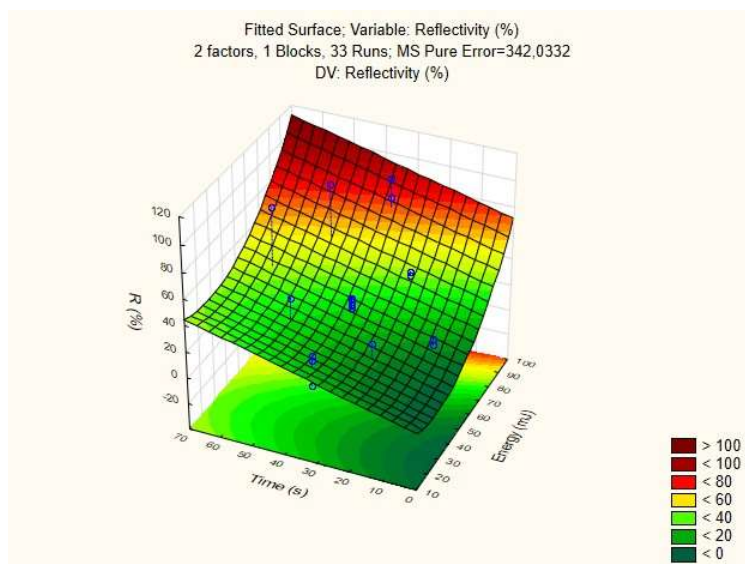


Figura A.12: Superfície de resposta da refletividade da Amostra 3 conforme variação de energia do pulso e tempo de exposição.

# Apêndice B

## Publicações

Neste apêndice apresentamos trabalhos provenientes do avanço dos resultados desta pesquisa.

# Study on the best reflection spectra of FBGs for dynamic sensing

Talitha Trovão<sup>1</sup>, Alex Dante<sup>1</sup>, Juan David Lopez<sup>2</sup>, Cesar Cosenza Carvalho<sup>1</sup>, Regina Celia da Silva Barros Allil<sup>1</sup>, and Marcelo M. Werneck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ 21941-594, Brazil

<sup>2</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Nanotechnology Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, RJ 21941-594, Brazil

**Abstract:** This paper presents a study of FBG reflection spectrum for application in dynamic measurements, such as AC current and voltage. In this work, we show the best reflection spectra of two FBGs employed in a twin-grating interrogation technique that guarantees the best linearity levels possible in the response of the dynamic measurement sensor. © 2019 The Author(s) OCIS codes: 060.3735, 060.2370.

## 1. Introduction

Since its discovery by K. O. Hill et al. in 1978 [1], fiber Bragg gratings (FBG) have been applied as optical sensors to the measurement of several physical variables thanks to their intrinsic sensitivity to mechanical strain and temperature. Some advantages of FBG sensors are immunity to electromagnetic interference, high electrical isolation, no cable-induced noise, and small size. The possibility of multiplexing several sensors in a single optical cable, and the capability of monitoring sensors over long distances are also key features of FBGs, which make them suitable sensors for oil & gas, chemical, aerospace, biomedical, and energy industries [2][3].

Given that the sensitivity of FBGs to strain and temperature is encoded in a characteristic narrowband reflected spectrum of the incident light, the interrogation of these sensors is usually accomplished by either determining the spectral position of the reflected peak in the light frequency domain (first approach), or measuring the intensity of the reflected light modulated by a spectral filter (second approach). Most of the interrogation techniques employing the first approach rely on optical spectral decomposition using fast-scanning tunable laser technology to recover the full spectrum reflected by the sensing FBG [2][4]. These techniques are frequently employed in optical spectrum analyzers (OSAs) as well as in commercial interrogators specifically designed for FBG sensors. These instruments allow for accurate measurements related to FBG sensors, though they are usually very expensive and have limitations when dynamic measurements are needed. For instance, measurements of fast dynamic physical variables with FBG sensors, such as vibration or AC (50–60 Hz) voltage and current, cannot be performed using an OSA. Instead, this task should be performed with high-speed-scanning interrogators that rely on special algorithms to recover the reflected spectra from the FBG sensors in order to track their spectral peak position [5][6]. However, these instruments are still not capable to decouple the cross-sensitivity to strain and temperature intrinsic to FBG sensors. These limitations can be avoided by employing the second approach, in which FBG interrogators are based on the measurement of the optical power reflected by the FBG. These interrogators are usually composed by a photodetector and some passive spectral filter that modulate the reflected optical power of the FBG. This approach is also preferred to achieve cost-effective sensing solutions.

One particular interrogation technique that employs the second approach is the so-called “twin-grating technique”, in which the optical power reflected by a sensing FBG is modulated by a second FBG acting as an edge filter, both FBGs having close Bragg wavelengths ( $\lambda_{\text{Bragg}}$ ). This technique presents some advantages, such as high resolution, especially for FBG sensors applied to AC measurements [7]. However, one limitation of this technique is that the nonlinearities present in the filter FBG spectrum contribute to measurement errors in the output signal of the interrogation system.

In this work, we performed a study of several reflection spectra of FBGs on a LabVIEW™ simulation tool aiming at to identify the best type of FBG spectrum that guarantee the lowest distortion level in the output of a twin-grating interrogation system. We have also manufactured FBG sensors in laboratory in order to perform this study.

## 2. Theoretical Background

### 2.1 Fiber Bragg Grating

An FBG consists of a periodic modulation of the effective refractive index of the fiber core generated by radiation with an appropriate ultraviolet light pattern. When a light beam of a given spectral width propagates through the fiber and reaches the FBG, a very narrow spectral band (centered at the Bragg wavelength,  $\lambda_{\text{Bragg}}$ ) is reflected, while the

other components pass through it without modification. The variation produced in the fiber refractive index, the modulation period and the length of the grating are determining factors for the transmission and reflection properties of each sensor. Mathematically, the  $\lambda_{Bragg}$  is given by Eq. 1 [4]:

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

Where  $n_{eff}$  is the effective refractive index of the fiber core and  $\Lambda$  is the periodicity of the refractive index change.

Since the creation of the first FBGs, researchers have noticed that their spectra, even during inscription, were sensitive to variations in temperature and strain. In fact, there is a direct relation between  $n$  and the periodicity of the change of refractive index  $\Lambda$  with the variations of temperature and strain, according to Eq. 2:

$$\Delta\lambda/\lambda_{Bragg} = (1 - \rho_e)\varepsilon + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (2)$$

Where  $\rho_e$  is the photo-elastic coefficient of the fiber,  $\alpha$  is the coefficient of thermal expansion and  $\eta$  is the thermo-optical coefficient.

## 2.2 Twin-Grating Interrogation Technique for AC Signals

Fig. 1(a) shows a schematic setup diagram of the twin-grating interrogation technique. In this technique, light from a broadband light source (BLS) is guided to a sensing FBG, whose reflection spectrum reaches a filter FBG through an optical circulator. Since both FBGs are optical bandpass filters, the reflected light from the filter FBG is the convolution between both spectra, which is guided to an acquisition system. Any change in the optical power of convolution denotes a relative shift of the Bragg wavelengths of the FBGs. If the sensing FBG is under dynamic strain signals, such as in vibration or AC voltage and current applications, the filter FBG usually tracks the sensing FBG over wavelength shifts in order to compensate for optical power changes due exclusively to temperature [7][8][9][10]. Thus, the optical power signal received by the acquisition system in Fig. 1(a) contains both AC and DC components. The AC signal is directly affected by the nonlinearities present in the transfer function of edge filter implemented by the filter FBG.

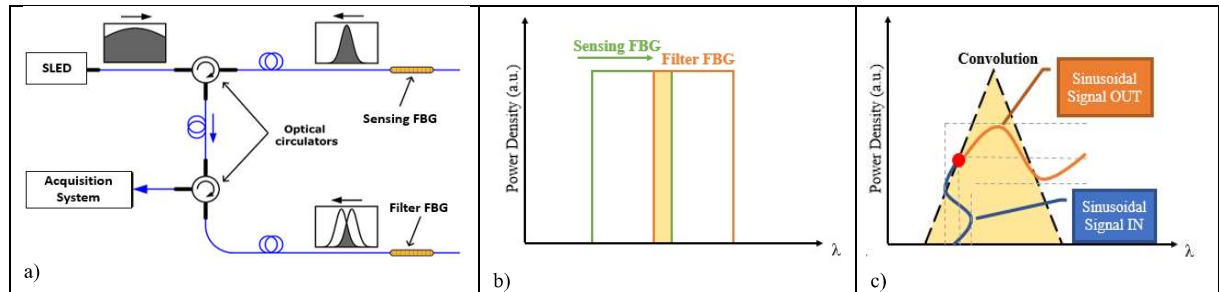


Fig. 1. (a) Schematic diagram of a classic twin-grating interrogation technique experimental setup; (b) Theoretical case of convolution between ideal FBGs; (c) Representation of convolution shape between two ideal FBGs and how does it influence an input sinusoidal signal (Adapted from [7]).

Fig. 1(b) shows a condition/situation in which two hypothetical rectangular-shaped, wavelength-matched FBGs convolute in the frequency domain in a twin-grating interrogation system. In that situation, the sensing FBG is under AC wavelength shift and the filter FBG is fixed on/at a given wavelength. Fig. 1(c) shows schematically the full convolution spectrum originated by the twin FBGs spectra. It can also be seen in Fig 1(c) that, in that hypothetical condition, the interrogation system outputs a perfectly linear signal relative to the input, with sensitivity given by the slope of the convolution function at the operation point (red dot). In real world, however, FBGs do not have such rectangular-shape reflection spectra, and an actual twin-grating interrogation system is in fact a nonlinear system. Thus, the output signal seen in Fig. 1(c) using actual/real FBGs would contain nonlinearities inherent to the spectrum of the filter FBG.

### 3. Experiments

#### 3.1 FBG Fabrication

The experimental setup used to manufacture the FBG sensors is shown schematically in Fig. 2 and consists of a Nd:YAG pulsed laser with two frequency modulators  $2\omega$  and  $4\omega$  (1), a phase mask for 1535 nm (2), a germanium-doped fiber coil (3), an optical circulator, a broadband light source (ASE) (5) and an optical spectrum analyzer (OSA) (6) with a computer software to read the spectrum (7). After the inscription of the FBG in the fiber optic core, we used an Optical Sensing Interrogator (OSI) to extract its reflection spectrum.

For a statistical study, we have manufactured a group of ten FBGs under the same conditions (temperature, UV energy, longitudinal stretch, time of exposition). Each pair of FBGs chosen for the simulation study in this work is statistically different.

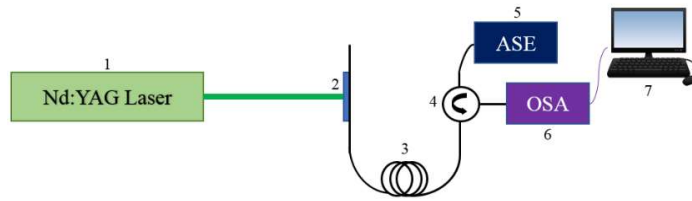


Fig. 2. Experimental setup for FBG fabrication in laboratory.

#### 3.2 Emulation of a Twin-Grating Interrogation System Using LabVIEW

For the analysis of the output response of a twin-grating interrogation system using several pairs of FBGs manufactured in laboratory, we developed a simulation tool in LabVIEW, which control panel is shown in Fig. 3. In the developed software, the discrete-signal spectra of two wavelength-matched FBGs acquired previously in the OSI are read and mathematically convoluted. A subroutine is responsible for emulate a sinusoidal wavelength shift in one of the FBGs (sensing FBG), which simulates a sinusoidal strain signal applied to the sensing FBG, keeping the other (filter FBG) static. The result of this simulation is an AC signal that has AC and DC levels, as expected (“convolution signal output” graph in the control panel of Fig. 3) with acquisition rate of 60Hz. The Fast Fourier Transform of this signal is shown in FFT graph.

