



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CURITIBA**

GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL - CPGEI**

RITA ZANLORENSI VISNECK COSTA

**PRODUÇÃO, ESTABILIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO
DE REDES FOTORREFRATIVAS DE PERÍODO LONGO
EM FIBRAS ÓTICAS PARA SENSORES**

TESE DE DOUTORADO

**CURITIBA
ABRIL - 2009**

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial

TESE DE DOUTORADO

apresentada à UTFPR
como requisito parcial para obtenção do título de

DOUTOR EM CIÊNCIAS

por

RITA ZANLORENSI VISNECK COSTA

**PRODUÇÃO, ESTABILIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES
FOTORREFRATIVAS DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS ÓTICAS PARA
SENSORES**

Banca Examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. JOSÉ LUÍS FABRIS

UTFPR

Examinadores:

Prof. Dr. CÉSAR AUGUSTO DARTORA

UFPR

Prof. Dr. WIDO HERWIG SCHREINER

UFPR

Prof. Dr. JEAN CARLOS CARDOZO DA SILVA

UTFPR

Prof. Dr. HYPOLITO JOSÉ KALINOWSKI

UTFPR

Curitiba, 15 de abril de 2009.

RITA ZANLORENSI VISNECK COSTA

**PRODUÇÃO, ESTABILIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES
FOTORREFRATIVAS DE PERÍODO LONGO EM FIBRAS ÓTICAS PARA
SENSORES**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Co-orientadora: Prof^a Dra. Marcia Muller

Curitiba

2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

C837p

Costa, Rita Zanlorensi Visneck

Produção, estabilização e caracterização de redes fotorrefrativas de período longo em fibras óticas para sensores/ Rita Zanlorensi Visneck Costa. – 2009. xxiii, 251 p. : il ; 30 cm

Orientador: José Luís Fabris

Co-orientador: Marcia Muller

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial.

Área de Concentração: Informática Industrial, 2009

Bibliografia: p. 233-51

1. LPG (Redes de período longo). 2. Detectores de fibras óticas. 3. Fibras óticas. 4. Engenharia Elétrica. I. Fabris, José Luís, orient. II. Muller, Marcia, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Informática Industrial. IV. Título.

CDD 621.3

DEDICATÓRIA

**Ao meu esposo Antonio e a minha filha Rosálie,
por todo o amor e incentivo.**

**E à memória de minha avó,
Julia Lazzarotto Wierzba.**

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço pela confiança em mim depositada através do convite que recebi dos professores, Dr. José Luís Fabris e Dr. Hypolito José Kalinowski, para realizar esse curso e, ao mesmo tempo, pelo desafio que me foi lançado para que eu mudasse de área.

Mais uma vez agradeço ao Dr. José Luís Fabris, meu orientador, e à Dra. Marcia Muller, minha co-orientadora, pelos conhecimentos fornecidos, pelas cobranças e por todo o tempo que investiram no direcionamento desse trabalho. Espero poder retribuir, futuramente, toda a atenção, paciência e dedicação recebida por parte de meus orientadores.

Ao Eduardo, por ter me acompanhado nos meus primeiros ensaios no Laboratório de Laser.

Ao Fabiano, por ter me ensinado a operar os equipamentos do sistema de gravação e leitura de redes e por nunca medir esforços em me atender nos momentos de dúvida.

Ao Ricardo, por todas as explicações e dicas e por me acompanhar em uma parte dos experimentos que foi fundamental para as publicações resultantes desse trabalho.

À Francelli e ao Pereira, cada um com seus trabalhos independentes, pela companhia e somatória de esforços tanto na busca de assistência técnica para o forno de laboratório, em Blumenau, quanto no domínio da programação do mesmo.

Ao Fernando, que projetou o arranjo experimental para os ensaios de curvatura e também pelo auxílio na instalação de uma das redes no mesmo.

À Rosane, pela companhia e valioso auxílio nos ensaios de curvatura e na busca de publicações referentes ao assunto.

Ao Gustavo, pela companhia e auxílio em alguns experimentos, pelas trocas de idéias e especialmente pela etapa de tratamento dos dados dos ensaios de curvatura com as redes neurais artificiais.

A todos os colegas que participaram de alguma forma desta etapa de minha carreira acadêmica, no curso de algumas disciplinas, dentre os quais gostaria de destacar aqueles com quem partilhei um maior número de horas de estudo, além da Francelli, Giovana, Ionildo e Rodrigo.

A todos os colegas do Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações que contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho.

Aos colegas professores do Departamento Acadêmico de Física, da UTFPR, que apoiaram a dispensa parcial das minhas atividades docentes para que eu continuasse os meus estudos. Em especial ao Dr. Nilson Marcos Dias Garcia, por sempre ter sido o primeiro a me incentivar.

À UTFPR, pelas instalações oferecidas para a realização desse trabalho.

Ao meu esposo Antonio, pelo incondicional e ilimitado apoio que me deu condições de enfrentar esse curso.

A minha filha Rosálie, por sempre ter sido carinhosa e companheira.

A todos os meus familiares, com os quais sempre pude contar, especialmente meus pais, João e Antonia, minhas irmãs Roseli e Marli, meu cunhado Pérsio, meu afilhado João Raphael que demonstrou certo interesse pelos meus experimentos. Também vou citar meu afilhado mais novo, João Pedro, por ter pesquisado meu nome na *internet*.

Ao meu amigo, Pe. Marcelo Batalioto, por ter acompanhado, mesmo de longe, toda a evolução dessa jornada.

E a Deus.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES.....	xix
RESUMO.....	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 REFLEXÕES PRELIMINARES.....	1
1.2 ESTADO DA ARTE.....	5
1.2.1 Redes de Reflexão ou Redes de Bragg.....	5
1.2.2 Redes de Transmissão ou Redes de Período Longo.....	9
1.3 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS	30
1.3.1 Justificativas.....	30
1.3.2 Objetivos.....	31
1.4 ESTRUTURA DA TESE.....	31
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	33
2.1 ASPECTOS MATERIAIS.....	33
2.2 GUIAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓTICAS.....	35
2.3 A FOTOSSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS.....	40
2.3.1 O Realce da Fotosensibilidade das Fibras Óticas.....	44
2.3.1.1 A Hidrogenação.....	44
2.3.1.2 A Varredura à Chama (“ <i>Flame Brushing</i> ”).....	49
2.3.1.3 Co-Dopagem com Boro.....	49
2.4 A FORMAÇÃO DE REDES EM FIBRAS ÓTICAS.....	50
2.4.1 Redes de Bragg.....	52
2.4.2 Redes de Período Longo.....	54
2.5 SENSIBILIDADE DAS REDES.....	59
2.5.1 Sensibilidade das FBGs.....	59
2.5.2 Sensibilidade das LPGs.....	61

2.6	TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DA LPG.....	65
2.6.1	Gravação com Radiação UV.....	65
2.6.1.1	Processo de Escrita Ponto-a-Ponto com Radiação UV.....	65
2.6.1.2	Processo de Escrita com Máscara de Amplitude.....	66
2.6.2	Processo de Escrita com Laser de CO ₂	66
2.6.3	Processo de Escrita com Arco Elétrico.....	68
2.6.4	Processos de Gravação por Indução Mecânica.....	68
2.7	AS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	70
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....		75
3.1	O PROCESSO DE GRAVAÇÃO DE LPG COM RADIAÇÃO UV.....	75
3.1.1	O Sistema de Gravação e Leitura das LPGs.....	75
3.1.2	Procedimentos Experimentais para a Gravação das LPGs.....	79
3.2	A CINÉTICA DAS REDES DE PERÍODO LONGO GRAVADAS COM RADIAÇÃO UV.....	85
3.3	CARACTERIZAÇÃO DAS REDES.....	89
3.3.1	A Caracterização das LPGs quanto ao Índice de Refração.....	90
3.3.2	A Caracterização Térmica das LPGs com um Elemento <i>Peltier</i>	93
3.3.3	A Caracterização Térmica da Sensibilidade ao Índice de Refração do Meio Externo.....	95
3.3.4	Caracterização quanto à Deformações.....	97
3.3.5	Caracterização da LPG3 no Forno Jung de 25°C a 1200°C.....	98
3.3.6	Os Ciclos de “ <i>Annealing</i> ” da LPG8.....	100
3.3.7	Os Ciclos de “ <i>Quenching</i> ” da LPG5 e da LPG6.....	100
3.3.8	Caracterização de 25°C a 300°C e Investigação da Estabilidade Térmica em 350°C da LPG5.....	101
3.3.9	Ensaio de Curvatura em Diferentes Planos.....	104
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		113
4.1	AS REDES DE PERÍODO LONGO GRAVADAS OTICAMENTE.....	113
4.2	A CINÉTICA DOS ESPECTROS NAS HORAS SEGUINTE À INSCRIÇÃO..	129
4.3	RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS REDES.....	141
4.3.1	Resultados da Caracterização quanto ao Índice de Refração.....	141

4.3.2	Resultados da Caracterização com o Elemento <i>Peltier</i>	143
4.3.3	A Caracterização Térmica da LPG9 quanto ao Índice de Refração do Meio Externo.....	147
4.3.4	Resultados da Caracterização quanto à Deformações Longitudinais.....	151
4.3.5	Comportamento da LPG3 de 25°C a 1200°C.....	153
4.3.6	Análise dos Espectros da LPG8 após Três Ciclos de “ <i>Annealing</i> ”.....	156
4.3.7	Análise da LPG5 e da LPG6 após Dois Ciclos de “ <i>Quenching</i> ”.....	160
4.3.8	Resultados da Caracterização e Investigação da Estabilidade Térmica em 350°C da LPG5.....	167
4.3.9	Resultados dos Ensaios para Investigação da Aplicabilidade das LPGs na Detecção de Curvaturas em Diferentes Planos.....	170
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....		181
5.1	REDES DE PERÍODO LONGO PRODUZIDAS E SUAS CARACTERIZAÇÕES... ..	181
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	184
ANEXO 1 – OS ESPECTROS DAS LPGs.....		187
ANEXO 2 – OS PARÂMETROS DAS LPGs.....		197
ANEXO 3 – DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO DAS LPGs.....		209
ANEXO 4 – DETERMINAÇÃO DO MODO DE CASCA DE ACOPLAMENTO E DA SENSIBILIDADE AO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO MEIO EXTERNO DAS LPGs.....		219
ANEXO 1 – RESPOSTA ESPECTRAL DA LPG20 À CURVATURAS EM DIFERENTES DIREÇÕES.....		225
PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESSA TESE.....		231
REFERÊNCIAS.....		233