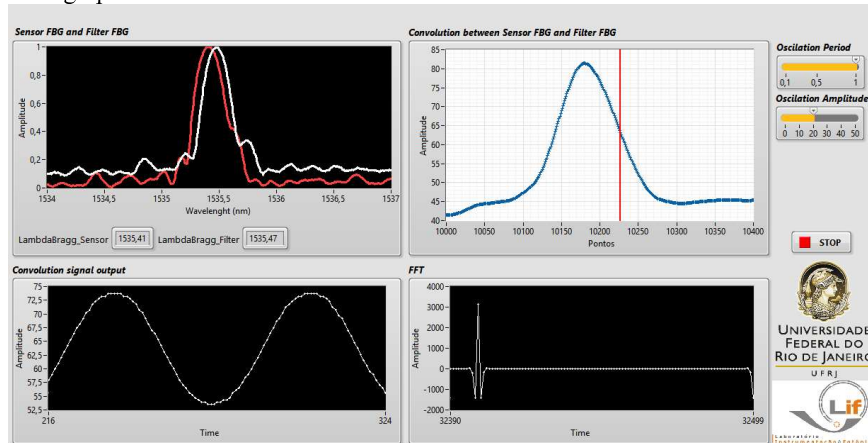


Fig. 3. LabVIEW interface developed.

The developed software allows the user to change the frequency and amplitude of oscillation of the sensing FBG, as well as its spectral position relative to the filter FBG. It is worth to mention that the relative spectral position between both FBG peaks determines the operation point of the interrogation system, which is represented by the vertical red line in the convolution plot of Fig. 3. The red line indicates the point on the convolution plot at which the input sinusoidal signal will be modulated. Thus, the linearity of the output signal will depend on the linearity of the region centered at the red line in the convolution plot. These are important features of the developed software, since the distortion level in the output signal is directly related to these key parameters.

## 4. Results and Discussion

Fig. 4 shows a comparison between the results from the LabVIEW simulation tool for two pairs of twin FBGs manufactured in our laboratory. The pairs are distinguished by the UV energy used in fabrication. Fig. 4 shows: (a) the reflection spectra, (b) the convolution plot, (c) the output AC signal, and (d) discrete Fourier transform (DFT) for the first pair of twin FBGs. The same analysis can be seen in Figs. 4(e)-(h) for the second pair of twin FBGs. Both output signals were acquired using the same parameters in the LabVIEW simulation tool.

It is clear from the qualitative analysis presented in Fig. 4 that the reflection spectra of the first pair of FBGs is the best choice for an FBG sensor applied to AC measurement, since it presented the lowest harmonic distortion, as shown in Fig. 4 (d) and (h). It can also be seen in the results that the best reflection spectra are those with highest side lobe suppression ratio (SLSR), which is one of the main parameters in the fabrication process of FBGs sensors.

The results shown in Fig. 4 allow us to conclude that the output response that presented the lowest distortion is also related to the pair of FBGs that have the highest cross-correlation coefficient (greater than 0,9), which means that the repeatability of the spectra of the FBGs produced in our laboratory is of utmost importance to a twin-grating interrogation system.

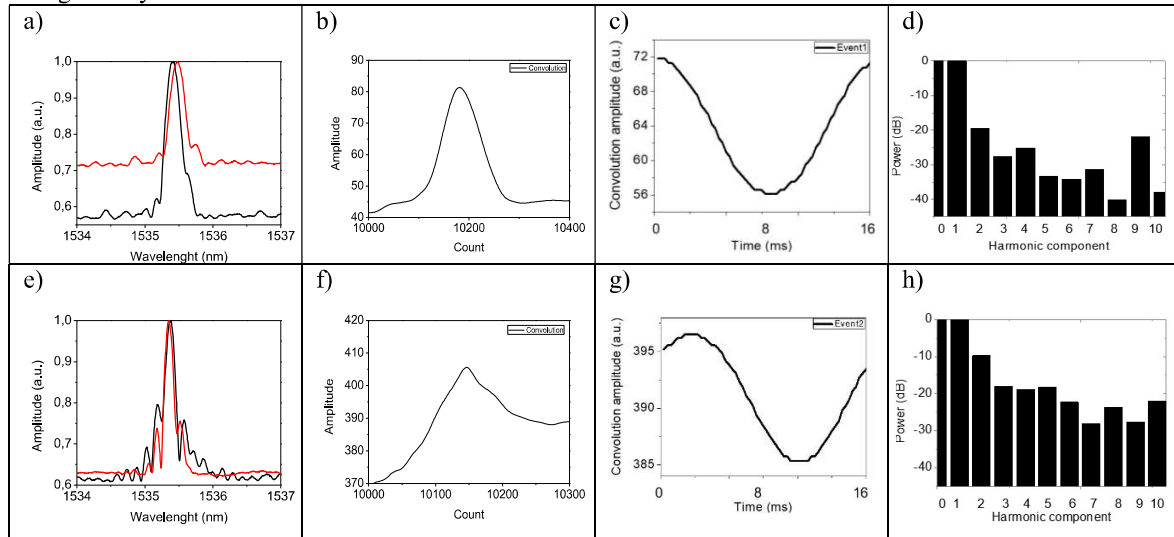


Fig. 4. Reflection spectra of manufactured FBGs, with response under sinusoidal input signal, and spectral responses in function of best tracking point.

The results obtained in this work are helping our research group to optimize critical parameters of the fabrication process of FBGs in laboratory, especially for application in twin-grating interrogation systems. Further experiments are being performed with an actual high-voltage sensor based on FBG that is being interrogated by a twin-grating optoelectronic system.

Future work will include a systematic optimization of our laboratory FBG fabrication process taking into account other parameters, such as exposition time of the optical fiber to UV radiation, energy of UV beam, with the implementation of apodization techniques.

## 5. References

- [1] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson, and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, pp. 647–649, 1978.
- [2] C. E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt, and V. M. N. Passaro, "Fibre Bragg Grating based strain sensors: Review of technology and applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 9, 2018.
- [3] M. M. Werneck, R. C. Allil, and F. V. B. de Nazaré, *Fiber Bragg Gratings: Theory, Fabrication, and Applications*, 1st ed., no. March. Bellingham, WA: SPIE PRESS, 2017.
- [4] R. Kashyap, *Fiber Bragg Gratings*, 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2010.
- [5] J. Cui, Y. Hu, K. Feng, J. Li, and J. Tan, "FBG interrogation method with high resolution and response speed based on a reflective-matched FBG scheme," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, pp. 16516–16535, 2015.

- [6] C. A. R. Díaz, C. Leitão, C. A. Marques, M. F. Domingues, N. Alberto, M. J. Pontes, A. Frizzera, M. R. N. Ribeiro, P. S. B. André, and P. F. C. Antunes, "Low-cost interrogation technique for dynamic measurements with FBG-based devices," *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, pp. 1–10, 2017.
- [7] A. Dante, R. M. Bacurau, A. W. Spengler, E. C. Ferreira, and J. A. S. Dias, "A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 65, no. 11, pp. 2476–2484, 2016.
- [8] B. De Assumpção Ribeiro, M. M. Werneck, and J. L. Da Silva-Neto, "Novel optimization algorithm to demodulate a PZT-FBG sensor in AC high voltage measurements," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 1259–1264, 2013.
- [9] G. Fusiek and P. Niewczas, "Laboratory investigation of an intensiometric dual FBG-based hybrid voltage sensor," in *24th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2015, vol. 9634, pp. H1–H4.
- [10] L. A. Garção, F. V. B. De Nazaré, R. C. Allil, R. Mok, P. Silveira, A. Dante, C. Carvalho, M. Keley, and M. M. Werneck, "Temperature compensation method for FBG-based current sensors for transmission lines," *I2MTC 2018 - 2018 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf. Discov. New Horizons Instrum. Meas. Proc.*, pp. 1–6, 2018.

# Optical Current Sensor Based on Magnetostrictive Composites

Juan David Lopez<sup>1</sup>, Alex Dante<sup>2</sup>, Talitha Trovão<sup>2</sup>, Roberto Wu Mok<sup>2</sup>, Cesar Cosenza Carvalho<sup>2</sup>, Regina Celia da Silva Barros Allil<sup>2</sup>, Fabricio Borghi<sup>3</sup> and Marcelo Martins Werneck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Nanotechnology Engineering Program

<sup>2</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program

<sup>3</sup>Magnetic Nanomaterials Laboratory, Physics Institute

Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ 21941-594, Brazil

<sup>1</sup>lopezjuan@lif.coppe.ufrj.br

**Abstract:** This paper presents a novel compact fiber-optic current sensor (FOCS) based on magnetostrictive composites that employ only 1 gram of Terfenol-D. Finite element method (FEM) simulations supported the design and construction of two versions of FOCS, which were capable to measure on a.c. current from 200 to 800 A<sub>rms</sub> in laboratory.

## 1. Introduction

Terfenol-D (TD) is an alloy of type Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>, which is well-known for its giant magnetostrictive properties. These properties make TD a useful material for magnetic field sensing, which is an application that has been explored [1]. In recent years, fiber Bragg grating (FBG) sensors have been used in association with magnetostrictive materials for the development of magnetic field sensors, stress sensors, and current sensors [1-5]. Coupling TD with an FBG results in a compact current sensor that inherits intrinsic properties of optical fibers, such as immunity to electromagnetic interference (EMI), malleability, high electrical isolation, and the possibility of multiplexing several sensors in one single optical cable.

Fiber optic current sensors (FOCS) based on TD coupled with an FBG have been proposed as the core of optical instrument transformers to monitor transmission and distribution lines in replacement for heavy and large conventional current transformers (CT). In 2013, Cremonesi *et al.* proposed a FOCS with an FBG bonded to a 144-grams solid toroidal core of TD for measurement of a.c. current in the range of 200–900 A<sub>rms</sub> [4]. Since TD presents positive magnetostriction, an external a.c. magnetic field causes it to expand over positive and negative cycles of the sinusoidal field applied, which causes the output signal to be rectified. Using this effect along with external pressure applied to the TD core in order to obtain a quadratic function response, the authors simplified the direct measurement of the rms value of the applied current. In 2015, Nazaré and Werneck reported the development of an FOCS employing an FBG bonded to a 74-gram solid bar of TD [5]. In order to recover the full cycle of the current signal applied, the authors employed a d.c. magnetic biasing to the proposed sensor core by incorporating a series of permanent magnets to the magnetic circuit, which was also composed by the TD bar and Fe-Si plates. In comparison with the FBG-based FOCS proposed by Cremonesi *et al.* [4], the use of magnetic biasing allows for a detailed analysis of the current signal applied, such as harmonic distortion.

However, since TD is a brittle and expensive alloy, the use of a large, solid block of TD for the development of FBG-based FOCS should be avoided. Moreover, the operation of solid TD above a few kilohertz is significantly limited by the presence of eddy-current losses [6,7]. Thus, magnetostrictive composites of TD powder and epoxy resin, instead of using solid TD bars, have been proposed in many applications [8-11]. In 2010, Quintero *et al.* proposed a d.c. and a.c. magnetic field sensing head based on a TD composite, which was manufactured using TD particles in different sizes mixed with epoxy resin with an embedded sensing FBG [8]. In 2012, Liu *et al.* proved that magnetostrictive composites have a wide range of extrinsic magneto-optical signal frequency up to at least 60 kHz for magnetic field measurement [9]. In 2018, Elhajjar *et al.* performed a series of experiments aiming at to reduce cost, size and nonlinearities presented by solid TD [10]. The authors investigated the effects of different sizes of TD-powder composites mixed with several kinds of resins. The authors reported that composites with particles sizing range of 200–300 μm present the higher magnetostriction using a reduced mass of TD. Also, in 2018, Bieler and Werneck reported a magnetic field sensor composed by magnetostrictive TD composite with an embedded FBG applied to detect faults in industrial electric motors [11].

In this work, we present a compact FOCS based on FBG and magnetostrictive composites using TD with oriented magnetic domains for monitoring of a.c. current in transmission lines. Two versions of the proposed FOCS were manufactured and characterized in laboratory with currents from 200–800 A<sub>rms</sub>.



## 2. Proposed Sensor and Experimental Setup

Finite element method (FEM) simulations were performed as a qualitative guidance to the design of the proposed FBG-based FOCS. For the simulations was employed COMSOL Multiphysics version 5.1 with the DC and AC modules. Figs. 1(a) and 1(b) show the simulation results for the magnetic flux density induced by a d.c. current of 500 A into a TD composite ( $\mu_r = 10$ ) coupled to a pair of permanent magnets for Model 1 and Model 2, respectively. Both versions differ in geometry and in the mass of TD employed (2 grams of TD in Model 1 vs. 1 gram of TD in Model 2). As can be seen in Fig. 1(b), Model 2 presents an open-loop configuration that allows an easy installation of the proposed FOCS on the high-voltage cables for current monitoring. Fig. 1 (c) shows the proposed Model 1 and Model 2 assembled with an FBG sensor ( $\lambda_B = 1535.150$  nm) embedded within the magnetostrictive composite. A 3D-printed holder was used to accommodate all parts of the prototype in a robust assembly.