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: (a) Secção transversal de fibra multimodo, sem capa, e perfil de índice de refração degrau; (b) Secção transversal de fibra multimodo, sem capa, e perfil de índice de refração gradual; (c) Secção transversal de fibra monomodo, sem capa, e perfil de índice de refração degrau.....	34
Figura 2: Defeitos associados à dopagem com Ge: (a) Centro GeO ou GODC, (b) defeito ionizado GeE', (c) Ge(1) e (d) Ge(2) (KASHYAP, 1999).....	43
Figura 3: Reação química para a formação dos íons GeH e OH em fibras hidrogenadas (GRUBSKY, STARODUBOV e FEINBERG, 1999).....	48
Figura 4: (a) perfil uniforme; (b) perfil apodizado; (c) perfil com gorjeio (“chirp”); (d) perfil segmentado e (e) perfil inclinado.....	51
Figura 5: Reflexão acontecendo em cada plano da rede onde começa a mudança de índice.....	52
Figura 6: Corte longitudinal de uma fibra com LPG gravada. Acoplamento do modo fundamental de núcleo para modo de casca. Λ é o período da rede (BHATIA, 1996).....	55
Figura 7: Mecanismo de acoplamento dos modos em uma LPG (BHATIA, 1996; KAMIKAWACHI, 2007). β_{01} é a constante de propagação do modo fundamental de núcleo e $\beta^{(n)}$ são as constantes de propagação dos modos de casca circularmente simétricos que podem ser envolvidos no acoplamento.....	56
Figura 8: Modulação do espectro de uma LPG. Os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 correspondem a três diferentes modos de casca (BHATIA, 1996).....	57
Figura 9: Técnica de escrita ponto-a-ponto (MALO, HILL, BILODEAU <i>et al</i> , 1993).....	66
Figura 10: Técnica de escrita com máscara de amplitude.....	67
Figura 11: Esquema da técnica de escrita ponto-a-ponto por arco elétrico (PALAI, SATYANARAYAN, DAS <i>et al</i> , 2001).....	68
Figura 12: Arranjo experimental para LPG induzida mecanicamente através da pressão exercida por forças magnéticas (CAUSADO-BUELVAS, GOMEZ-CARDONA e TORRES, 2008).....	69
Figura 13: Corte longitudinal de uma LPG gravada através da corrosão periódica da casca da fibra ótica com HF (LIN E WANG, 1999).....	70
Figura 14 - Diagrama esquemático de uma RNA: Perceptron Multicamadas (MLP).....	72
Figura 15: Diagrama esquemático do sistema de gravação ponto-a-ponto com laser UV e leitura de LPG	76

Figura 16: Ilustração da convergência do feixe de UV após passar pela lente.....	77
Figura 17: Fotografia do sistema de gravação de LPGs do Laboratório de Laser.....	77
Figura 18: Esquema de montagem para a aquisição temporal da fluência do laser.....	81
Figura 19: Primeira aquisição temporal do fotodetector com auxílio do amplificador “ <i>lock-in</i> ”.....	82
Figura 20: Segunda aquisição temporal do fotodetector com auxílio do amplificador “ <i>lock-in</i> ”.....	82
Figura 21: Esquema de como as redes LPG 9, LPG10, LPG11 e LPG13 ficaram fixadas durante os períodos de monitoramento dos seus espectros.....	85
Figura 22: Acompanhamento da temperatura do laboratório após a gravação da LPG10 e da LPG11.....	89
Figura 23: Esquema da montagem com equipamentos utilizados para a caracterização das LPGs quanto ao índice de refração do meio externo.....	92
Figura 24: Arranjo experimental para a caracterização térmica das LPGs com um elemento <i>Peltier</i>	94
Figura 25: Esquema da montagem para a caracterização térmica da sensibilidade ao índice de refração do meio externo.....	96
Figura 26: Esquema de montagem para a caracterização da LPG9 quanto à deformações.....	97
Figura 27: Arranjo experimental para o aquecimento das redes num forno de laboratório.....	99
Figura 28: Gráfico ilustrativo da programação de aquecimento do forno para os ciclos de “ <i>quenching</i> ”, da LPG5 e LPG6, e de “ <i>annealing</i> ”, da LPG8.....	101
Figura 29: Gráfico ilustrativo da programação de aquecimento e resfriamento do forno para a caracterização térmica da LPG5.....	102
Figura 30: Gráfico ilustrativo da programação do forno para a manutenção da LPG5 na temperatura de 350°C por uma semana (10080 minutos).....	103
Figura 31: Fotografia mostrando a demarcação com setas, do plano de irradiação da fibra ótica, para gravação de LPG.....	105
Figura 32: Arranjo experimental para testar a sensibilidade da LPG12 à mudanças no estado de polarização da luz por ela transmitida.....	106
Figura 33: Montagem experimental que buscava gerar três estados diferentes de polarização da luz que seria transmitida na LPG12.....	107
Figura 34: Dispositivo projetado para promover curvaturas em LPGs em diferentes direções.....	108

Figura 35: Ilustração fora de escala da secção transversal da LPG20, segundo o plano <i>xy</i> indicado na Figura 34, sendo rotacionada de 0 a 180°.....	111
Figura 36: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG1 (fibra “ <i>Centaurus</i> ”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.....	114
Figura 37: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG10 (fibra “ <i>Centaurus</i> ”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.....	114
Figura 38: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG1 (gravada com fluência de $278,65 \pm 30,65 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.....	116
Figura 39: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG4 (gravada com fluência de $185,68 \pm 20,42 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.....	117
Figura 40: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG6 (gravada com fluência de $233,95 \pm 25,73 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.....	117
Figura 41: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG12 (gravada com fluência de $207,96 \pm 22,88 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.....	118
Figura 42: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG7, durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.....	120
Figura 43: Posição espectral do vale de maior atenuação das LPGs gravadas em função das fluências médias empregadas.....	124
Figura 44: Coeficiente de acoplamento em função das fluências médias empregadas.....	126
Figura 45: Espectros da LPG10 (gravada em fibra “ <i>Centaurus</i> ”) em dB.....	127
Figura 46: Foto do suporte de gravação das LPGs, observando-se a figura de iluminação resultante da difração formada pela incidência do feixe UV sobre a fibra ótica desencapada.....	128
Figura 47: Evolução espectral da LPG4 (gravada em fibra “ <i>Centaurus</i> ”) uma hora depois da gravação.....	129
Figura 48: Evolução espectral da LPG7 (gravada em fibra “ <i>Centaurus</i> ”) duas horas depois da gravação.....	130
Figura 49: Evolução espectral da LPG13 (gravada em fibra “ <i>Nufern</i> ”) depois da gravação.....	131
Figura 50: Evolução espectral da LPG14 (gravada em fibra “ <i>Nufern</i> ”) depois da gravação.....	132
Figura 51: Evolução espectral da LPG15 (gravada em fibra “ <i>Nufern</i> ”) depois da gravação.....	132
Figura 52: Acompanhamento da atenuação da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.....	134

Figura 53: Acompanhamento da largura de banda da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.....	135
Figura 54: Acompanhamento da posição do vale da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.....	135
Figura 55: Acompanhamento da evolução da atenuação do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 26 horas.....	136
Figura 56: Acompanhamento da evolução da posição do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 26 horas.	136
Figura 57: Acompanhamento da evolução da largura à meia altura do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 20 horas.....	137
Figura 58: Acompanhamento da evolução da atenuação do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 13 horas.....	138
Figura 59: Acompanhamento da evolução da posição do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 17 horas.....	139
Figura 60: Acompanhamento da evolução da largura à meia altura do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 17 horas.....	139
Figura 61: Caracterização da LPG11 com o elemento <i>Peltier</i> em três ciclos de aquecimento e resfriamento.....	144
Figura 62: Ajuste exponencial da evolução das perdas de eficiência da LPG11 em função dos ciclos de aquecimento/resfriamento no elemento <i>Peltier</i>	146
Figura 63: Curva em vermelho, resposta ao índice de refração. Curva em preto, sensibilidade ao índice de refração (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI <i>et al</i> , 2007).....	148
Figura 64: Resposta térmica da LPG9 na presença de diferentes ambientes com o ajuste fornecido pela Equação 49 (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI <i>et al</i> , 2007).....	149
Figura 65: Sensibilidade térmica da LPG9 imersa em diferentes amostras (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI <i>et al</i> , 2007).....	150
Figura 66: Sensibilidade da LPG9 à deformações longitudinais.....	152
Figura 67: Deslocamento do vale de atenuação da LPG3 em altas temperaturas (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER <i>et al</i> , 2009).....	154
Figura 68: Medidas da atenuação da LPG3 nas temperaturas de 25°C a 1200°C e quatro dias depois do aquecimento a 24,7°C (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER <i>et al</i> , 2009).....	155

Figura 69: Evolução do vale central de atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “annealing”.....	156
Figura 70: Deslocamentos espectrais do maior vale de atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “annealing”.....	158
Figura 71: Evolução da atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “annealing”.....	159
Figura 72: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG8 em função dos ciclos de “annealing”.....	160
Figura 73: Evolução do vale central de atenuação da LPG6 ao longo dos dois ciclos de “quenching” (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER <i>et al</i> , 2009).....	161
Figura 74: Evolução da atenuação da LPG6 ao longo dos dois ciclos de “quenching”.....	163
Figura 75: Evolução da atenuação da LPG5 ao longo dos dois ciclos de “quenching”.....	164
Figura 76: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG6 em função dos ciclos de “quenching”.....	165
Figura 77: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG5 em função dos ciclos de “quenching”.....	165
Figura 78: Primeiro teste para investigar a sensibilidade térmica da LPG5.....	167
Figura 79: Acompanhamento da posição do vale de atenuação da LPG5 durante as duas semanas nas quais foi mantida em temperatura de 350°C.....	168
Figura 80: Acompanhamento da atenuação da LPG5 durante as duas semanas nas quais foi mantida em temperatura de 350°C.....	168
Figura 81: Resposta da LPG5 à variações de temperaturas inferiores a 350°C.....	169
Figura 82: Variações espectrais que demonstram a sensibilidade da LPG12 à mudanças no estado de polarização. No detalhe observa-se um deslocamento em comprimento de onda aparentemente mensurável.....	171
Figura 83: Fotografia da montagem para os ensaios de curvatura.....	173
Figura 84: Respostas espectrais da LPG20 à curvatura quando rotacionada de 0° e de 120°.....	174
Figura 85: Dados para a construção da RNA1, RNA2 e RNA3.....	176
Figura 86: Diagrama esquemático do princípio de supervisão realizado pela (a) RNA1, (b) RNA2 e (c) RNA3.....	177
Figura 87: Comparação entre as respostas desejadas (□) e as respostas fornecidas (★) pela (a) RNA1, (b) RNA2 e (c) RNA3, quando fomentadas pelos dados de teste.....	179