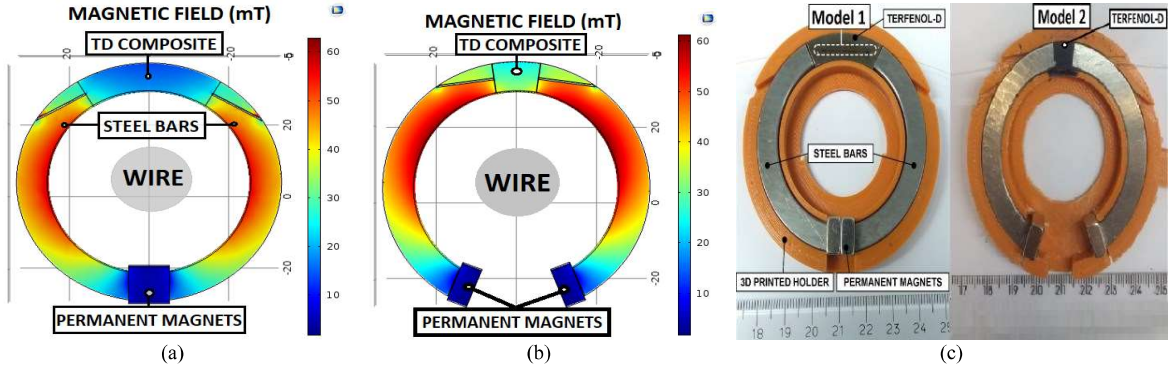


Fig. 1. (a) Model 1, FEM simulation of a d.c. magnetic field in a toroidal core of TD; (b) Model 2, simulation with reduced TD; (c) The proposed FOCS.

Steel bars (99.5% Fe,  $\mu_r = 500$ ) were employed in the proposed FOCS in order to shorten its magnetic circuit, which allowed not only a reduction in the mass of TD used, but also an increase in the magnetic flux density. In order to perform laboratory tests with the proposed FOCS, the setup shown in Fig. 2 was assembled. A current transformer (CT) was employed to induce a.c. current signals of up to 800 A<sub>rms</sub> to the proposed FOCS. A homogeneous mixture of resin (X-120™ adhesive, HBM) with TD powder with grain sizes of 200–300  $\mu\text{m}$  was employed to prepare the magnetostrictive composites. During the curing process, a stepper motor was employed to rotate the prototype in order to guarantee a uniform homogeneity of the composites, during 8 hours. Two magnets having a magnetic field of 160 mT were also employed in the curing process in order to orient the magnetic domains of the composites. X-ray diffraction (XRD) was applied with an X-ray tube of Cuka (MiniFlex, Rigaku) to study the structural composition of the TD powder prior to preparation of the composites.

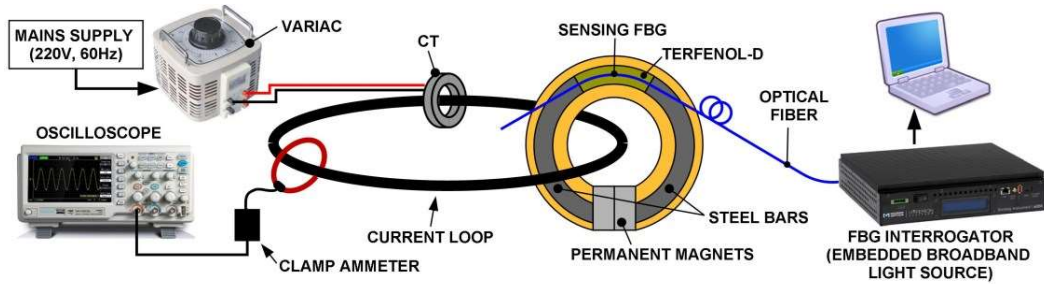


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

## 3. Results and Discussion

The results of the characterization of TD powder by XRD are shown in Fig. 3(a). In this characterization, we found a pattern similar to that described by Meng *et al.* [12], in which the peak corresponding to crystallographic plane  $\langle 111 \rangle$  is directly associate with the magnetostrictive property of TD. In addition, the magnetic domains of the composite were oriented during the curing process, since there is an increases in the intensity of the peak corresponding to the magnetostrictive property, which is proved in the Meng *et al.*[12].The acquisition of the output signals from the proposed FOCS prototypes was performed by an si155 FBG Interrogator (Micron Optics, Inc.) with

a resolution of  $\pm 10$  pm and maximum frequency response of 1kHz. The input signals were acquired by a clamp meter i2000FLEX (Fluke Co.) connected to a digital oscilloscope. Fig. 3(b) shows the full waveforms of the output signals acquired from the FBG interrogator generated by current signals applied in the range of 400–800 Arms. It can also be seen in Fig. 3(b) that the output signals contain distortions due to the wavelength tracking algorithm employed by the FBG interrogator and its resolution. In order to eliminate the observed noise and reconstruct the sinusoidal signal, a sinusoidal fitting was performed using the actual data, shown in fig. 3(c).

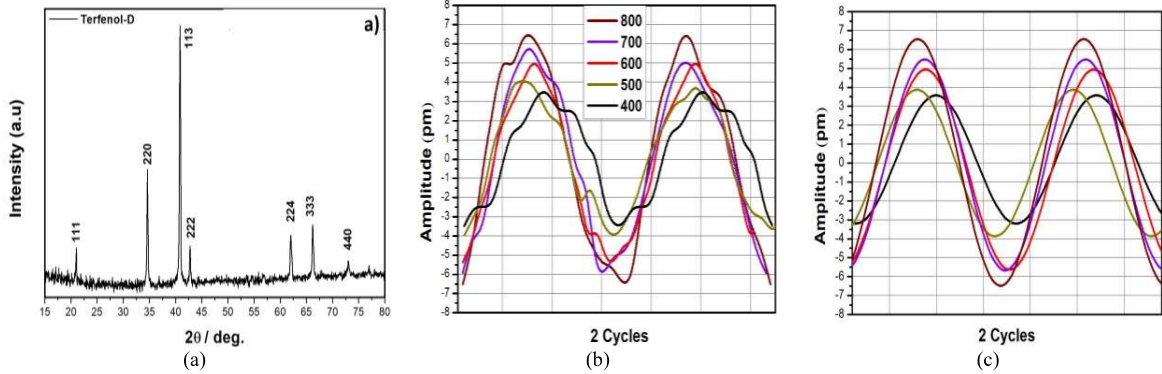


Fig. 3. (a) Results of XRD; (b) Output signals acquired with FBG interrogator from FOCS Model 1; (c) Sinusoidal fitting of the output signals.

Model 1 showed a low sensitivity to current measurement since the amplitude of the output signal was 6.5 pm for a maximum applied current of 800 Arms. According to the results in Figs. 1(a) and (b), FEM simulation showed that the magnetic field in the magnetostrictive composite of Model 1 is approximately 15 mT. In contrast, the magnetic field observed in the magnetostrictive composite of Model 2 was 30 mT, which led us to expect an increase in the sensitivity for Model 2. Although the open-loop design of Model 2 should have weakened the magnetic flux density through the TD composite in comparison to Model 1, the reduced size of the composite block in Model 2 contributed to an increase in the overall magnetic flux density at that point.

Fig. 4(a) shows the results of laboratory tests for Model 2. There was a nine-fold increase in the amplitude of the response, as compared to that of Model 1. Fig. 4(b) shows that the developed FOCS presented a sensitivity of  $0.065 \text{ pm}/A_{\text{rms}}$  for Model 2. In addition, the nonlinear behavior is due to the characteristic magnetostriction of the TD. However, the nonlinearity levels due to the characteristic magnetostriction of TD can be decreased by applying external pressure to the TD, as reported by Cremonesi *et al.* [4]. Moreover, it also can be seen in Fig. 4(b) that Model 1 was not capable to measure current levels lower than 400 Arms. The amplitude of the response of Model 2 is comparable to the result presented by Nazari and Werneck [5], which employed 74 grams of TD. In contrast, Model 2 proposed in this work employed only 1 gram of TD. Thus, Fig. 4(c) shows that an increase in the sensitivity of the proposed FBG-based FOCS was achieved by modifying the geometry of the magnetostrictive composite while reducing the amount of TD used. In addition, it is important to note that a higher resolution in the output of the sensor can be achieved using other interrogation techniques, such as the "twin-grating" technique [13].

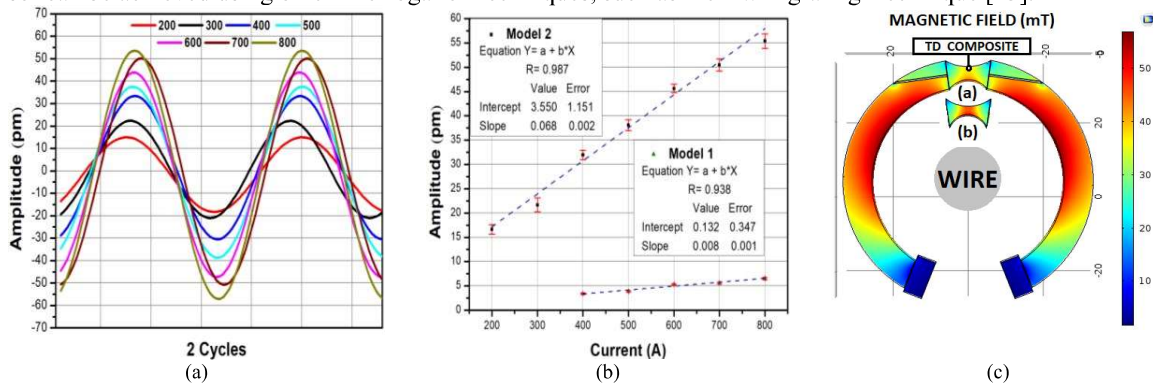


Fig. 4. (a) Model 2, Fit sinusoidal output signals; (b) Linearity characterization of the proposed FOCS; (c) Proposed sensor for future work.

#### 4. Conclusions

The preliminary results achieved in this work allow us to conclude that the proposed sensor was successfully implemented with a mass reduction of TD employed by more than 93% in comparison to the FBG-based FOCS proposed in previous works [4,5].

Therefore, we conclude that the proposed FOCS using magnetostrictive composite can be employed as the sensing head of an optical current transformer for monitoring of high-voltage transmission and distribution lines. Furthermore, the proposed FOCS designs simulated, built and characterized in this work allowed for a reduction in size and cost compared to current sensors proposed in previous works. Moreover, the use of magnetostrictive composites facilitates the manufacture of sensors in several geometry patterns, such as that of the FEM simulation presented in Fig. 4(c), which shows a hyperboloid-shaped composite that maximizes the magnetostriction at the point where the FBG is to be located. Future work will include field tests and temperature characterization of the FBG-based FOCS with the geometries presented in this work.