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:	Medidas de tensão pico a pico, registradas no osciloscópio, com o fotodetector posicionado entre a íris e o temporizador e diante do suporte de fixação das fibras para gravação.....	78
Tabela 2:	Parâmetros das LPGs gravadas.....	83
Tabela 3:	Especificações a respeito das redes gravadas.....	84
Tabela 4:	Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG9.....	86
Tabela 5:	Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG10.....	87
Tabela 6:	Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG11.....	88
Tabela 7:	Especificação do intervalo de tempo decorrido desde a gravação até a caracterização das redes quanto ao índice de refração do meio externo.....	93
Tabela 8:	Especificações a respeito das LPGs para a análise do gráfico da Figura 43.....	123
Tabela 9:	Coefficientes de acoplamento determinados para as LPGs.....	126
Tabela 10:	Modo de casca linearmente polarizado, LP ₀₅ , para o qual aconteceu o acoplamento em cada LPG.....	142
Tabela 11:	Deslocamentos espectrais das LPGs, relativos ao ar, para diferentes amostras.....	143
Tabela 12:	Resultados de ajuste linear nos pontos experimentais dos três ciclos de aquecimento e resfriamento no elemento <i>Peltier</i>	145
Tabela 13:	Levantamento da eficiência da LPG11 antes e depois de cada ciclo de aquecimento e resfriamento no elemento Peltier.....	145
Tabela 14:	Sensibilidade ao Índice de Refração e Coeficiente Termo-Ótico de Acoplamento da LPG9.....	149
Tabela 15:	Sensibilidade térmica encontrada em cada ciclo da LPG8.....	157
Tabela 16:	Posição do vale de atenuação da LPG8 antes e depois de cada ciclo de “annealing”.....	157
Tabela 17:	Amplitude do vale de atenuação da LPG8 antes e depois de cada ciclo de “annealing”.....	159

Tabela 18:	Coeficiente angular determinado com os dados da Figura 73 em cada processo de aquecimento da LPG6.....	161
Tabela 19:	Posição do vale de atenuação da LPG6 antes e depois de cada “ <i>quenching</i> ”.....	162
Tabela 20:	Amplitude do vale de atenuação da LPG6 antes e depois de cada “ <i>quenching</i> ”.....	162
Tabela 21:	Atenuação do vale principal da LPG6 antes e depois de cada “ <i>quenching</i> ”.....	163
Tabela 22:	Atenuação do vale principal da LPG5 antes e depois de cada “ <i>quenching</i> ”.....	164
Tabela 23:	Resposta da LPG12 às mudanças do estado de polarização da luz.....	171

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

B	Boro
B ₂ O ₃	Trióxido de Boro
CO ₂	Dióxido de Carbono
ET	Estágio de Translação
E ₁	Espelho Número 1
E ₂	Espelho Número 2
L	Lente
F ₂	Gás Flúor
FBG	“ <i>Fiber Bragg Grating</i> ” – Rede de Bragg em Fibra
FWHM	“ <i>Full Width at Half Maximum</i> ” – Largura Total a Meia Altura
Ge	Germânio
GeH	Hidreto de Germânio
GeO	Óxido de Germânio
GeO ₂	Dióxido de Germânio
GODC	“ <i>Germanium-Oxygen Deficient Center</i> ” - Centro de Germânio Deficitário em Oxigênio
H ₂	Gás Hidrogênio
H ⁺	Íon Hidrogênio
Hi-Bi	“ <i>High Birefringence</i> ” – Alta Birrefringência
KrF	Fluoreto de Criptônio
LASER	“ <i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i> ” – Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação
LED	“ <i>Light Emitting Diode</i> ” – Diodo Emissor de Luz
LP	Linearmente Polarizado
LPG	“ <i>Long Period Grating</i> ” – Rede de Período Longo
MLP	Perceptron Multicamadas
NaCl	Cloreto de Sódio
Nd: YAG	“ <i>Neodymium-doped: Yttrium Aluminium Garnet</i> ” – Granada de Ítrio e Alumínio dopado com Neodímio

O	Oxigênio
OH	Hidroxila
OSA	“ <i>Optical Spectrum Analyser</i> ” – Analisador de Espectros Óticos
PS-LPG	“ <i>Phase-Shifted Long Period Grating</i> ” – Rede de Período Longo com Fase Deslocada
RIS	“ <i>Refractive Index Sensitivity</i> ” – Sensibilidade ao Índice de Refração
RNA	Redes Neurais Artificiais
Si	Silício
SiO ₂	Dióxido de Silício
SMF	“ <i>Single Mode Fiber</i> ” – Fibra Monomodo
SPG	“ <i>Short Period Grating</i> ” – Rede de Período Curto
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UIR	Unidade de Índice de Refração ¹
UV	“ <i>Ultraviolet</i> ” - Ultravioleta

¹ Embora índice de refração seja uma grandeza física adimensional, convencionou-se utilizar a unidade nm/UIR nos eixos da direita dos gráficos do Anexo 4 e da Figura 63, para esclarecer que os mesmos expressam uma derivada de comprimento de onda (nm) com relação ao índice de refração (adimensional).

RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação do sistema de gravação de redes de período longo, através da técnica de incidência lateral de radiação ultravioleta ponto-a-ponto, no Laboratório de Laser da UTFPR. Foram escritas redes em fibras óticas com o uso de um laser de *Nd:YAG* operando em 266 nm. A evolução espectral das redes foi analisada tanto durante o processo de escrita quanto após o seu término, ao longo de intervalos que variaram de 1 a 595 horas. Essas redes foram submetidas a várias caracterizações com vistas à sua aplicação no sensoriamento de parâmetros físico-químicos. Na avaliação da sensibilidade ao índice de refração do meio externo às redes, foram utilizados fluidos com índices de refração entre 1,0000 e 1,4315. Registraram-se alterações na sensibilidade térmica de valores negativos para positivos, para variações de temperatura de até 24°C, com mudanças de comportamentos lineares para não lineares, dependendo do índice de refração do meio. No ensaio para caracterização da resposta às deformações longitudinais a rede analisada demonstrou-se pouco sensível, com um valor obtido de sensibilidade de $-0,19 \pm 0,15$ pm/ $\mu\epsilon$ na faixa de 0 a 125 $\mu\epsilon$. Foram feitos testes da caracterização térmica desses dispositivos, utilizando um elemento *Peltier* e um forno de laboratório. Com o uso do elemento *Peltier* as redes de período longo passaram por ciclos de aquecimento e resfriamento compreendidos entre $-1,5$ °C e 61,1 °C. Já no forno de laboratório, as redes chegaram a ser submetidas a temperaturas que variaram de 25 °C a 1200 °C sem serem completamente apagadas. Uma das questões experimentais mais determinantes foi a investigação da estabilização térmica das redes. Para tanto foram testados e comparados dois diferentes processos de estabilização. O primeiro consistiu em submeter a rede a ciclos de recozimento seguidos de resfriamento lento e o segundo a ciclos de recozimento seguidos de resfriamento brusco, nos quais a máxima temperatura atingida pelas redes foi de 425 °C. O segundo método demonstrou-se mais eficaz para o propósito de estabilização térmica. A rede estabilizada mostrou uma sensibilidade térmica não linear que variou de $-0,044$ nm/°C a $-0,0044$ nm/°C quando aquecida de 20 °C a 300 °C. Em função das características assimétricas inerentes ao processo empregado para escrita das redes, foram realizados ensaios para verificar a viabilidade da utilização desses dispositivos como transdutores para medição de curvatura em diferentes direções, com emprego de redes neurais artificiais para análise desses dados.

Palavras-chave: redes de período longo, estabilização térmica de LPG, sensores à fibra ótica.

ABSTRACT

PRODUCTION, STABILIZATION AND CHARACTERIZATION OF PHOTOSENSITIVE LONG PERIOD GRATINGS IN OPTICAL FIBERS FOR SENSORS

This work shows the implementation of a writing system for long-period gratings production, by using a side point-by-point illumination with ultraviolet light, at Laser Laboratory in UTFPR. Gratings were written in optical fibers with a *Nd:YAG* laser operating at 266 nm. The spectral evolution of gratings was analyzed both during and after the writing process, along time intervals from 1 to 595 hours. The gratings were submitted to several characterizations aiming its application in physicochemical parameters sensing. For the assessment of gratings sensitivity to the external medium refractive index, fluid samples with refractive indices ranging from 1.0000 to 1.4315 were used. Changes of thermal sensitivity from negative do positive values were quantified, for temperature variations up to 24°C, with behaviours transitioning from linear to nonlinear, depending on the refractive index of external medium. For the studies of sensitivities of longitudinal strain, the analyzed grating showed a low sensitivity value of $-0,19 \pm 0,15$ pm/ $\mu\epsilon$ in the range between 0 to 125 $\mu\epsilon$. A thermal characterization of the produced devices was carried out with a thermo element *Peltier* and with a laboratory furnace. For the *Peltier* the gratings were submitted to thermal cycles from -1.5 °C to 61.1 °C. For the furnace the gratings were exposed to temperatures between 25 °C a 1200 °C without being completely erased. An experimental issue was the investigation about the thermal stabilization of gratings. Two different processes to reach the thermal stabilization were studied: annealing and quenching. The former consisted of annealing cycles with slow cooling whereas the later comprised of thermal cycles with sudden cooling from a maximum temperature of 425 °C, the second one revealing to be more efficient to reach the thermal stabilization. The stabilized grating showed a non-linear thermal sensitivity ranging from $-0,044$ nm/°C to $-0,0044$ nm/°C within the temperature range from 20 °C to 300 °C. Owing to the inherent asymmetric characteristics of the process employed to record the gratings, the viability of using such devices as transducers for curvature sensing in different directions was studied, employing artificial neural networks to analyze the data.

Key-words: long period gratings, thermal stabilization of LPG, optical fiber sensors.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 REFLEXÕES PRELIMINARES

No período da História que se estende de 1200 a 1850, o aperfeiçoamento na produção do vidro revolucionou várias áreas do conhecimento, especialmente no oeste da Europa. O vidro propiciou inúmeras descobertas na arte, arquitetura, química, física, engenharia, patologia, protozoologia, mineralogia, paleontologia, geologia, bacteriologia, biologia molecular, astronomia, histologia e vulcanologia. Além disso, dos vinte experimentos que mudaram o mundo (HARRÉ, 1983), quinze não seriam realizáveis sem utensílios de vidro (MACFARLANE e MARTIN, 2004). O entendimento das leis da ótica também obviamente não seria possível sem o domínio da técnica de manufatura desse material.

Em 1841, Daniel Colladon, utilizando conhecimentos de ótica geométrica, demonstrou em Genova a transmissão de um feixe de luz por meio de um jato d'água fino. Em 1842, Colladon fez a sua primeira publicação sobre o guiamento da luz associando-o à refratometria (COLLADON, 1842) e, no mesmo ano, Jacques Babinet também relatou o guiamento da luz em jatos d'água e hastes curvadas de vidro (BABINET, 1842). Entre 1910 e 1920, iniciaram-se os primeiros estudos teóricos e experimentais sobre a transmissão de luz em guias de onda de forma cilíndrica e feitos de material dielétrico. Naquela época o ar desempenhava o papel de casca, já que o núcleo era constituído de um único cilindro que apresentava um material de índice de refração superior ao do ar (CARSON, MEAD e SCHELKUNOFF, 1936). Em 1953 Van Hell recobriu fibras com um material transparente de baixo índice de refração e a partir de então os guias de onda passaram a ser recobertos por uma camada, denominada de casca (KAPANY, 1967; KODAMA e HASEGAWA, 1992; AGRAWAL, 1995; HASEGAWA e KODAMA, 1995).

Com a descoberta do guiamento da luz no vidro, algumas companhias fabricantes de utensílios de sílica fundida, com raízes nos avanços do século XIX, abraçaram novas tecnologias. A necessidade de produção de conhecimento, no início do século XX, levou à contratação de cientistas, incluindo químicos orgânicos, físicos e engenheiros, para desenvolverem novas espécies de vidro. Na segunda metade do século XX, aliadas à descoberta da fonte ótica laser em 1960, as investigações a respeito dos guias de onda, conhecidos como fibras óticas, foram bastante aceleradas na busca da escolha de materiais e dopantes apropriados e que gerassem poucas perdas.

Dentre os requisitos investigados pelos pesquisadores, para os guias de onda, havia a indicação de que o índice de refração do material nos arredores do núcleo do dielétrico deveria ser ligeiramente menor do que o do material do núcleo (AGRAWAL, 1997; HECHT, 1999; OKAMATO, 2006). Mas a princípio ninguém sabia como obter uma espécie de vidro, para constituir a casca do guia de onda, com o índice de refração menor do que o da sílica fundida, que era o material que estava sendo estudado para a constituição do núcleo (HECHT, 1999). A idéia de recobrir o guia com uma espécie cobertura, também permitiria o aumento do seu comprimento e ao mesmo tempo facilitaria o seu manuseio.

No início do ano de 1966, Kao e Hockham publicaram um artigo, pela “Institution of Electrical Engineers”, apresentando análises cuidadosas e conclusões ousadas sobre as metas para a transmissão de energia em frequências óticas. O tipo particular de guia de onda dielétrico discutido foi o de seção transversal circular. Um dos requisitos apresentados para que uma fibra ótica pudesse ser usada com êxito, como um guia de onda em comunicações à longa distância, foi o de atingir perdas inferiores a 20 dB/km nos sinais luminosos transmitidos. Na época as perdas nas fibras óticas então disponíveis eram de cerca de 1000 dB/km. Os detalhes mencionados no trabalho de Kao e Hockham foram decisivos para convencer outros pesquisadores a apostarem em um novo meio de comunicação que pudesse oferecer alta capacidade de transmissão a baixo custo (KAO e HOCKHAM, 1966).

No final da década de 60, o físico Robert Maurer, coordenando uma equipe de jovens cientistas contratados pela Corning, uma companhia americana de produção de vidro, buscou recursos para concretizar um projeto para a produção de fibras monomodo. Em 1970, formulando estratégias e contando com a habilidade e o conhecimento de Donald Keck, Peter Schultz, Felix Kapron, Frank Zimar e outros colaboradores, Maurer atingiu a meta de obter o vidro mais claro, ou seja, mais transparente nas frequências óticas, já fabricado até então. Medidas cuidadosas mostraram que a fibra ótica produzida pelo seu grupo tinha atenuação de 16 dB/km, com um erro de mais ou menos 1 dB/km (KAPRON, KECK e MAURER, 1970; HECHT, 1999).

A partir da década de 70, a pesquisa foi direcionada à investigação de guias de onda que apresentassem alta capacidade de transmissão e, portanto baixas perdas (KECK, MAURER e SCHULTZ, 1973). Por demonstrarem muitas vantagens em relação aos meios que utilizavam condutores metálicos, as fibras óticas foram bastante difundidas nas redes de telecomunicações, de comunicação em ferrovias, de distribuição de energia elétrica (monitoração, controle e proteção), de distribuição de radiodifusão e televisão. Além disso foram empregadas na transmissão de dados, em redes internas industriais, equipamentos de sistemas militares, veículos, aeronaves, navios e

séries de instrumentos (DAKIN e CULSHAW, 1988; GIOZZA, CONFORTI e WALDMAN, 1991; WALDMAN e YACOUB, 1997).

Outra importante aplicação dos guias de onda dielétricos foi na área de sensores. Há registro de patentes de invenção de sensores de deslocamento mecânico, na década de 60, que utilizavam feixes de fibras (DAKIN e CULSHAW, 1988). Mais tarde a possibilidade de se multiplexar os sinais de vários sensores, inclusive de grandezas diferentes ao longo da mesma fibra, contribuíram para que os sensores à fibra ótica viessem a substituir os sensores convencionais em diversas aplicações.

Em 1978 o grupo de Kenneth O. Hill, objetivando o estudo de efeitos não-lineares, lançou uma intensa radiação de laser de argônio dentro de uma fibra dopada com germânio. Observou-se que, depois de alguns minutos, aumentava a intensidade da luz refletida e a atenuação do sinal transmitido dentro da fibra. O gradual aumento da refletividade com o tempo de exposição foi entendido como o resultado da formação de uma rede de índice de refração permanente fotoinduzida na fibra (HILL, FUJII, JOHNSON *et al.*, 1978). O efeito descoberto foi denominado de fotossensibilidade e as estruturas de “redes de Hill”. Mas a formação daquela rede permanente não interessou muitos pesquisadores, porque só funcionava na faixa do espectro visível e próxima do comprimento de onda da luz da escrita. Essa questão impedia a sua aplicação nas telecomunicações que faziam uso de comprimentos de onda na faixa do espectro infravermelho.

Mais tarde, em 1989, o grupo de Meltz, reconhecendo os trabalhos realizados por Lam e Garside em 1981 (LAM e GARSIDE, 1981), conseguiu redes por meio da incidência lateral de radiação ultravioleta na casca da fibra, utilizando uma técnica interferométrica também conhecida como holográfica. A exposição lateral da fibra a um feixe UV, para a produção de redes, foi possível porque a sua casca é transparente a essa radiação enquanto que o seu núcleo é fortemente absorvente a mesma. Alterando-se o comprimento de onda e o ângulo entre os dois feixes da radiação UV incidente, foi possível ajustar o período entre os máximos de interferência. As redes fabricadas por essa técnica eram feitas para funcionar em longos comprimentos de onda na região espectral de interesse para comunicações óticas e sensoriamento (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989). Essa descoberta motivou a pesquisa de novas técnicas de exposição, sem a necessidade da remoção da casca de vidro, tais como a interferométrica e a ponto-a-ponto. A técnica interferométrica mais difundida, apresentada por Hill e seu grupo, foi a com máscara de fase (HILL, MALO, BILODEAU *et al.*, 1993). Essas redes foram denominadas de redes de Bragg. As propriedades dessas estruturas possibilitaram o monitoramento de variações de temperatura, tensões longitudinais (KERSEY, MICHAEL, HEATHER *et al.*, 1997) e outras.

Em 1995, Vengsarkar e seus colaboradores descobriram um novo tipo de rede fotoinduzida. Tal rede foi formada pela indução de modulações espaciais do índice de refração do núcleo de fibras dopadas com germânio na ordem de centenas de micrometros de espaçamento. As propriedades dessas estruturas periódicas possibilitaram a implementação de sensores de temperatura, tensões longitudinais e índice de refração de fluidos com os quais a rede entrava em contato (BHATIA, 1996). Tais redes foram conhecidas como redes de período longo. Diferentes técnicas de produção dessas redes foram objeto de pesquisa nos últimos anos (BHATIA e VENGSARKAR, 1996; BLOWS e TANG, 2000; CHEN e HERMAN, 2001; REGO, OKHOTNIKOV, DIANOV *et al*, 2001; FALATE, 2002; JAMES, TATAM, TWIN *et al*, 2003).

A tecnologia dominante na monitoração envolvendo fibras óticas hoje é baseada na formação de redes. As redes mais utilizadas como sensores são as redes de Bragg. Em segundo lugar estão as redes de período longo. Comparados a outros sensores à fibra ótica, são praticamente imunes a flutuações na potência luminosa que neles se propaga, pois são codificados em comprimento de onda. São também facilmente introduzidos em enlaces óticos ou embutidos em materiais para detectar alterações de parâmetros físico-químicos em tempo real. Apresentam ainda predicados tais como imunidade à interferências eletromagnéticas, peso leve, pequeno tamanho, tolerância à elevadas temperaturas e à inflamáveis e corrosivos (ZHANG, S., LEE, S. B., FANG, X. *et al*, 1999). Dentre todas as características dos sensores à fibra ótica, destaca-se a possibilidade de produção de sistemas distribuídos ou quase distribuídos, o que é difícil de obter com sensores tradicionais. Mas apesar de todos os avanços dos últimos anos na pesquisa e desenvolvimento de sensores a fibra ótica, existem ainda poucos dispositivos produzidos comercialmente. Essa dificuldade ocorre principalmente pela difícil aceitação de uma nova tecnologia, em setores nos quais os sensores tradicionais atuam eficientemente, e devido à principal desvantagem dos sensores baseados em redes em fibras óticas que é a sensibilidade cruzada. No entanto, analisando cuidadosamente as vantagens e desvantagens apresentadas por esta classe de sensores, é possível encontrar vários setores interessantes para a sua aplicação. Dentre esses setores destacam-se as indústrias química, petroquímica e aeronáutica, além da biomedicina. Tais dispositivos são frutos de uma longa jornada de pesquisa iniciada há mais de oitocentos anos, quando as técnicas de fabricação de sua principal matéria prima, no caso o vidro, passaram a ser aperfeiçoadas. Como toda a jornada científica, é resultado de tentativas, erros e acúmulo de experiências. Ainda há muito a ser estudado a respeito desse assunto. Qualquer conquista de conhecimento sempre será resultante de muita perseverança e, ao mesmo tempo, dependente do desenvolvimento de materiais, tecnologias e metodologias de pesquisa.