#### 5. References

- [1] Darrel K. Kleinke and H. Mehmet Uras, "A magnetostrictive force sensor," *Rev. Sci. Instrum.* 65 1699-710, (1994).
- [2] Kin S. Chiang, Ramesh Kancheti and Vipul Rastogi, "Temperature-compensated Fiber-Bragg-grating-based magnetostrictive sensor for dc and ac currents," *Opt. Eng.* 42, 1906-1909, (2003).
- [3] Debashis Satpathi, Jason J. Moore and Mary G. Ennis, "Desing of a Terfenol-D based fiber-optics current transducer," *IEEE Sensor Journal*, 5, 1057-1065, (2005).
- [4] Alcides O. Cremonesi, Elnatan C. Ferreira, Alcino J. B. Filho and Jose. A. S. Dias, "A Fiber Bragg Grating RMS Current Transducer Based on the Magnetostriction Effect Using a Terfenol-D Toroidal-Shaped Modulator," *IEEE Sensor Journal*, Vol. 13, N. 2, (2013).
- [5] Fabio V. B. Nazaré and Marcelo M. Werneck, "Compact Optomagnetic Bragg-Grating-Based Current Sensor for Transmission Lines," *IEEE Sensor Journal*, Vol. 15, N. 1, (2015).
- [6] Stephen C. Butler, "A 2.5 kHz magnetostrictive Tonpilz sonar transducer design," *Proc. SPIE* 4699, 510-521 (2002).
- [7] Geoffrey P. McKnight, "[1 1 2] oriented Terfenol-D composites, PhD." *Thesis*, University of California, Los Angeles, (2002).
- [8] Sully M. M. Quintero, Arthur M. B. Braga, Hans I. Weber, Antonio C. Bruno, and Jefferson F. D. F. Araújo, "A Magnetostrictive Composite-Fiber Bragg Grating Sensor," *Sensors*, Vol. 10, N. 9, 8119-8128 (2010).
- [9] Heliang Liu, Siu W. Or and Hwa Y. Tam, "Magnetostrictive composite-fiber Bragg grating (MC-FBG) magnetic field sensor," *Sensors and Actuators A*, 173, 122-126 (2012).
- [10] Rani Elhajjar Chiu-Tai Law and Alessandro Pegoretti, "Magnetostrictive polymer composites: Recent advances in materials, structures and properties," *Progress in materials science*, 97, 204-229 (2018).
- [11] Geraldo Bieler and Marcelo M. Werneck, "A magnetostrictive-fiber Bragg grating sensor for induction motor health monitoring," *Measurement*, Vol. 122, Pages 117-127 (2018).
- [12] Hao Meng, Tianli Zhang, Chengbao Jiang, and Huibin Xu, "Grain-<111>-oriented anisotropy in the bonded giant magnetostrictive material," *Applied Physics Letters* 96, 102501 (2010).
- [13] Alex Dante, Rodrigo M. Bacurau, Anderson W. Spengler, Elnatan C. Ferreira, and José A. S. Dias, "A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators," *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*, Vol. 65, N. 11, (2016).

# Plastic Fiber Optic for Ultrasensitive Gas Detector Applications

Meysam Keley<sup>1</sup>, Juan David Lopez<sup>2</sup>, Alex Dante<sup>1</sup>, Talitha Trovão<sup>1</sup>, Roberto Wu Mok<sup>1</sup>, Pedro Henrique Romualdo<sup>2</sup>, Fabricio Borghi<sup>3</sup>, Cesar Cosenza Carvalho<sup>1</sup>, Regina Celia da Silva Barros Allil<sup>1</sup> and Marcelo Martins Werneck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program

<sup>2</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Nanotechnology Engineering Program

<sup>3</sup>Magnetic Nanomaterials Laboratory, Physics Institute

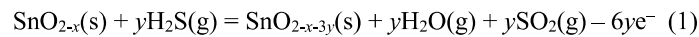
Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ 21941-594, Brazil

<sup>1</sup>meysamkeley@hotmail.com

**Abstract:** In the present study, an ultrasensitive hydrogen sulfide sensor is developed via functionalization of U-shaped Plastic optical fiber. The results of the sensor demonstrate low response time and full recovery while exposed to a gas mixture containing 200 ppm concentration of measured.

## 1. Introduction

Plastic optical fibers (POFs) benefit from their higher mechanical strength, which makes them more flexible than glass fibers to use in toughness-demanded cases. The POFs also possess an extremely large core/cladding size ratio. This factor takes into account when the removal of cladding is required to fabricate a satisfactory sensor. Gas sensors are a subcategory of chemical detectors, which are designated to sense and/or quantify the concentration of one or more gaseous species. Highly increasing demand to detect gases in low concentrations inspires scientists to develop more precise and fast gas sensors. Carbon dioxide concentration, for example, is a good factor to evaluate the air freshness [1]. Taking into account the security issues, detection of inflammable and/or toxic gases, such as methane and hydrogen sulfide, turns a protection tactic against crew fatalities, explosion, and fire incidents on petroleum platforms[2]. Detection of some organic gases such as NO in exhaled breath is an approved pathological method of airway inflammations including asthma [3]. Polycrystalline SnO<sub>2</sub> is fundamental *n*-type semiconductor in gas sensing area principally for reducing gases such as H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, CO, and H<sub>2</sub>S. Under ambient air conditions, (O<sub>2</sub><sup>-</sup>)<sub>ad.</sub> and (O<sup>-</sup>)<sub>ad.</sub> chemisorbed donors are present at the surface of SnO<sub>2</sub>. These species are involved in reversible catalytic oxidation of reducing gases [4]. The X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) spectra gained from a tin oxide sample after exposure to H<sub>2</sub>S demonstrate a S(2s) core level peak at 161 eV binding energy. Consequently, the following reversible chemical reaction is proposed [5]:



The main disadvantages of SnO<sub>2</sub>, other than functional temperature of 400°C, are the poor selectivity and stability of the sensor signal. A SnO<sub>2</sub> sensor doped with 5 wt.% CuO becomes dramatically sensitive to H<sub>2</sub>S at temperatures lower than 200°C. Since H<sub>2</sub>S is an acidic (reducing) gas, its sensitivity increases using basic additives [5]. Like copper oxide, nickel oxide has an outstanding promotion effect in H<sub>2</sub>S sensitivity [6]. These behaviors are attributed to nickel and copper intrinsic affinity to sulfur [7]. Doped SnO<sub>2</sub> gas sensing mechanism can be explained based on semiconductors theory. Considering tin oxide as a matrix, copper oxide aggregations act as a dispersed phase. Oxygen deficient matrix (*n*-type semiconductor) and oxygen rich dispersed phase (*p*-type semiconductor) form a series of *n-p-n* semiconductor set. Consequently a depleted area is formed in matrix–dispersion interface and a potential barrier is established which increases the overall conductivity of the set. Once exposed to H<sub>2</sub>S or any other sulfur containing gas, copper oxide and sulfur undergo a reversible chemical reaction as follows:



Copper monosulfide (CuS) is a moderate conductor of electricity. Therefore, potential barrier which is the result of a *n-p-n* semiconductor set is removed. Moreover, the work function of CuS is several times lesser than SnO<sub>2</sub>. As a result, the bands bending downwards which facilitates the electron flow from CuS to SnO<sub>2</sub> and vice versa [10]. The same mechanism is proposed for NiO/SnO<sub>2</sub> Sensors. However, the point in NiO doping is the operation temperature range that falls in 0 to 150°C [8].

Partial removal of cladding enables the interaction between the light guided through an optical fiber and the surrounding media. The cladding can be either tapered, etched or even side-polished. In some cases, the sensing

procedure functions based on Evanescent Field (EF). As the proportion of light interacting with the surrounding depends on its refractive index, EF-operated sensors are more used with liquid samples (as liquids has more refractive index than gases due to their higher density) [9]. In a more advanced method, gas sensitive thin films substitute partially the cladding. Enabling the light to be influenced indirectly with the test gas [10]. A bent optical fiber sensor, working based on absorption or evanescent field, can achieve a sensitivity order of 70 times higher than a straight form [11]. In two successful works, a U-shaped POF receives sensitive films to detect glucose, ethyl alcohol, and milk quality [12, 13].

In the current study, a new generation of H<sub>2</sub>S gas sensors as developed with the aid of Refractive Index (RI) and Evanescent Field (EF) principles dominant in Plastic Optical Fibers (POF). The U-shaped POFs are functionalized receiving various Pulsed Laser Deposited (PLD) multilayer thin films of CuO and SnO<sub>2</sub>. During exposure to H<sub>2</sub>S, these metal oxides undergo a chemical reaction and/or a physic-chemical surface H<sub>2</sub>S adsorption. Consequently, their physical properties, in general, and optical behavior (refractive index, transmittance, etc), in particular, are altered. The U-shaped POF containing such thin film is coupled to an electro-optical set configured to retrieve signals depending on internal RI and EF. Therefore, any changes in the optical parameters of the thin film may interfere in the output of the fiber. The procedure of fabricating a U-shaped POF sensor through deposition of a thin film sensitive to desired measurand may function for wide range of chemical detection. Therefore, the challenge is to find a substance with affinity to measurand, which is also capable of being deposited on a POF. The optical sensing mechanism can be maintained the same.

## 2. Experimental Setup

The POFs are cut and their cladding is removed. Then, they are bent to gain dimensions reported in Fig. 1. This geometry makes a larger Evanescent Field (EF) in the curvature area. Each U-shaped POF is subjected to Pulsed Laser Deposition (PLD) in order to receive a thin film of SnO<sub>2</sub> and/or CuO. A light propagation (in this case LED) and detection (Photocell) system is used to analyze the behavior of studied optical sensor during H<sub>2</sub>S exposure.

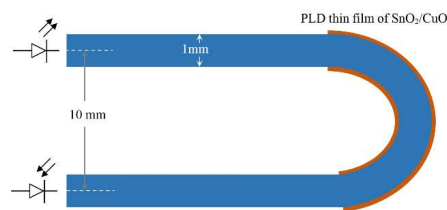


Fig. 1. The geometry of bent area in POF explored in the current work. The thin films of metal oxides are deposited on curved part of optical fiber equipped with light propagation (LED) and detection components (Photocell).

The laser used to perform PLD procedure has a pulse frequency of 10 Hz and a wavelength of 553 nm (2 $\Omega$  from Nd-YAG source). Its energy is adjusted to meet 50 mJ/cm<sup>2</sup> per pulse. The pressure of deposition chamber is kept to be 2.5 $\times$ 10<sup>-5</sup> mbar (Fig. 2)

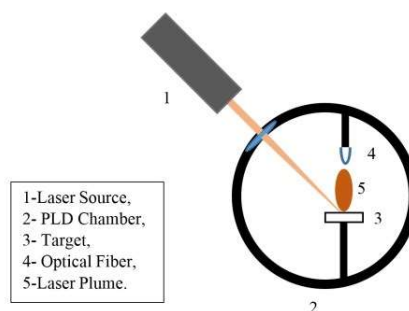


Fig. 2. Schematic of Pulsed Laser Deposition chamber.

A controlled atmosphere chamber capable of gas purge in controlled flow is developed to simulate the H<sub>2</sub>S exposure and record possible changes in optical energy transmitting through optical fiber-thin film set (Fig. 3).

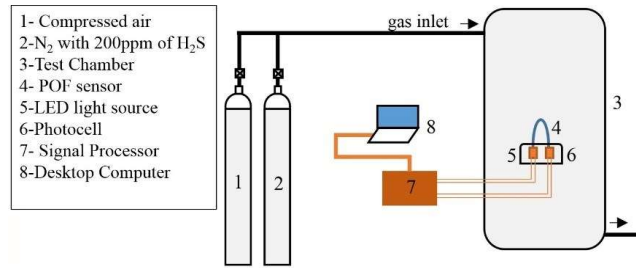


Fig. 3. Schematic exposure to hydrogen sulfide test chamber. The sensor is subjected to an atmosphere containing a maximum concentration of 200ppm H<sub>2</sub>S. Then the fresh air is injected to reset the procedure.

In order to have a reference film morphology free of POF roughness and curvature, a standard silicon wafer, with <100> crystal growth direction, is used as a substrate. The Si plate is cut in 1×1 cm<sup>2</sup> dimensions and subjected to PLD CuO deposition for 30 min. The sample then is analyzed using JPK<sup>®</sup>(NanoWizard<sup>®</sup>) Atomic Force Microscopy in “intermittent contact” mode and topography channel.

According to literature, SnO<sub>2</sub> doped with CuO demonstrates an excellent performance while the former has a matrix role and the latter forms a dispersed phase. Consequently, single layers of SnO<sub>2</sub> and CuO as well as SnO<sub>2</sub>/CuO hybrid thin films are deposited and tested. To fabricate the multilayer thin film, the POF is undergone through subsequent changing of the target (Pure SnO<sub>2</sub> and CuO disks) in a single PLD run. The best results are achieved in a deposition cycle containing a step of SnO<sub>2</sub> deposition for 55 seconds followed by a CuO deposition for 5 seconds. The mentioned cycle is repeated 10 times.

### 3. Results and Discussion

AFM images indicate that the PLD thin films produced containing a homogeneous structure accompanied with distinguishable circular droplets with diameter variety falling in 100 to 500 nm range (Fig. 4).