1.2 ESTADO DA ARTE

Nesta seção será apresentada uma revisão da evolução do conhecimento referente aos assuntos principais que foram estudados neste trabalho. Fazem parte dessa coletânea de informações investigações relacionadas às redes de Bragg (“*Fiber Bragg Gratings*” – FBG) e especialmente às redes de período longo (“*Long Period Gratings*” – LPG). Será citada a descoberta da modulação do índice de refração, bem como os principais processos de gravação das redes e os resultados encontrados por alguns pesquisadores relativos à estabilização, principalmente térmica, dos dispositivos e o seu emprego como sensores. Também serão relatados alguns ensaios de curvatura com redes de período longo gravadas em variados tipos de fibras óticas com o emprego de distintas técnicas. Por fim serão citados alguns métodos de análise de resultados experimentais, destacando-se os modelos matemáticos das redes neurais artificiais (RNA) que foram empregadas nos dados coletados nos ensaios de curvatura.

1.2.1 Redes de Reflexão ou Redes de Bragg

Uma rede de Bragg pode ser gravada em uma fibra ótica por um processo de escrita interno ou externo. Após Hill e seu grupo terem demonstrado a escrita interna de redes permanentes em fibras óticas (HILL, FUJII, JOHNSON *et al*, 1978), raras pesquisas foram feitas nos três anos seguintes. Somente em 1981 houve a publicação do trabalho de Lam e Garside no qual mostraram que a magnitude das alterações no índice de refração, do núcleo de fibras óticas, era proporcional ao quadrado da potência da fonte de escrita, um laser de Ar⁺, que operava em 488 nm. Tal constatação sugeriu um processo de dois fótons como um possível mecanismo envolvido na modulação do índice de refração (LAM e GARSIDE, 1981). Mas o interesse nessa área passou a crescer de fato apenas a partir de 1989, quando a equipe de Meltz propôs a técnica de escrita externa para as redes (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989).

Diversas técnicas foram desenvolvidas e aprimoradas para a produção de redes de Bragg. Além da técnica interferométrica proposta por Meltz (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989), existe a que utiliza um prisma para gerar os dois feixes interferentes e a que utiliza um dispositivo, denominado de máscara de fase. Além dessas há a técnica ponto-a-ponto, na qual o feixe UV é focalizado em pontos fixos ao longo do comprimento da fibra, mas essa técnica só é útil na fabricação de redes com períodos superiores a 10 μm (KASHYAP, 1990).

Em 1993 Lemaire e seu grupo desenvolveram um procedimento para obter grande modulação do índice de refração de fibras ($\Delta n \approx 10^{-3}$ a 10^{-2}) dopadas com GeO_2 . A técnica, que promovia o aumento da fotossensibilidade das fibras, consistia em armazená-las em uma atmosfera de alta pressão de hidrogênio (20 atm - 750 atm) com a temperatura entre 20°C e 75°C (LEMAIRE, ATKINS, MIZRAHI *et al*, 1993). Além dessa técnica, para promover o aumento da fotossensibilidade, ficaram também conhecidos os processos de varredura à chama (BILODEAU, MALO, ALBERT *et al*, 1993) e adição de dopantes como boro (WILLIAMS, AINSLIE, ARMITAGE *et al*, 1993).

Em 1994, Martin e Ouellette conseguiram fabricar FBGs fortes (com 98,5 % de refletividade), em fibras hidrogenadas, utilizando como fonte um laser UV operando em 266 nm. (MARTIN e OUELETTE, 1994). No mesmo ano Erdogan e seus colaboradores pesquisaram a perda de refletividade de FBGs gravadas em fibras dopadas com érbio e estabeleceram a “lei da potência”, que é uma função do tempo, na qual o fator de multiplicação e o expoente são dependentes do tempo. Essa lei foi consistente com um rápido decaimento inicial seguido por um substancial decréscimo na taxa de decaimento da refletividade. Tal mecanismo poderia ser acelerado com acréscimos de temperatura. (ERDOGAN, MIZRAHI, LEMAIRES *et al*, 1994).

Em 1997, Atkins e Espindola tentaram utilizar pela primeira vez um laser de argônio, operando em 351 nm, na gravação de FBGs em fibras dopadas com germânio, hidrogenadas e submetidas anteriormente a uma exposição a um laser de CO_2 . Mas as redes apresentaram baixa estabilidade e eficiência (~1,25 dB) com modulações de índice de refração de aproximadamente $2 \cdot 10^{-4}$. No mesmo trabalho há relatos de gravações de FBGs com a fonte ótica operando em 325 nm (ATKINS e ESPINDOLA, 1997). No mesmo ano Starodubov e sua equipe demonstraram a produção de FBGs com modulação de índice de refração de aproximadamente 10^{-4} em fibras dopadas com germânio e outras com boro com o uso de um laser operando em 334 nm. (STARODUBOV, GRUBSKY, FEINBERG *et al*, 1997).

Grubsky e seu grupo gravaram redes em fibras dopadas com germânio, tanto hidrogenadas quanto não hidrogenadas, utilizando um laser de argônio. As fibras hidrogenadas permaneceram por dois dias sob pressão de 280 atm e temperaturas entre 70 e 80°C. Os pesquisadores demonstraram a diferença entre os mecanismos físicos envolvidos na modulação do índice de fibras hidrogenadas e não hidrogenadas (GRUBSKY, STARODUBOV e FEINBERG, 1999).

Meltz e seus colaboradores propuseram sensores de índice de refração utilizando redes de Bragg. Mas era preciso reduzir o diâmetro da casca da fibra de modo que o índice efetivo do modo fundamental de núcleo passasse a ser influenciado pelo índice de refração do meio externo. Esse

processo reduzia a rigidez e a integridade do sensor e diminuía o seu desempenho quando sujeito a condições ambientais mais severas.(MELTZ, MOREY, HEWLETT *et al*, 1995 *in* BHATIA, 1996).

As fibras são fragilizadas na maioria das técnicas de escrita das redes, já que o revestimento primário das mesmas é removido, na região de escrita, para que o núcleo seja exposto à radiação UV. Existe uma técnica de pulso único, baseada em uma montagem holográfica, na qual as redes são gravadas durante o processo de fabricação da fibra, logo após o seu puxamento e antes de ser recoberta com o revestimento primário (DONG, ARCHAMBAULT, REEKIE *et al*, 1993). Outras técnicas propostas para a gravação da FBG por cima da sua cobertura são limitadas a alguns recobrimentos de acrilato, tais como os sem dopantes antioxidantes. Uma técnica aplicável para manter a robustez do sensor seria a retirada do acrilato, com um ácido, e a sua recobertura para produzir dispositivos resistentes (LEFEBVRE, VINCELETTE, FICOCELLI *et al*, 2006).

Douay e os seus colaboradores realizaram um estudo com redes de Bragg escritas em fibras dopadas com GeO₂ submetendo-as a diferentes incrementos de temperatura. A idéia do trabalho desse grupo foi a de avaliar as mudanças permanentes, que eram induzidas pelo aquecimento, no espectro do sinal ótico refletido pelas redes, ou seja, a histerese térmica. Para cada experimento três FBGs eram escritas em uma mesma fibra usando a mesma fluência do laser, mas com diferentes números de pulsos, de modo que os seus espectros óticos fossem diferentes. Duas das redes de cada fibra eram usadas nos testes, ou seja, introduzidas no forno, e a terceira era sempre mantida em temperatura ambiente para servir de referência. As duas redes que eram aquecidas no forno estavam gravadas a 1 cm uma da outra e distantes da terceira rede de uma distância de 80 cm. A região da fibra onde as três FBGs foram gravadas foi inserida em um tubo de quartzo de 5 mm de diâmetro e 1,1 m de comprimento. O polímero que recobria a fibra foi removido e nos extremos do tubo de quartzo a fibra foi colada. Foram realizadas duas espécies de experimentos: (i) dois ciclos de aquecimento gradual das redes de Bragg de, 25 a 425°C, (com gravações de cada espectro após cada valor de temperatura estabilizar-se por 30 min) e, (ii) a aplicação de diferentes degraus de temperatura ($\Delta T = T - T_0$), nos quais as redes eram retiradas da temperatura ambiente (T_0) e introduzidas dentro do forno já aquecido a uma dada temperatura (T), permanecendo no seu interior por 30 minutos, e depois devolvidas à temperatura ambiente (T_0). O grupo observou que após cada ciclo gradual de aquecimento, de 25 a 425°C, os deslocamentos espectrais das redes, em função da temperatura, poderiam ser representados por uma função quadrática crescente. Além disso, após o primeiro ciclo de aquecimento que atingiu os 425°C, detectou-se uma histerese térmica, já que o espectro de cada rede não retornou à posição na qual se encontrava aos 25°C, exibindo um deslocamento para menores valores, em comprimento de onda. E após as FBGs serem submetidas

aos degraus de temperatura e retornarem à temperatura ambiente, o comprimento de onda de Bragg era deslocado permanentemente para valores menores. As redes gravadas com um maior número de pulsos apresentaram um maior deslocamento espectral permanente. Mais especificamente, a mudança permanente do comprimento de onda de Bragg aumentou proporcionalmente com a modulação do índice de refração fotoinduzido e dependeu do processo de gravação da rede e do tipo de fibra. Essas observações sugeriram que a histerese permanente, no comprimento de onda de Bragg, era devida a mudanças no índice de refração fotoinduzido via destruição de centros de defeitos ou compensação de “*stress*” (DOUAY, FERTEIN, XIE *et al*, 1993).

Pal e seus colaboradores propuseram o uso de FBGs em sistemas automatizados, através de ajustes polinomiais para calibração de medidas de temperatura. Resultados mais precisos em medidas acima de 500°C foram obtidos levando-se em conta a não linearidade da resposta térmica das redes (PAL, SUN, GRATAN *et al*, 2004).

Masuda e seu grupo investigaram os desvios do comprimento de onda central, do pico de reflexão de FBGs gravadas em fibras hidrogenadas, durante processos de recozimento (“*annealing*”) posteriores à exposição ao UV através de uma máscara de fase. Eles descobriram que os desvios em comprimento de onda são provocados pela difusão de hidrogênio molecular que é induzida termicamente. A fim de reproduzir os detalhes da evolução dos deslocamentos em comprimento de onda observada durante o primeiro “*annealing*”, que era precedido pela exposição ao UV, o grupo promoveu o recarregamento das FBGs com hidrogênio e depois as submeteu a um segundo “*annealing*” sem expô-las novamente ao UV. A evolução do comprimento de onda durante o segundo “*annealing*” foi idêntica à evolução durante o primeiro “*annealing*” provando claramente que ela é causada pela difusão do hidrogênio molecular da fibra ótica (MASUDA, NAKAMURA, KOMATSU *et al*, 2004).

Na 18ª Conferência Internacional de Sensores à Fibra Ótica, realizada em Cancun, em 2006, foi proposto um sensor baseado em FBGs, gravadas em fibras dopadas com bismuto e germânio, capaz de suportar temperaturas superiores a 1000°C. Os pesquisadores gravaram redes com radiação UV, utilizando um laser de KrF operando em 248 nm, com uma máscara de fase. Uma das redes passou por um recozimento à temperaturas que variaram de 300°C até 900°C, com incrementos de 100°C. A rede permaneceu sendo recozida em cada patamar de temperatura por um tempo de 24 h. Demonstrou-se que a FBG pode ser mantida em alta temperatura, em torno de 900°C por 24 h, permanecendo com considerável refletividade (de cerca de 18%). O deslocamento do comprimento de onda de Bragg avançou para maiores valores com o acréscimo de temperatura, como era esperado. Contudo, para cada valor de temperatura alcançado, surgia um pequeno

deslocamento espectral para menores comprimentos de onda nas primeiras horas, que requeria cerca de 8 a 10 horas para alcançar a estabilidade. Outras três redes passaram por três recozimentos: (i) em 550°C por 650 h, (ii) em 650°C por 190 h e, (iii) 850°C por 55 h. No final do processo as refletividades ficaram sendo de 16%, 22% e 29%. Outras redes com refletividades superiores a 99% passaram por um teste de choque térmico, sem passarem antes por nenhum recozimento. Observou-se que as FBGs gravadas em fibras dopadas com bismuto e germânio permaneceram por 15 segundos, em 1100°C, e 300 segundos, em 1000°C, antes de se apagarem. Com isso provou-se que as redes escritas em fibras dopadas com bismuto e germânio eram muito mais resistentes em elevada temperatura do que as escritas em fibras dopadas com germânio ou dopadas com boro e germânio (ZHAO, SHEN, SUN *et al*, 2006).

Até o ano de 2006, a máxima temperatura relatada para a operação de sensores com redes de Bragg foi de 600°C, o que se devia as fracas ligações de germânio e oxigênio. Inclusive uma FBG podia ser completamente apagada em temperaturas próximas de 700°C (BRAMBILLA, 2002). Zhang e Kahrizi apresentaram em 2007 o desenvolvimento de um sensor, de elevada resistência térmica, de FBG gravada em fibra hidrogenada, dopada com germânio, submetida a recozimento em altas temperaturas (próximas de 1000°C). A modulação do índice de refração seria induzida por moléculas de água geradas no núcleo da fibra. Em teoria, a formação da molécula de água dentro da FBG resultaria da decomposição de ligações de Si-OH e da composição de grupos de OH. Dessa forma a temperatura para apagar uma FBG, com impurezas de moléculas de água, seria maior do que a que normalmente apagava uma FBG convencional. Os autores relataram que essa nova FBG poderia atingir 1100°C ou mais (ZHANG e KAHIRIZI, 2007).

1.2.2 Redes de Transmissão ou Redes de Período Longo

A fabricação de uma LPG introduz uma modulação periódica nas propriedades óticas de uma fibra. Isso pode ser obtido através da modificação permanente do índice de refração do núcleo da fibra ou através de deformações mecânicas na mesma. As primeiras redes de período longo foram propostas em 1995 por Ashish Vengsarkar. Ele produziu redes através da modulação periódica do núcleo de fibras hidrogenadas e dopadas com germânio com período de centenas de micrometros (BHATIA, 1996). As primeiras publicações a respeito desse tipo de rede surgiram em 1996 (VENGSARKAR, LEMAIRE, JUDKINS *et al*, 1996; VENGSARKAR, PEDRAZZANI, JUDKINS *et al*, 1996; BHATIA, 1996; BHATIA e VENGSARKAR, 1996). As aplicações iniciais

propostas para as LPGs objetivavam a sua utilização como filtros de rejeição de banda (VENGSARKAR, LEMAIRE, JUDKINS *et al*, 1996) e como equalizadores de ganho para um amplificador à fibra dopada com Érbio (VENGSARKAR, PEDRAZZANI, JUDKINS *et al*, 1996; WYSOCKI, JUDKINS, ESPINDOLA *et al*, 1997).

O processo apresentado por Vengsarkar e seus colaboradores era a gravação ótica de LPGs com períodos variando de 100 a 700 μm , em fibras dopadas com germânio e hidrogenadas, com um laser de KrF de comprimento de onda de 248 nm. Após a gravação as redes passavam por um recozimento, a 150°C por 4 horas, para remover o hidrogênio que não havia reagido na fibra e estabilizar os defeitos induzidos pela radiação ultravioleta (UV). As LPGs apresentaram sensibilidades entre -0,7 e 1,5 nm/m ϵ (nanômetros por milistrain - 1 m ϵ é igual à deformação relativa de 1 mm em uma base de 1 m), para deformações longitudinais, e entre 0,04 e 0,05 nm/°C para temperatura (VENGSARKAR, LEMAIRE, JUDKINS *et al*, 1996).

Segundo Bhatia e Vengsarkar (1996), as principais vantagens apontadas para as redes de período longo, comparando-as com as FBGs, são a sua alta sensibilidade aos parâmetros externos (temperatura, tensões longitudinais e índice de refração), a possibilidade de implementação com esquemas de demodulação de sinais mais econômicos, baixas perdas de inserção e baixa reflexão (BHATIA e VENGSARKAR, 1996). No trabalho desses dois pesquisadores, as LPGs foram gravadas óticamente com UV em cinco diferentes tipos de fibras dopadas com germânio e hidrogenadas. Depois passavam por um recozimento de 10 horas a 150 °C para remover o hidrogênio que não havia reagido na fibra e estabilizar os defeitos induzidos pela radiação ultravioleta (UV). Das cinco redes, a que foi mais sensível às deformações longitudinais teve uma sensibilidade de 15,21 nm/ $\mu\epsilon$ (nanômetros por microstrain – 1 $\mu\epsilon$ é igual à deformação relativa de 1 μm em uma base de 1 m), mostrando sensibilidade cerca de duas vezes maior do que a de uma FBG centrada no mesmo comprimento de onda (8,3 nm/ $\mu\epsilon$) (BHATIA e VENGSARKAR, 1996).

Ainda em 1996, Vikram Bhatia publicou em sua tese de doutoramento propriedades das LPGs e aplicações dessas redes para o sensoriamento. Ele fez uma análise da modulação espectral e desenvolveu um modelo analítico, capaz de prever a localização das bandas de ressonância, como funções do período da rede e parâmetros da fibra. Demonstrou que a LPG pode apresentar duas regiões de operação, denominadas de região normal e anômala. Nesse trabalho, o pesquisador apresentou uma avaliação teórica da sensibilidade da LPG que revelou uma forte dependência da mesma com as propriedades da fibra ótica utilizada, com o período de gravação, com a ordem do modo de casca, com as condições de gravação e recozimento empregadas e com o índice de refração do meio externo. Nesse trabalho também foram apresentados estudos a respeito de redes

insensíveis a deformação e à temperatura, bem como aplicações desses dispositivos na área da saúde e bioquímica. Além dessas aplicações, as LPGs poderiam ser usadas para separar efeitos de temperatura e tensões longitudinais atuando simultaneamente sobre a fibra (BHATIA, 1996).

A modulação do índice do núcleo da fibra, nos trabalhos feitos nos anos seguintes, foi obtida por irradiação de luz UV (BHATIA e VENGSARKAR, 1996; CHEN, HERMAN, TAM *et al*, 2000; GUAN, TAM, HO *et al*, 2000; BLOWS e TANG, 2000), por implantação de íons (FUJUMAKI, OHKI, BREBNER *et al*, 2000), por irradiação de pulsos com duração de femtosegundos no infravermelho (KONDO, NOUCHI, MITSUYU *et al*, 1999), por irradiação de laser de CO₂ (DAVIS, GAYLORD, GLYTSIS *et al*, 1998; DROZIN, FONJALLAZ e STENSLAND, 2000), por difusão de dopantes no núcleo (DIANOV, KARPOV, GREKOV *et al*, 1997; DIANOV, KARPOV, KURKOV *et al*, 1998), por relaxação de tensões mecânicas (KIM, HAN, LEE *et al*, 2000), por descargas elétricas (método do arco elétrico) (KOSINSKI e VENGSARKAR, 1998; REGO, OKHOTNIKOV, DIANOV *et al*, 2001; PALAI, SATYANARAYAN, DAS *et al*, 2001; FALATE, 2002) e por indução mecânica (SAVIN, DIGONNET, KINO *et al*, 2000; JIANG, LI, LIN *et al*, 2002), adelgando a fibra (KAKARANTZAS, DIMMICK, BIRKS *et al*, 2001) ou por deformação do núcleo (POOLE, PRESBY e MEESTER, 1994; NARAYANAN, PRESBY e VENGSARKAR, 1996), ou por deformação da casca (LIN, CHERN e WANG, 2001). LPGs também foram fabricadas em fibras de cristais fotônicos com o uso de laser de CO₂ (KAKARANTZAS, BIRKS e RUSSEL, 2002).

Em 1998 foi apresentada uma técnica de gravação de LPGs ponto-a-ponto com o uso de um laser de CO₂ (AKIYAMA, NISHIDE, SHIMA *et al*, 1998). Esse processo demonstrou-se vantajoso devido à elevada mudança de índice induzido. As redes eram facilmente encapsuladas devido ao seu reduzido tamanho, além de ser desnecessário o uso de fibras especiais. Tais fibras também se demonstraram estáveis quando submetidas a temperaturas maiores do que 1200°C (DAVIS, GAYLORD, GLYTSIS *et al*, 1998). Inicialmente, acreditou-se que a mudança no índice devida à exposição de laser de CO₂ era resultante de densificações do vidro e/ou da relaxação de tensões da casca de fibras, tais como a SMF28 da Corning, durante a fabricação (KIM, HAN, LEE *et al*, 2000). Contudo, houve evidências que sugeriram que a modulação do índice é devida à quebra de ligações de Si-O-Ge (DROZIN, FONJALLAZ e STENSLAND, 2000). As redes escritas com essa técnica, que é baseada no efeito do choque térmico de pulsos com taxa de repetição da ordem de 10³ pps (pulsos por segundo), apresentaram características diferentes das fabricadas com outros métodos e puderam ser aplicadas de diferentes formas no sensoriamento (RAO, WANG, RAN *et al*, 2003) e na equalização de ganho (WANG, RAO, RAN *et al*, 2003; RAO, HU and NIU, 2004).