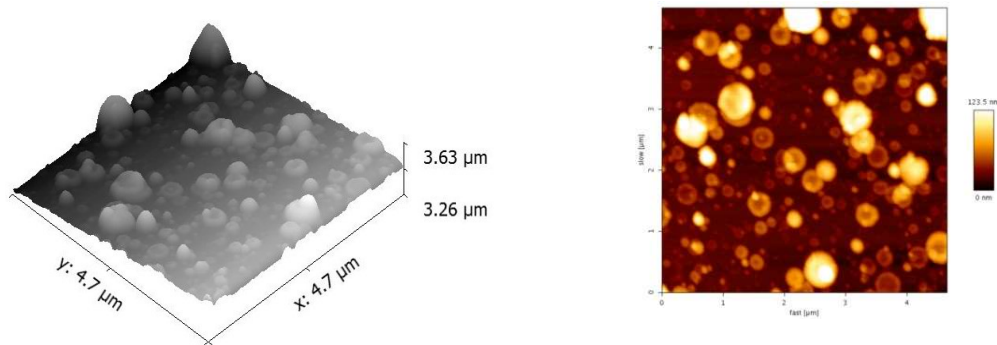


Fig. 4. AFM images of the PLD CuO thin film deposited on a standard Silicon substrate. Left) 3D and Right) 2D topography demonstration of the film. It contains a uniform ultrathin film underneath a set of nanometric sized isolated spherical-shaped islands (typical morphology of PLD films).

After receiving the thin film, each POF probe is mounted in H<sub>2</sub>S testing chamber at room temperature. the Infrared wavelength LED light source connected to one end of the fiber emits a constant light quantity and the Photocell connected to another side (see the Fig. 1) transforms it to voltage (in mV). Any attenuation during exposure to H<sub>2</sub>S is attributed to refractive index modification in the sensitive thin film. In order to normalize the intensity of transmitted light and relate it to the effect of H<sub>2</sub>S on the Refractive Index of the thin film and Evanescent Field of the POF, the following equation is used:

$$signal (\%) = \frac{y_0 - y_t}{y_0} \times 100 \quad (3)$$

Where:

$y_0$  is the steady state light transmitted and detected by photocell through the POF called as yield (in mV);

$y_t$  is the yield in time  $t$  while the test is running.

A common testing procedure for this class of sensors involves a set of cycles including purging of Nitrogen with a 200ppm concentration of  $H_2S$  and fresh air, respectively. These cycles simulate the occurrence of  $H_2S$  leakage in, for example, refinery plant. The POF containing a straight  $SnO_2$  thin film demonstrates no sensibility to measurand. This observation may be attributed to the fact that the functional temperature of undoped  $SnO_2$  is higher than  $400^\circ C$ . The U-shaped POF which receives a thin film of  $CuO$  demonstrates excellent sensitivity with high signal. However, poor reversibility. Actually the sensor functions for only two cycles (Fig. 5). The phenomenon can be related to intrinsic affinity of copper to sulfur and an irreversible reaction transforms it permanently to  $CuS$  (see equation 2).

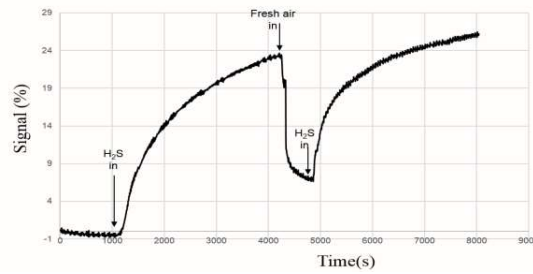


Fig. 5. The graph of a partially reversible sensor.

Finally, the U-shaped POF functionalized with the hybrid  $SnO_2/CuO$  multilayer thin film is tested in which the sensor undergoes three cycles and its response is recorded (Fig. 6). According to this test, the response time of the developed sensor falls in 80-100 seconds. It also demonstrates that the maximum signal is about 2%. The sensor demonstrates total reversibility after 3 cycles.

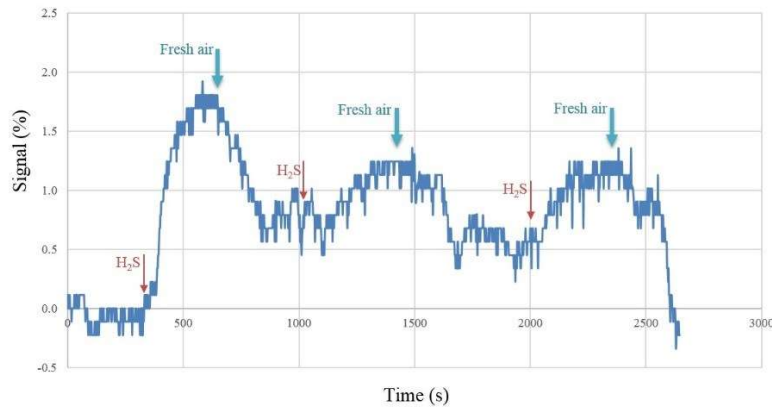


Fig. 6. The signal vs. time curve of developed sensor during a  $H_2S$  leakage simulation. The red arrows mark the moment of measurand (200ppm of  $H_2S$  in  $N_2$ ) injection to chamber. While the blue ones are marking fresh air purging.

#### 4. Conclusions

A new generation of  $H_2S$  gas sensors is developed and tested successfully at room temperature. Being an optic appliance, the sensing part is free of electrical charge. Consequently, it can be installed in sites at which there is a large demand of security against explosion. Thanks to its operational temperature, the sensor is free of any heating apparatus that used to be mandatory in conventional  $H_2S$  sensing setups. Its confirmed sensibility falls in orders of 100 ppm of the mentioned gas. The experiment revealed that the POF functionalized with hybrid  $SnO_2/CuO$  multilayer thin film undergoes a remarkable change in signal as it is exposed to  $H_2S$  in ppm concentration orders.

More studies are needed to measure exact reversible exposure limit of the sensor. Additionally another hybrid thin films may be studied, as well as other geometries than U-shape.

## Acknowledgements

The authors acknowledge support from Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) through the post-doctorate fellowship. This work was also financially supported by PETROBRAS, whose guidance and assistance are gratefully acknowledged.

## 5. References

- [1] A. Schieweck, *et. al.*, “Smart home and the control of indoor air quality”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 94, 705–718 (2018).
- [2] K. V. D. Ambeth, “Human security from death defying gases using an intelligent sensor system”, *Sensing and Bio-Sensing Research* 7, 107–114 (2016).
- [3] R. A. Dweik, *et. al.*, “An official ATS clinical practice guideline: interpretation of exhaled nitric oxide levels (FENO) for clinical applications”, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 184(5), 602–615 (2011).
- [4] C. E. Simons, O. G. Florea, A. Stanoiu, “Gas sensing mechanism involved in H<sub>2</sub>S detection with NiO loaded SnO<sub>2</sub> gas sensors”, *Romanian Journal of Information Science and Technology* 20, 415–425 (2017).
- [5] T. W. Capehart, S. C. Chang, “The interaction of tin oxide films with O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S”, *Journal of Vacuum Science and Technology* 18, 393–397 (1981).
- [6] J. Liu, X. Huang, *et. al.*, “H<sub>2</sub>S detection sensing characteristics of CuO/SnO<sub>2</sub> sensor”, *Sensors* 3, 110–118 (2003).
- [7] W. G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A. K. Biswas, “Extractive metallurgy of copper” 4<sup>th</sup> edition, 2002, Pergamon.
- [8] M. Kaur, *et. al.*, “RF sputtered SnO<sub>2</sub>:NiO thin films as sub-ppm H<sub>2</sub>S sensor operable at room temperature”, *Sensors and Actuators B*, 242, 389–403 (2017).
- [9] H. Waechter, *et. al.*, “Chemical sensing using fiber cavity ring-down spectroscopy”, *Sensors (Basel)*, 10(3) 1716–1742 (2010).
- [10] L. Biro, *et. al.*, “Optical sensors based on plastic fibers”, *Sensors*, 12184–12207 (2012).
- [11] S. Tao, L. Xu, J. C. Fanguy, “Optical fiber ammonia sensing probes using reagent immobilized porous silica coating as transducers”, *Sensors and Actuators B* 115, 158–163 (2006).
- [12] C. Zhang, *et. al.*, “U-bent fiber optic SPR sensor based on graphene/AgNPs”, *Sensors and Actuators B: Chemical* 251, 127–133 (2017).
- [13] G. Annasamy, *et. al.*, “U-bent plastic optical fiber probes as refractive index based fat sensor for milk quality monitoring”, *Optical Fiber Technology* 47, 15–20 (2019).



# A Compact FBG-based Toroidal Magnetostrictive Current Sensor with Reduced Mass of Terfenol-D

Alex Dante<sup>1</sup>, Juan David Lopez<sup>2</sup>, Talitha Trovão<sup>1</sup>, Roberto Wu Mok<sup>1</sup>, Cesar Cosenza Carvalho<sup>1</sup>, Regina Celia da Silva Barros Allil<sup>1</sup>, and Marcelo M. Werneck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ 21941-594, Brazil

<sup>2</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Nanotechnology Engineering Program, Federal University of Rio de Janeiro, RJ 21941-594, Brazil  
[alex@lif.coppe.ufrj.br](mailto:alex@lif.coppe.ufrj.br)

**Abstract:** This paper presents a novel fiber optic current sensor based on FBG and Terfenol-D that employs only 5.6 grams of the alloy for monitoring of currents of up to 650 A<sub>rms</sub> in high-voltage transmission lines. © 2019 The Author(s). OCIS codes: 060.2370, 130.6010.

## 1. Introduction

Fiber optical current sensors (FOCS) have been employed for monitoring transmission and distribution lines in replacement for conventional, heavy electromagnetic current transformers (CTs). In recent years, fiber Bragg grating (FBG) sensors have been employed in association with magnetostrictive materials for the development of FBG-based FOCS [1-4]. FBG sensors inherit intrinsic properties of optical fiber, such as immunity to electromagnetic interference (EMI), malleability, high electrical isolation, and the possibility of multiplexing several sensors in one optical cable. Therefore, FBG-based FOCS have advantages over conventional CTs, such as being lighter and more compact, allowing for a cost reduction and, ultimately, a reduced substation footprint. Because of its well-known giant magnetostriction, Terfenol-D (TD), an alloy composed of Tb<sub>x</sub>Dy<sub>1-x</sub>Fe<sub>2</sub>, has been employed in association with FBGs for the development of FOCS.

In 2013, Cremonesi *et al.* proposed FOCS with an FBG bonded to a solid, 144-grams toroidal core of TD for measurement of a.c. current in the range of 200-900 A<sub>rms</sub> [3]. However, the use of a solid, large block of TD is a disadvantage, since this is a fragile, brittle and expensive alloy. In 2015, Nazaré and Werneck reported the development of an FBG-based FOCS employing a solid rod of TD using 74 grams of the alloy. It is well known that TD presents a positive magnetostriction, thus an external a.c. magnetic field causes it to expand over positive and negative cycles of the sinusoidal field applied. In an FBG-based FOCS, this effect causes the output signal to be rectified, as shown by Cremonesi *et al.* [3]. In order to prevent this effect, Nazaré and Werneck incorporated a series of permanent magnets to the magnetic circuit, which was also composed by the TD rod and Fe-Si plates [4]. In this work, we demonstrate a proof of concept for a novel, compact FBG-based toroidal magnetostrictive FOCS using only 5.6 grams of TD with enhanced sensitivity per gram of TD compared to previous works.

## 2. Proposed Sensor and Experimental Setup

In order to reduce drastically the mass of TD employed, finite element method (FEM) simulations were performed as a qualitative guidance to the design of the proposed FOCS. Fig. 1(a) shows the simulation results for the magnetic flux density induced by a d.c. current of 500 A into a solid TD ( $\mu_r = 10$ ) toroid coupled to a pair of permanent magnets. Fig. 1(b) shows the results of the simulation for a novel the proposed design, in which the TD bar was reduced to almost 1/6 of the size used in the previous simulation. Fig. 1(c) shows the assembled FOCS with an FBG sensor ( $\lambda_B = 1544.250$  nm) bonded to the surface of the TD bar. A 3D-printed holder was employed to accommodate all the parts of the prototype together.

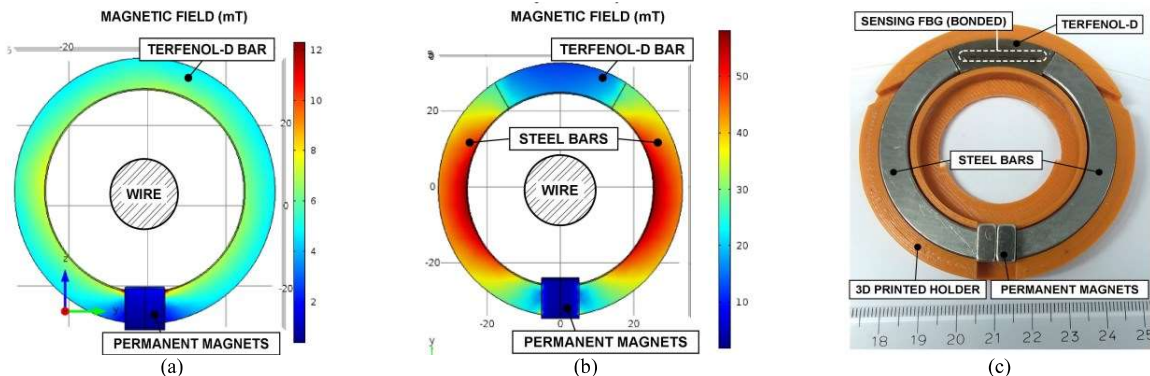


Fig. 1. (a) FEM simulation of a d.c. magnetic field in a toroidal core of TD; (b) Same simulation in the proposed FOCS; (c) The proposed FOCS.

Steel bars (99.5% Fe,  $\mu_r = 500$ ) were introduced in order to short the magnetic circuit, which allowed not only a reduction in the mass of TD used, but also an increase in the magnetic flux density in the alloy by a factor of 3.5. In order to perform laboratory tests with the proposed FOCS, the setup shown in Fig. 2 was assembled. A current transformer (CT) was employed to induce a.c. current levels of up to 800 A<sub>rms</sub> to the proposed FOCS.

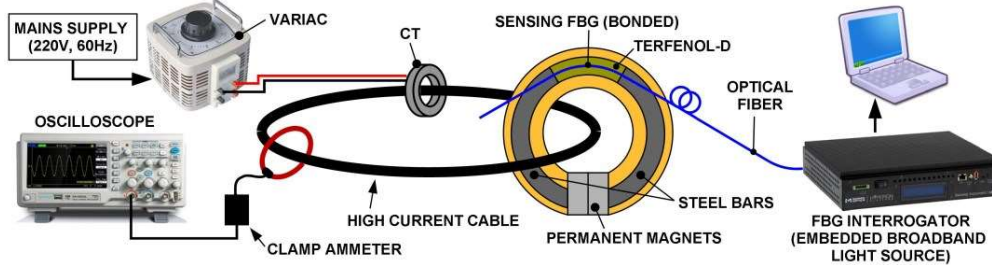


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup.

### 3. Results and Discussion

The acquisition of the output signals from the FOCS prototype was performed by an si155 FBG Interrogator (Micron Optics, Inc.) with a resolution of  $\pm 10$  pm. The input signals were acquired by a clamp meter i2000FLEX (Fluke Co.) connected to a digital oscilloscope. Fig. 3 shows the results of laboratory tests.

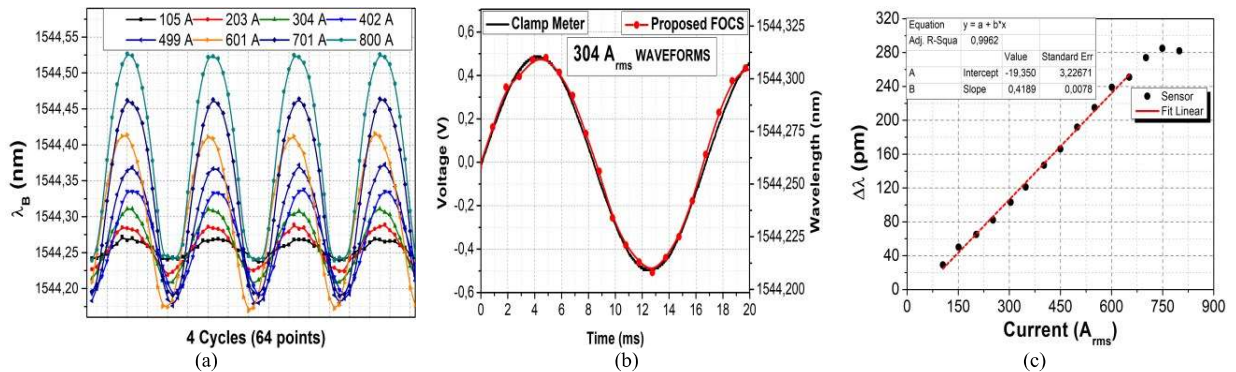


Fig. 3. (a) Output signals acquired with FBG interrogator; (b) Comparison between output and input signals for a current of 499 A<sub>rms</sub>; (c) Linearity characterization of the proposed FOCS.

Fig. 3(a) shows full waveforms of the current signals applied in the range 105–800 A<sub>rms</sub>. For a better view of the matching between output and input signals, Fig. 3(b) shows both waveforms for the 304 A<sub>rms</sub> input, which is a frequent current level in high-voltage transmission lines. Fig. 3(c) shows that the developed FOCS presented a sensitivity of 0.42 pm/A<sub>rms</sub>. Based on the resolution of the interrogator employed (10 pm), the FOCS presented an error of 4.5% in the range measured. It is important to note that an increased resolution can be achieved by employing other interrogation techniques, such as the “twin-grating” technique [5]. Fig. 3(c) also shows that, for currents higher than 650 A<sub>rms</sub>, the linearity is drastically degraded because the TD reached the saturation region. In addition, the nonlinear behavior of the experimental data shown in Fig. 3(c) is due to the characteristic magnetostriction of the TD. However, the nonlinearity levels observed can be decreased by applying external pressure to the TD, as reported by Cremonesi *et al.* [3] and others. This technique should also decrease the delay of the output signal due a decrease in the hysteresis effect of the TD. The preliminary results achieved in this work allow us to conclude that the proposed FOCS was successfully implemented with a reduction of mass of TD employed by more than 90% in comparison to the FOCS proposed in previous works [3,4]. Therefore, we conclude that the proposed FOCS can be employed as the sensing head of an FOCS for monitoring of high-voltage transmission and distribution lines. Further development of the proposed FOCS includes the use of a magnetostrictive composite of TD and epoxy resin instead of solid TD, as some studies reported that composites allow for better linearity levels and can be easily molded [6].

### 4. References

- [1] Mora *et al.* SENSORS AND ACTUATORS A: PHYSICAL, Vol. 125, N. 2, (2006).
- [2] Thomas *et al.* PROC. IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY TRANSM. AND DISTR. CONFERENCE, Vol. 125, N. 2, (2016).
- [3] Cremonesi *et al.* IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 13, N. 2, (2013).
- [4] Nazaré and Werneck. IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 15, N. 1, (2015).
- [5] Dante *et al.* IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, Vol. 65, N. 11, (2016).
- [6] Meng *et al.* APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 102501 (2010).

# Magnetic field sensor based on FBG and magnetostrictive composites of Terfenol-D with oriented magnetic domains

Juan David Lopez<sup>1</sup>, Alex Dante<sup>2</sup>, Talitha Trovão<sup>2</sup>, Roberto Wu Mok<sup>2</sup>, Cesar Cosenza Carvalho<sup>2</sup>, Regina Celia da Silva Barros Allil<sup>2</sup>, Fabricio Borghi<sup>3</sup> and Marcelo Martin Werneck<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Nanotechnology Engineering Program, <sup>2</sup>Photonics and Instrumentation Laboratory, Electric Engineering Program, <sup>3</sup>Magnetic Nanomaterials Laboratory, Physics Institute Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ), RJ 21941-594, Brazil.

[lopezjuan@lif.coppe.ufrj.br](mailto:lopezjuan@lif.coppe.ufrj.br)

**Abstract:** This paper presents a study of magnetostrictive composites for magnetic field sensing with FBG and Terfenol-D. Experimental results show that orientation of magnetic domains with permanent magnets promoted an improved linearity of the sensor response. © 2019 The Author(s).  
OCIS codes: 060.2370, 130.6010.

## 1. Introduction

Terfenol-D (TD) is an alloy of type  $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$  that expands when subjected to magnetic fields. Due to its positive magnetostrictive effect, this alloy can be used for sensing of magnetic field and current. In 2013, Cremonesi *et al.*[1] proposed a solid toroidal core of TD with a fiber Bragg grating (FBG) bonded to it for measurement of a.c. current up to 900 A<sub>rms</sub>. Since TD has a nonlinear response with magnetic field, the authors employed an external ring to generate pressure over the TD core in order to get a linear behavior. However, the effect of pressure reduced the sensor sensitivity. Furthermore, a solid TD presents several disadvantages such as, high cost and fragility. In 2018, Elhajjar *et al.* [2] performed a series of experiments aiming at to reduce cost, size and nonlinearities presented by solid TD. The authors investigated the effects of different sizes of TD-powder composites mixed with several kinds of resins. The authors reported that composites with particles sizing range of 200-300  $\mu m$  had the higher magnetostriction using a reduced mass of TD. In the same year, Bieler and Werneck [3] reported a magnetostrictive TD composite to detect faults in industrial electric motors. The authors employed an FBG inside the composite, since the mechanical deformation is transferred to the FBG shifting its Bragg wavelength ( $\Delta\lambda_B$ ).

In this work, we present a comparative study between two FBG-based magnetic field sensors, one using a solid rod of TD, and the other using a magnetostrictive composite of TD and resin with oriented magnetic domains, both having the same size. We proved that a linear response can be obtained without generating external pressure using FBG-based sensors with TD-composites weighing only 12.5% of the rod mass.

## 2. Experimental Setup

Fig. 1a shows the process employed to fabricate the sensors with TD composites. First, a two-pieces mold was fabricated in a 3D printer. The printed mold had a  $\varnothing 3$  mm x 16 mm cylindrical cavity for the casting of the TD composites, and two 10 x 10 x 5 mm<sup>3</sup> cavities for the permanent magnets employed. We used four types of resins and two sizes of TD grains (200-700  $\mu m$  and 200-300  $\mu m$ ) to prepare the composites. A stepper motor was employed to guarantee a uniform homogeneity of the composites during the curing process of the sensors, which lasted 8 hours. Two magnets having a magnetic field of 160 mT were employed in order to orient the magnetic domains of the composites during the curing process.

The hardness of the resins were also measured using a Shore-D durometer (Hardness Type D-2, USA). X-ray diffraction (XRD) was applied with an X-ray tube of  $CuK_{\alpha}$  (MiniFlex, Rigaku) to study the structural composition of the TD powder prior to preparation of the composites. The response of the sensors ( $\Delta\lambda_B$  shifts) was obtained with a Si155 FBG interrogator (Micron Optics, Inc.) by positioning the prototypes near a permanent magnet, previously characterized with a 455 DSP Gaussmeter (LakeShore, Inc.), as shown in Fig. 1b. For the sensor using a solid rod of TD, an FBG was bonded to the 4 x 16 mm<sup>2</sup> surface of a 4 x 4 x 16 mm<sup>3</sup> rod of TD weighing 1.6 g.

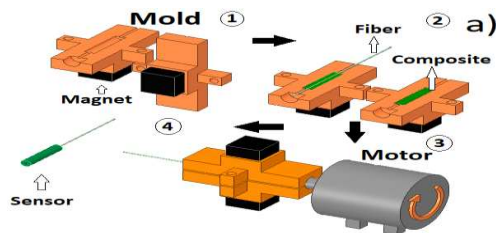


Fig. 1a. Fabricate of the sensors.

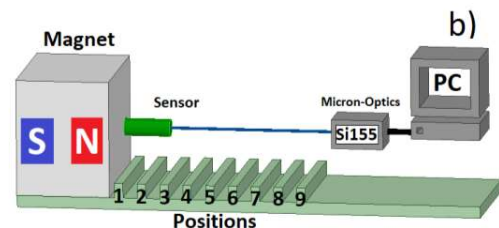


Fig. 1b. Sensor tests with magnet.