Alguns pesquisadores utilizaram fontes operando em diferentes comprimentos de onda para a gravação das LPGs. Em 1999 redes foram gravadas tanto pela técnica ponto-a-ponto, quanto pela técnica que faz uso da máscara de fase com laser de argônio (244nm) (ZHANG, LIU, EVERALL *et al*, 1999). No mesmo ano Zhang, Liu e Bennion mostraram LPGs fabricadas com laser de vapor de cobre operando em 255 nm. A equipe gravou uma rede em uma fibra não hidrogenada e outra em uma fibra hidrogenada. Como a fibra hidrogenada tornou-se mais fotossensível e a potência de escrita foi alta (500 mW para as LPGs fabricadas), uma maior birrefringência foi induzida pela exposição dessa fibra à radiação UV (ZHANG, LIU e BENNION, 1999).

Em 1999, Jang e sua equipe fizeram um estudo a respeito dos efeitos da difusão das moléculas de hidrogênio nos modos de acoplamento de LPGs gravadas com laser de KrF, operando em 248 nm. Algumas fibras foram armazenadas numa câmara de hidrogênio, sob pressão de 107 atm e temperatura de 90°C, por cinco dias. Depois LPGs foram gravadas nessas fibras após as mesmas serem mantidas, em temperatura ambiente e pressão de 1 atm, durante intervalos de tempo que variaram de 15 min a 55 h. Os valores iniciais, do índice de refração efetivo do núcleo e da casca, variaram com o tempo à medida que o hidrogênio difundiu para fora da fibra. Essa variação provocou mudanças nas condições de acoplamento das redes. Além disso, o espectro de transmissão das LPGs apresentou instabilidade com o tempo por causa da difusão de hidrogênio. Quanto mais tempo se passava, após as fibras terem sido retiradas da hidrogenação, maior era a posição inicial do comprimento de onda de acoplamento, do modo LP₀₅ que foi obtido; até um tempo de 30 h após a retirada da hidrogenação. Após 30 h da retirada das fibras da câmara de hidrogênio, a posição inicial do comprimento de onda deslocava-se para menores valores. Concluiu-se que o aumento do índice de refração efetivo foi linearmente proporcional à concentração de hidrogênio dentro da fibra. Também foi feita uma simulação matemática de resultados na qual foi calculada a evolução da diferença, entre o índice do núcleo e da casca (Δn_{ti}^h), denominada de índice de refração efetivo normalizado, com o tempo. Descobriu-se que Δn_{ti}^h foi máximo para cerca de 31 horas após a retirada das fibras da hidrogenação, demonstrando um valor máximo para a posição inicial do comprimento de onda de acoplamento (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999).

Em 2000, Chen e seus colaboradores apresentaram uma rede com crescimento rápido, formada em fibras hidrogenadas, com o uso de um laser excímero de Flúor operando em 157 nm. Esse último grupo utilizou a fluência do laser de 5,0 J/cm² e obteve uma rede com eficiência de 21 dB e largura de banda à meia altura de 46 nm. Com o uso do laser de F₂ a exposição foi 250 vezes mais rápida do que com o uso do laser de KrF operando em 248 nm (CHEN, HERMAN, TAM *et al*, 2000).

Chen e Herman no ano de 2001 apresentaram um trabalho onde LPGs foram gravadas, com idênticas máscaras de amplitude, com lasers de F_2 e de KrF, em fibras hidrogenadas e não hidrogenadas. Percebeu-se uma maior eficiência na rede gravada com laser de F_2 e uma diferença, na posição dos vales de maior atenuação dessas redes, de 130 nm (estando o vale da rede gravada com laser de F_2 em uma posição espectral de maior comprimento de onda). Além disso, para a gravação da rede com o laser de F_2 foi requerida uma fluência 250 vezes menor do que com o laser de KrF. A eficiência da rede gravada em fibra não hidrogenada com o laser de F_2 quase foi igual a da rede gravada em fibra hidrogenada com laser de KrF. Após o recozimento, a 150°C por 24 horas, a LPG gravada com laser de F_2 , em fibra hidrogenada, apresentou um deslocamento de 8 nm no sentido de um menor comprimento de onda e uma perda de eficiência de 2 dB. Tal valor foi apontado como bem menor do que o normalmente obtido com redes gravadas com laser de KrF em fibras hidrogenadas. Também foi mostrada a comparação da eficiência entre duas redes gravadas com fluências diferentes do laser de F_2 , em fibras não hidrogenadas. A rede gravada com maior fluência apresentou menor eficiência. Isso foi justificado pelo dano causado pelo laser e pelo aumento de absorção na casca da fibra (CHEN e HERMAN, 2001).

Blows e Tang investigaram a gravação de LPGs de elevada eficiência com o uso de um laser Nd:YAG operando em 355 nm. O uso de uma fonte ótica com essa característica possibilitou a gravação em fibras hidrogenadas sob pressão de 200 atmosferas e temperatura de 80°C por dois dias. Após a capa da fibra ser retirada, foi feita uma cobertura com uma resina quase transparente à radiação UV. Devido à absorção parcial da radiação UV, pela resina que recobriu a fibra, o núcleo recebeu aproximadamente uma radiação mil vezes mais fraca do que com o uso de um laser operando a 244 nm. Através da técnica de gravação ponto-a-ponto, um feixe de diâmetro de 50 μm foi focalizado na lateral da fibra, com o auxílio de lentes, por um tempo de exposição de 12 segundos por ponto. Foram gravados 215 pontos e a eficiência da melhor rede apresentada foi maior do que 30 dB com uma largura de banda à meia altura de 2 nm. A fluência do laser utilizado foi de aproximadamente 400 kJ/cm^2 . Após o recozimento as redes tiveram uma estabilidade similar àquelas escritas com lasers operando em 244 nm (BLOWS e TANG, 2000).

Outra técnica, já citada, para a fabricação de uma LPG é o arco elétrico, que é resultado da combinação de quatro efeitos que geram a modulação periódica das propriedades da fibra: (i) a indução de microcurvaturas na fibra, (ii) a difusão de dopantes (DIANOV, KARPOV, GREKOV *et al.*, 1997; DIANOV, KARPOV, KURKOV *et al.*, 1998), (iii) a relaxação de tensões internas (REGO, OKHOTNIKOV, DIANOV *et al.*, 2001) e (iv) uma redução periódica do diâmetro da fibra (KAKARANTZAS, DIMMICK, BIRKS *et al.*, 2001). Nesse processo uma descarga elétrica é

aplicada, gerando um aquecimento ponto-a-ponto ao longo do comprimento da fibra, com corrente e duração temporal adequadas, de modo a gerar perturbações periódicas.

Em 2002, Falate e colaboradores produziram com a técnica do arco elétrico LPGs e caracterizaram-nas para o sensoriamento. Foram produzidas redes com períodos entre 570 e 650 μm operando na terceira janela de transmissão em torno de 1,55 μm . O espectro de transmissão mostrou eficiências de até 4,7 dB e larguras de banda variando entre 29 e 62 nm. Para medição de temperatura na faixa entre 21°C e 63°C, a sensibilidade encontrada ficou entre 0,076 e 0,136 nm/°C. Para índices de refração variando de 1,333 a 1,430 foi obtida uma resolução média no valor de 0,0139 (nm)⁻¹ (FALATE, 2002). Em 2006 o mesmo grupo mostrou a possibilidade de utilização das LPGs como detectores de salinidade, analisando também as sensibilidades cruzadas à temperatura, deformação longitudinal, curvatura, torção e carga transversal (FALATE, 2006).

LPGs produzidas com arco elétrico também foram o objeto de estudo de Kamikawachi e seus colaboradores. Foram produzidas redes com períodos de 598, 604 e 614 μm operando na terceira janela de transmissão em torno de 1,55 μm . Tais redes foram demonstradas eficientes para a detecção de hidrocarbonetos em diferentes ambientes (KAMIKAWACHI, 2003).

Em 2003, James e Tatam comentaram que a exposição à radiação UV induz uma birrefringência que pode atuar nas características de acoplamento da rede, podendo induzir divisões das bandas de atenuação das LPGs, mesmo usando fibras de baixa birrefringência (JAMES e TATAM, 2003). Isso sugeriu que a modulação do índice de refração do núcleo da fibra ótica no lado que é exposto a radiação UV é maior do que a modulação no lado não exposto, provando que a radiação UV é atenuada na medida em que atravessa o núcleo (VENGSARKAR, ZHONG, INNISS *et al*, 1994; DUHEM e DOUAY, 2000). A indução de birrefringência em uma LPG possibilita a sua utilização na detecção de curvaturas em diferentes direções em variados tipos de estruturas tais como construções, cabos condutores de energia e outros.

Ainda no trabalho de 2003, James e Tatam comentaram que a modulação do índice de refração na fibra ótica apresenta instabilidade, pois decai com o tempo causando significativas mudanças espectrais. O recozimento é capaz de remover tal instabilidade. O uso da hidrogenação, para aumentar a fotossensibilidade das fibras, pode provocar alterações adicionais no espectro de transmissão das LPGs mesmo após a gravação encerrar porque o hidrogênio continua a difundir-se para fora da fibra. Nesse mesmo trabalho comentou-se também que LPGs, fabricadas em fibras hidrogenadas, quando expostas à radiação UV operando a 193 nm, apresentaram um crescimento do seu vale de atenuação de mais de 14 dB e um aumento na posição do comprimento de onda central de 40 nm nas primeiras 20 horas após o término da gravação. Nas 450 horas seguintes,

observou-se uma lenta redução na profundidade do vale de atenuação e uma redução na posição do comprimento de onda central de 50 nm. Esse efeito foi atribuído ao esgotamento do hidrogênio nas regiões do núcleo expostas à radiação UV. A difusão de hidrogênio das regiões não expostas para as regiões expostas do núcleo produzia um aumento na amplitude da modulação do índice de refração, porque o índice passava a aumentar nas regiões expostas (devido ao aumento na concentração de hidrogênio) e a diminuir nas não expostas (devido à redução na concentração de hidrogênio) (JAMES e TATAM, 2003). Logo, a eficiência da rede crescia após encerrar a gravação. Tal efeito era seguido por uma lenta difusão de hidrogênio para fora da fibra. Durante esse período, a taxa de difusão de hidrogênio para fora da fibra tanto da região exposta quanto da não exposta do núcleo era igual e não provocava mudanças adicionais na modulação do índice ou na eficiência da rede, mas causava uma redução na posição espectral do vale de atenuação. Efeitos similares foram observados em fibras hidrogenadas, gravadas com lasers operando em 248 nm (JANG, KWACK, LEE *et al*, 1997) e em 193 nm (GUAN e TAM, 2000). Os primeiros autores não ofereceram explicação para as suas observações. Mas o pesquisador Guan e seus colaboradores (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000), forneceram as mesmas explicações de James e Tatam (2003) para o crescimento das LPGs. Inclusive esses últimos constataram que o crescimento da LPG podia ser acelerado através de acréscimos de temperatura.