### 3. Results and Discussion

In this study, we fabricated seven sensors with magnetostrictive composites and their response to magnetic field was compared with the bar sensor. The sensors were divided into two groups, as shown in Tables 1 and 2. Before the fabrication of the sensors, the hardness of the resins was measured at five different points. The results of the average hardness values are reported in Table 2, and the results of the TD powder characterization by XRD are shown in Fig. 2a. In this characterization, we found a pattern similar to the one reported by Meng *et al.* [4], in which the plane 111 is correspondent to the magnetostrictive property of TD. The magnetic domains of the composite sensors were oriented during the curing process because it increases the intensity of the plane 111 [4].

Table 1. Experimental Setup Group 1

Sensor	Oriented	Vacuum	Resin
S1	Not	Not	X120
S2	Yes	Not	X120
S3	Yes	Yes	X120
Bar	Not	Not	Super Bonder

Table 2. Experimental Setup Group 2

Sensor	Resin	Hardness
S4	Resin 031, Hardener 042	72,2
S5	X120	72,6
S6	Resin 031, Hardener 012	74,2
S7	Scotch 3M	47,4

The mass of the composite sensors from Group 1 was 0.4 g, which is equivalent to 25% of the bar mass. The size of the grains used was between 200-700  $\mu\text{m}$ . When subjected to a magnetic field, sensor S1 did not respond immediately, but only after several attempts, which we believe was due to a delay in the process of orientation of the magnetic domains. However, since we aim at the development of an optical magnetic field sensor with fast response, the results of sensor S1 were discarded. According to Fig. 2b, which shows the results of Group 1, S2 sensor presented the highest  $\Delta\lambda_B$ . In addition, S3 sensor did not respond to magnetic fields less than 18 mT.

Group 2 of sensors was prepared with a grain size of 200-300  $\mu\text{m}$ , different resins, and 0.2 g of TD powder each, using the same parameters of S2 sensor, since it presented the best result. Fig. 2c shows the results of the sensors from Group 2, where it can be seen that, by decreasing the mass of TD and the size of the grains used, better levels of linearity were obtained. We also found that the sensors S4 and S5 presented the best linearity levels. S7 sensor, fabricated with resin of low hardness, did not manage to respond to magnetic fields stronger than 120 mT, and it had a decreased sensitivity.

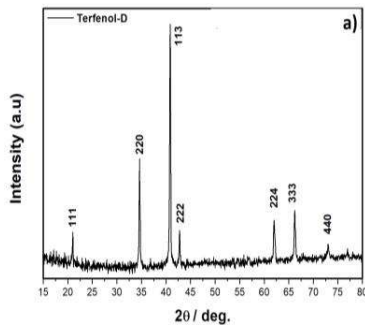


Fig. 2a. Result of XRD.

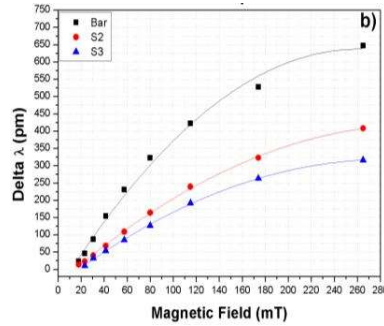


Fig. 2b. Test with magnetic field Group 1.

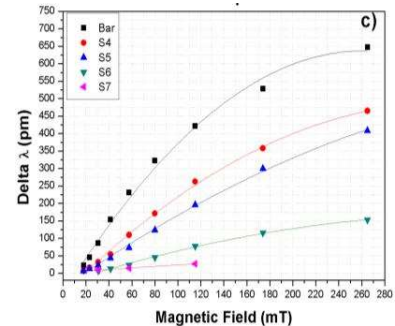


Fig. 2c. Test with magnetic field Group 2.

### 4. Conclusions

In this work we presented an experimental study of optical sensors with several different magnetostrictive composites of TD and epoxy resins. We demonstrated that a linear response can be obtained by using magnetostrictive composites. This is an important result, since it can be applied to magnetostrictive optical current sensors, because external pressure is not needed to achieve linearity, as occurs with solid TD sensors. In addition, the composite sensors were fabricated using only 12.5% of the mass used in the solid TD bar sensor, reducing the cost and the inherent fragility of solid TD.

### 5. References

- [1] Alcides et al. IEEE SENSORS JOURNAL, Vol. 13, N. 2, (2013).
- [2] Elhajjar et al. Progress in Materials Science 97 (2018), 204-229.
- [3] Bieler and Werneck. Measurement Vol. 122 (2018), Pages 117-127.
- [4] Meng et al. APPLIED PHYSICS LETTERS 96, 102501 (2010).

# Disconnect Switch Position Sensor Based on FBG

Roberto Wu Mok<sup>1</sup>, Pedro Silveira, Alex Dante, Juan Lopez, Talitha Trovão, Renato Bellini, Cesar Carvalho, Regina Allil and Marcelo Werneck

Laboratório de Instrumentação e Fotônica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil  
wumok@lif.coppe.ufrj.br<sup>1</sup>

**Abstract** — This work presents a development of an optical monitoring system based on fiber Bragg grating (FBG) for monitoring the state position and temperature of substations high voltage disconnect switches (DS). Since the sensor is made purely of optical and mechanical components, it can be installed at high voltage environments. The sensor is developed to be installed in the contact base of the DS. The transducer is based on a cantilever beam, in which a pair of FBGs is bonded to its opposing sides and a movable mechanism that deflects it. During the closing state, the movable part of DS makes contact with the base and pushes movable mechanism of the sensor, deflecting the beam. Furthermore, FBGs are intrinsically temperature sensitive, measurement of the mechanical-electric contact temperature can be estimated by the wavelength shifts. A software developed in LabVIEW was used for the acquisition and processing of the data coming from the pair of FBGs. The proposed sensor was tested in a laboratory apparatus and the obtained results showed that the developed system is capable to identify three operating states of the DS: open, completely closed and partially closed, states.

**Keywords** — *Fiber Bragg Grating; Position Sensor; Optical Sensor; Substation; Disconnect Switch.*

## I. INTRODUCTION

Monitoring and diagnosing problems in a distribution substation is one of the major challenges in smart grids that needs to be addressed. In this regard several applications present a solution to evaluate and monitor the conditions of the components of the electric power grid including insulators, transmission lines and disconnect switches (DS) [1-5].

High voltage DS is a maneuvering equipment, a component of electric power system, which has the function to establish connection between the generators, transformers, consumers and transmission lines. Inside the substation, usually are used to break circuits due operational necessity, or the need to isolate system components for maintenance [3-4].

In economic view DS are not the most expensive components within a substation, however, they bear a great responsibility in electric circuits. When improperly actuated, or energized while are not fully closed, larger problems can occur [4].

Presented by Yang [3], a system capable to measure temperature of DS, in which is formed by two parts: the measuring part is composed of a sensing circuit with a PT100 installed in the DS and a control circuit located in the switchgear.

Proposed by Werneck *et al.* [4], an opto-mechanical sensor based in a light which is guided by a fiber optic and is reflected

by a mirror end installed at the DS base. The measurement is based on the optical power reflected by the end.

Proposed by Semedo *et al.* [5], a system of measurement of temperature and positioning of the DS. The system consists of a control unit, responsible for the acquisition and processing of data, a digital temperature sensor, vibration sensor and an optical positioning sensor.

This work proposes a monitoring system based in optical fiber technology, FBGs, due to its intrinsic advantages such as: electromagnetic interference (EMI) immunity, galvanic isolation and high resistance to corrosion, advantages that allow its application in extreme environments. The opto-mechanical sensor proposed in this work was designed, developed and tested in the laboratory in order to: i) withstand normal operating conditions; ii) enable the remote indication of closing and effective opening of the switch; iii) have a cost compatible with that of DS; iv) does not interfere with the operation and does not impair the electrical insulation; and v) do not require electrical equipment in situ to perform this type of monitoring.

The proposed sensor is developed to be installed next to the electrical contact of the DS, to monitor the mechanical movement caused by the maneuvers. The sensor is connected via optical fiber to the reading system, composed of an optoelectronic interrogator and a computer, which is responsible for converting the mechanical displacement into an optical signal of the FBG. To facilitate the laboratory tests, a software was developed in the LabVIEW platform that reads the optical signal from the FBG and updates in real time the conditions of the maneuver that the DS is performing. In order to make the tests feasible in the laboratory, a test apparatus was constructed and the results obtained showed the developed system is able to inform three states of positioning; open, completely closed or partially closed, that implies failure and the needs of maintenance, with repeatably of  $\pm 0.22$  mm.

## II. THEORY AND EXPERIMENTAL SETUP

### A. FBG sensitivity to Strain and Temperature Variations

An FBG is a periodic perturbation of the refractive index of the optical fiber core, which is formed by exposure of the core to an UV light interference pattern. The formation of a permanent grating was first reported by Kenneth Hill and co-workers in 1978. As the periodic index modulation develops in the fiber core, a peak appears in as a reflected spectrum. The center of the peak occurs at the predicted Bragg wavelength according to [6-7]:

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

where  $n_{\text{eff}}$  is the effective refractive index of the fiber core and  $\Lambda$  is the grating period. The centered Bragg wavelength can be displaced either by an external force or by variation in temperature, so the sensitivity of  $\lambda_B$  is expressed by the following equation

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - \rho_e)\epsilon + (\alpha_\lambda + \alpha_\eta)\Delta T \quad (2)$$

where  $\rho_e$  is the photo-elastic coefficient, which is the variation of the index refraction with strain,  $\alpha_\lambda$  is the thermal expansion of silica and  $\alpha_\eta$  is the thermo-optic coefficient representing the temperature dependence of the refractive index.

### B. Measurement system design

A schematic of the proposed sensor is shown in Fig. 1, which is composed by a steel cantilever beam and a movable bending mechanism, which makes contact with the DS mechanical contact.

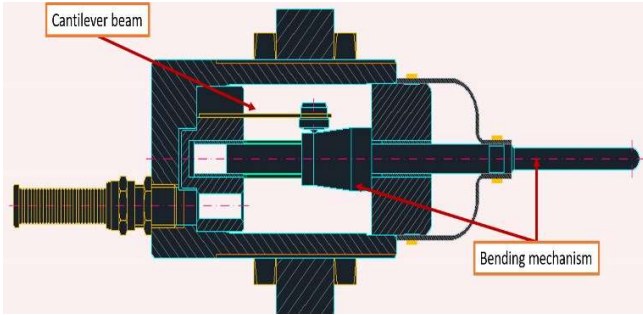


Fig. 1. Proposed sensor schematic.

In Fig. 2 is shown the design of the measurement system. When the DS performs the closing maneuver, the movable element pushes the mechanical contacts and the sensor movable mechanism, deforming the sensing beam. The strain produced by the movement of the DS is measured by a pair of FBGs bonded to the cantilever opposing sides. Since FBG sensors are sensitive by both of temperature and strain simultaneously, strain measurements need to be compensated from thermal variations. In order to remove temperatures bias from the measurements it is proposed a differential measure ( $\Delta\lambda$ ) between two FBGs  $\lambda_B$ . Assuming that is used a pair of matched wavelengths FBGs, temperature variation cause the same  $\lambda_B$  shifts on both sensors, the differential approach cancels out any temperature variation.

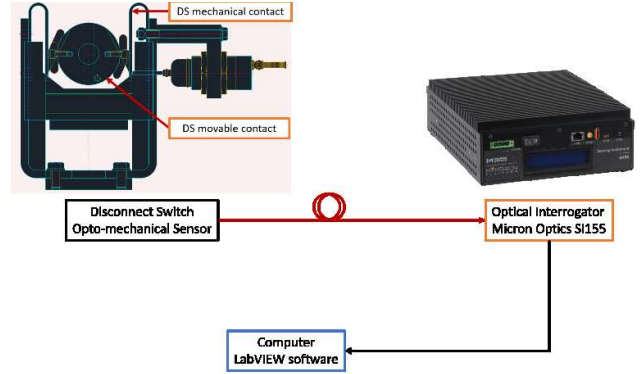


Fig. 2. Block diagram of the measurement system.

The movement of the DS is wavelength encoded by the following expression:

$$L = \Delta\lambda = \lambda_{B1} - \lambda_{B2} \quad (3)$$

where  $L$  is the mechanical contact displacement,  $\lambda_{B1}$  and  $\lambda_{B2}$  are the wavelength of pair of FBGs.

The control software, shown in Fig. 3, presents in real time the condition of the DS maneuvering. The software presents: FBG reflected spectrum, displacement in millimeters (numerically and graphically), gages for calibration and circular indicators that signals the DS states.

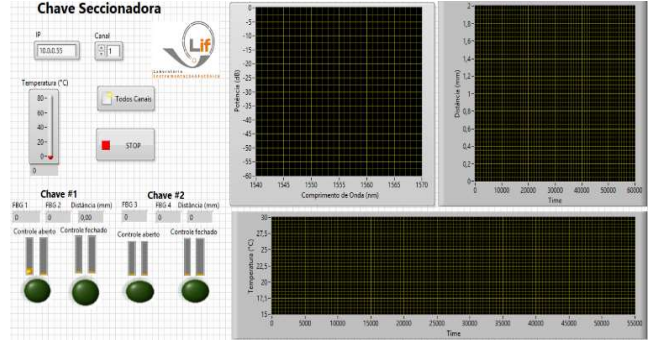


Fig. 3. Control software developed in LabVIEW

## III. EXPERIMENTS AND RESULTS

A pair of FBGs, whose  $\lambda_B$  are centered at 1550.8 nm and 1560.8 nm and a steel cantilever beam were used to assemble the sensor, shown in Fig. 4.



Fig. 4. FBGs bonded to the steel cantilever.

Fig. 5 presents the structure used for the mechanical calibration of the sensor. Calibration is performed by attaching

the sensor to the optical bench and moving the bending mechanism with a micrometer. The used micrometer presents a resolution of 0.01mm (Mitutoyo), the calibration was performed in the displacement range of 0 – 14 mm.



Fig. 5. Procedure used for the mechanical calibration.

Fig. 6 shows the graphic and the respective equations obtained for the displacement calibration of the pair of FBGs. The absolute value of FBG<sub>1</sub> increases with the displacement, while the FBG<sub>2</sub> decreases since the pair is bonded to the cantilever opposite sides, shown in Fig. 4.

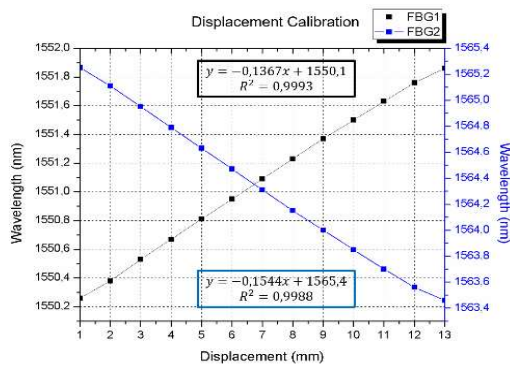


Fig. 6 – Displacement calibration of the FBGs sensor.

To test the proposed sensor functionality and reliability, a test setup was used to simulate the movement of the DS, shown in the Fig. 7. The DS movable part rotates until it reaches its end of course, and pushes the mechanical contact and the sensors movable rod. The sensor is connected to the interrogator by a fiber optic.

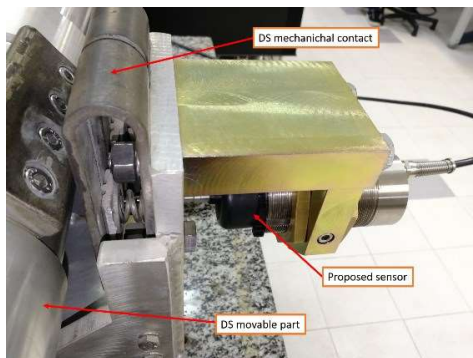


Fig. 7. Laboratory test jig.

In the operator end two states can be achieved, in Fig. 8 the OPEN state that is signaled by the green indicator and shown in Fig. 9 the CLOSED state which is signaled by the red indicator. In the Figs 8 and 9 are shown the following information: the FBGs  $\lambda_B$  and the displacement measured in real time.

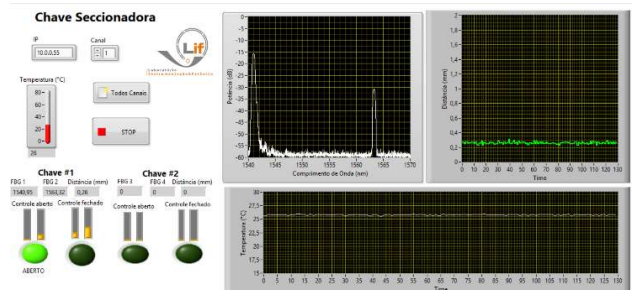


Fig. 8. Software layout with DS in the OPEN state.

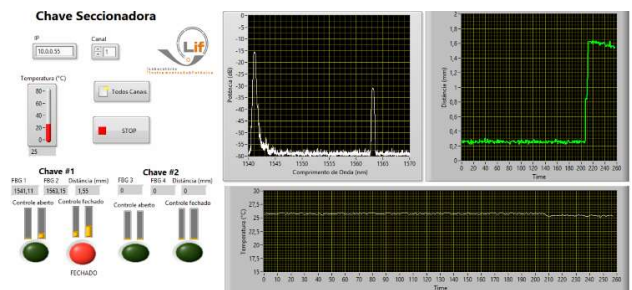


Fig. 9. Software layout with DS in the CLOSED state.

#### IV. CONCLUSIONS

The implementation of the positioning monitoring system of the disconnecting switch is of paramount importance for the execution of safe work in the field. The execution of the software provided a greater interaction between the operator and the developed technology, thus making the proposal more viable to the electricity treatment market.

The resolution of the system is 1 pm, the same of the optoelectronic interrogator Micron Optics Hyperion si155.

The system proved to be able to measure positional variations, all the results were measured and calibrated in the laboratory using equipment of high accuracy and precision.

Further implementation of the temperature measurement and field tests in real electric substation are to be made.

#### REFERENCES

- [1] M. M. Werneck, C. C. Carvalho, D. M. Santos, J. L. Da Silva-Neto, F.L Maciel, F. Lancelotti, "Cabeça de Série do Sistema para Detecção e Monitoramento de Corrente de Fuga em Isoladores de Média Tensão Utilizando Fibra Óptica" VII CITENEL, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [2] F. V. B. de Nazaré, M. M. Werneck, "Temperature and current monitoring system for transmission lines using power-over-fiber technology" 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference Proceedings, Austin, US, 2010.
- [3] Y. Dang, "Desing of Temperature Measurement System for High Voltage Disconnecting Switch", 2014 Sixth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, Hangzhou, China, 2013.
- [4] M. M. Werneck, C. C. Carvalho, D. M. Santos, J. L. Da Silva-Neto, F.L Maciel, F. V. B. de Nazaré, R. C. Allil, P. C. N. Kojima, "Sistema para Monitoramento Óptico de Chaves Seccionadoras", VII CITENEL, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [5] S. M. V. Semedo, J. E. G. Oliveira, F. J. A. Cardoso, "Remote monitoring of high-voltage disconnect switches in electrical distribution substations", 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Istanbul, Turkey, 2014.
- [6] K. O. Hill and G. Meltz, "Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview", JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL.15, NO. 8, AUGUST 1997.
- [7] G. Meltz, W. W. Morey, and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", OPTICS LETTERS, Vol. 14, No. 15, August 1, 1989.



# Apêndice C

## Manual de operação diário do *laser* Nd:YAG

Neste apêndice temos um manual de operação diário do *laser* Quantel Brilliant B, com base nos processos que usamos para este trabalho.

Antes de qualquer procedimento, verifique a disponibilidade dos EPIs necessários (óculos de segurança) e ligue o ar condicionado previamente. Quaisquer dúvidas podem ser sanadas com a leitura dos manuais dos equipamentos aqui utilizados, que se encontram na prateleira acima do *laser*.

### **Como acoplar dobradores de frequência (se necessário):**

O processo de acoplamento dos acessórios se dará por uma chave tipo *allen*. O dobrador de frequência  $4\omega$  não precisa de nenhuma alteração no seu interior, apenas que a carcaça protetora seja retirada para acoplamento dos parafusos no  $2\omega$  e que se coloque o dissipador de calor em sua saída (Figura C.1). O dobrador de frequência  $2\omega$  possui um prisma refrator em seu interior, que sempre deve ser retirado para o acoplamento do  $4\omega$  (Figura C.2). É recomendável que evite o risco de sujar o prisma, sempre manuseando com uma luva.

### **Ligando o *laser*:**

- Ligue a fonte de energia girando a chave para a posição ON e puxe a alavanca de carregamento dos capacitores, localizado na parte traseira da fonte. Aguarde ao menos 30min para operação.

- Aperte o botão *ready* e em seguida o *start* referente ao funcionamento do *flash-lamp* do *laser*. Aguarde o disparo de 80 tiros.

- Com o medidor de energia localizado imediatamente na saída do *laser*, aperte *start* referente ao *Q-switch*, quando efetivamente o *laser* começará a disparar. No menu *Qs Time*, altere o parâmetro FL Qs Dly para o mínimo ( $215\mu\text{s}$ ).

- Aguarde ao menos 15min para estabilização e verifique se a energia máxima (100mJ) está sendo apontada no medidor. Caso contrário, proceda com o manual



Figura C.1: Dissipador de calor do *laser* Nd:YAG.



Figura C.2: Disposição do cristal  $2\omega$  do *laser* Nd:YAG.

de alinhamento do *laser*.

- Ajuste a energia necessária (alterando o FL Qs Dly ou pelo potenciômetro do  $4\omega$ ) e aguarde estabilização por no mínimo 15min.

- Tendo estabilizado, proceda com a inscrição das FBGs, interrompendo o caminho óptico com o medidor de energia na saída do feixe *laser*, quando necessário.

#### **Desligando o *laser*:**

- Interrompa a saída do feixe *laser* clicando em *stop* do *Q-switch* e do *flashlamp* nesta ordem.

- Aguarde ao menos 30min para resfriamento da fonte de energia. Após isso, gire a chave para a posição OFF e empurre a alavanca de carregamento dos capacitores para dentro da fonte, necessariamente nessa ordem.

# Apêndice D

## Manual de operação diário do *laser* de Argônio

Teste apêndice temos um manual de operação diário do laser Coherent MotoFred 300C, com base nos processos que usamos para este trabalho.

Antes de qualquer procedimento, verifique a disponibilidade dos EPIs necessários (óculos de segurança). Quaisquer dúvidas podem ser sanadas com a leitura dos manuais dos equipamentos aqui utilizados, que se encontram no armário do Lab-FBG.

### **Ligando o *Chiller* para resfriamento da fonte de energia:**

O *chiller* (Fabricante Transcalor) deve ser previamente ligado para circulação de água na fonte de corrente do *laser*. No menu principal do equipamento, clique na seta para baixo, mudando de OFF para ON. Ligue o exaustor localizado na parede para auxiliar na troca de calor. Aguarde ao menos 10min para operar o *laser*.

OBS: Recomendável trocar a água do *chiller* ao menos uma vez a cada dois meses. Abra a torneira de saída do reservatório, aguarde o esvaziamento e preencha com uma água nova abrindo a torneira de entrada.

### **Ligando o *laser*:**

- No controle, verifique o valor da corrente e mantenha em torno de 35A. Aperte ON e aguarde os segundos necessários para a inicialização da fonte.

- Mantendo o medidor de potência imediatamente na saída do *laser*, clique no botão TUNE e ajuste manualmente os parafusos dos espelhos frontais, de forma que se maximize a potência de saída no medidor.

- Após otimização de potência, ligue a vazão de nitrogênio de forma branda (colocando muita vazão o nitrogênio interfere negativamente na potência do laser).

- Aguarde possíveis alterações no medidor de potência, movendo novamente os parafusos, se necessário.

- Alcançando o máximo, saia do TUNE e ative o botão de POWER TRACK. Aguarde estabilização da potência por 10min.

- Estabilizando, anote os parâmetros para monitoramento do *laser*, todos encontrados no MENU. São eles:

a) Corrente e potência - Corrente usual de 35A e potência dada pelo medidor externo.

b) Tube (P, I e V), Autofill (Delta), Corrente catodo e corrente magneto - MENU>Status Argon Fred

c) Crystal (position) - MENU>Diagnostics

- Proceda com a inscrição das FBGs.

**Desligando o *laser*** - Recoloque o medidor de potência imediatamente na saída do *laser*.

- Desligue o *laser* no botão OFF, mantendo em 35A de corrente.

- Desligue o fluxo de nitrogênio.

- Aguarde 15min para o desligamento do *chiller*, alterando de ON para OFF com a seta para baixo no visor do equipamento.