A variação do espectro da LPG, após o término da sua gravação, limita a possibilidade de fabricação desse tipo de rede com características bem definidas em fibras hidrogenadas. Segundo James e Tatam (2003), a pré-exposição de fibras hidrogenadas a um feixe uniforme de radiação UV é capaz de manter o aumento da fotossensibilidade promovido pela hidrogenação. A pré-exposição de fibras hidrogenadas à radiação UV aumenta o número de defeitos responsáveis pela fotossensibilidade e esses permanecem mesmo após a difusão do hidrogênio para fora da fibra. Se uma LPG é gravada em uma fibra hidrogenada e pré-exposta à radiação UV, mesmo depois do hidrogênio difundir para fora da fibra, não ocorrem alterações na sua eficiência e posição espectral. Ou seja, se uma fibra é retirada da hidrogenação, em seguida pré-exposta a um feixe uniforme de UV e depois guardada em temperatura ambiente por duas semanas antes da gravação, a fotossensibilidade é mantida e o espectro da LPG é mais estável. Tal efeito foi visto pré-expondo as fibras hidrogenadas à radiação UV proveniente de fontes de onda contínua, operando em 244 nm, e proveniente de fontes pulsadas, operando em 157 nm e 193 nm (JAMES e TATAM, 2003).

Uma importante aplicação das LPGs é o monitoramento de curvaturas. Em 1998, Patrick e seus colaboradores submeteram redes gravadas com UV a curvaturas de até $4,4 \text{ m}^{-1}$, sendo possível a detecção de alterações de curvaturas tão pequenas quanto $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$. A sensibilidade à curvaturas

não foi linear e sua magnitude dependeu da rotação da fibra relativa ao plano de curvatura, o que sugeriu que a exposição à radiação UV pode causar uma assimetria no perfil de modulação do índice de refração do núcleo. Foi feito o controle do estado de polarização da luz transmitida nas LPGs detectando-se mudanças espectrais de $\pm 0,1$ nm rotacionando a polarização linear de 90° , demonstrando ao grupo que girar o modo de polarização do núcleo não é equivalente a girar a LPG. Tais redes foram gravadas em fibras hidrogenadas utilizando máscara de amplitude e um laser excímero operando em 248 nm com fluência de $900\text{J}/\text{cm}^2$ (PATRICK, CHANG e VOHRA, 1998).

Patrick gravou LPGs em fibras contendo o núcleo excêntrico investigando pela primeira vez a sensibilidade dessas redes à curvatura. As fibras eram dopadas com germânio e hidrogenadas e a gravação era feita com um laser excímero com fluência de $1\text{kJ}/\text{cm}^2$. As redes gravadas eram recozidas por 24 horas, em uma temperatura de 80°C , a fim de difundir o hidrogênio molecular remanescente. As fibras foram rotacionadas de 0 a 360° e a cada 45° foi determinada a sensibilidade à curvaturas entre 0 e 2 m^{-1} para encontrar a rotação da fibra na qual a sensibilidade era maior. Patrick investigou uma banda de ressonância que exibia deslocamentos para maiores ou para menores comprimentos de onda, relativos à curvaturas com raio positivo ou negativo. A sensibilidade foi linear para curvaturas maiores do que $0,35\text{ m}^{-1}$, apresentando o valor de $9,6\text{ nm}/\text{m}^{-1}$, para curvaturas negativas, e de $10,4\text{ nm}/\text{m}^{-1}$ para curvaturas positivas. A sensibilidade determinada para deformações longitudinais, que foi praticamente igual à de redes gravadas em fibras com núcleos concêntricos, foi de $-3,4 \cdot 10^{-4}\text{ nm}/\mu\text{e}$ (PATRICK, 2000).

LPGs gravadas com UV em fibras não hidrogenadas, dopadas com boro e germânio, foram submetidas a curvaturas em quatro orientações diferentes, correspondentes aos ângulos de 0° , 90° , 180° e 270° . A máxima discrepância para a sensibilidade à curvatura entre essas diferentes orientações foi menor do que $1\text{ nm}/\text{m}^{-1}$, o que revelou que a sensibilidade daquelas redes praticamente independia da orientação da curvatura. A sensibilidade encontrada foi de $14\text{ nm}/\text{m}^{-1}$. Foram monitorados cinco vales de atenuação, do LP_{01} ao LP_{05} . Cada vale de atenuação da rede dividia-se em dois e estes se afastavam proporcionalmente aos acréscimos de curvatura mostrando uma resposta praticamente linear a esse parâmetro (LIU, ZHANG, WILLIAMS *et al*, 2000).

Rathje e seus colaboradores investigaram que erros na concentricidade do núcleo de fibras com o perfil de índice degrau submetidas à curvatura geram assimetria nas respostas espectrais. Foram gravadas LPGs com laser de excímero, operando em 248 nm, com máscara de amplitude, em fibras contendo desvios de $1\text{ }\mu\text{m}$ e de $2,4\text{ }\mu\text{m}$ na concentricidade do núcleo. Cada banda de atenuação das LPGs gravadas em fibras que não tinham o núcleo concêntrico, correspondente a cada modo de casca, apresentava-se dividida em duas bandas. A separação entre tais bandas,

correspondentes a um mesmo modo, aumentava de acordo com a ordem do modo e com a curvatura imposta. Curvaturas entre $0,15 \text{ m}^{-1}$ e $2,2 \text{ m}^{-1}$, foram aplicadas com o auxílio de uma régua de metal. A fibra era rotacionada ao redor do seu eixo longitudinal e a cada passo de 45° registravam-se espectros relativos às diferentes curvaturas. Para as redes que apresentavam pequeno desvio ($1 \text{ }\mu\text{m}$) na concentricidade do núcleo, a separação entre as bandas, correspondentes à divisão de um mesmo modo, aumentava praticamente igualmente em todas as orientações angulares, de acordo com os acréscimos de curvatura. Já nas redes com maior desvio ($2,4 \text{ }\mu\text{m}$) na concentricidade do núcleo, a separação entre as bandas foi dependente das orientações das curvaturas. Nesse último caso, tal efeito foi atribuído a uma quebra de simetria entre os dois modos de casca degenerados devida à introdução de uma diferença de índice entre eles. Um afastamento de 10 nm entre as bandas correspondeu a uma diferença de $4 \cdot 10^{-5}$ no índice efetivo do modo de casca. Esse afastamento não dependeu da diferença entre os índices de refração efetivos do modo de núcleo e de casca. Segundo Rathje e seu grupo, a quebra de simetria teria duas origens: (i) o pequeno desvio na concentricidade do núcleo e (ii) as curvaturas da fibra. Também foi investigada a influência do ângulo de incidência da radiação UV na direção da assimetria da LPG. Foram gravadas três redes com uma diferença de 120° no ângulo de incidência, com os dois tipos de fibras estudadas. Observou-se que a radiação UV induz uma assimetria no perfil do índice de refração do núcleo ao longo da sua direção de incidência. Na fibra com pequeno erro na concentricidade do núcleo, a combinação do efeito do erro da concentricidade do núcleo e do ângulo da radiação UV na gravação é que geram a assimetria (RATHJE, KRISTENSEN e HÜBNER, 2000).

Liu e sua equipe utilizaram um modelo matemático que levava em conta regiões de tensão e de compressão na casca da fibra para calcular a divisão que ocorria nos modos de casca de uma rede sujeita a curvaturas. As fibras utilizadas não eram birrefringentes, mas curvaturas provocavam a divisão de cada modo de casca simétrico em dois modos de casca assimétricos que se propagavam do lado interno e externo da curva imposta à rede. O modelo foi consistente com o experimento, mensurando-se uma separação espectral de 80 nm , para uma curvatura de $5,6 \text{ m}^{-1}$, que resultou em uma sensibilidade de $14,5 \text{ nm/m}^{-1}$ (LIU, ZHANG, WILLIAMS *et al*, 2001).

Uma forte dependência da sensibilidade à curvatura com a orientação rotacional da fibra é encontrada em redes escritas com lasers de CO_2 . Isso ocorre porque a radiação emitida pelo laser de CO_2 é fortemente absorvida no lado da fibra que é exposto a mesma, sofrendo uma atenuação na medida em que atravessa a fibra. Tal fenômeno acontece porque a sílica tem uma forte absorção na faixa do infravermelho, $10,6 \text{ }\mu\text{m}$, provocando o enfraquecimento dessa radiação ao longo da sua direção de incidência. A absorção não uniforme ao longo da secção transversal da fibra resulta em

uma assimetria nas modulações periódicas do índice da casca e do núcleo. LPGs gravadas com laser de CO₂ quando submetidas a curvaturas em diferentes direções exibem deslocamentos espectrais, variações de atenuação ou a combinação desses dois efeitos. Se essas redes não são curvadas, as rotações axiais não geram modificações espectrais. Van Wiggeren e seu grupo fizeram ensaios de curvatura em quatro diferentes orientações simétricas com LPGs gravadas com CO₂. Foi empregada uma curvatura de 2,1 m⁻¹ e os ensaios foram feitos com luz polarizada. A curvatura imposta em um plano paralelo ao de gravação, em diferentes sentidos, gerou maiores mudanças espectrais, observando-se deslocamentos de 30 nm. Quando a curvatura foi realizada em um plano perpendicular ao de gravação, em diferentes sentidos, não foram registradas diferenças significativas no espectro (VAN WIGGEREN, GAYLORD, DAVIS *et al*, 2000).

Rao e seus colaboradores propuseram outro sensor para curvaturas e cargas transversais. O sensor era uma LPG gravada com laser de CO₂ operando com taxa de repetição de 5000 pps. O feixe era focalizado com uma lente de distância focal de 100 mm, gerando uma mancha luminosa com 50 µm de diâmetro. Cada ponto recebia uma densidade de energia de 7,4 J/mm², mas essa energia não provocava deformações ou danos, de acordo com observações que foram feitas em microscópio. Segundo os pesquisadores, o efeito do choque térmico do laser provocava grandes densificações e tensões mecânicas residuais que modulavam o índice de refração. Isto significa que o efeito do choque térmico é o dominante para a formação das redes com laser de CO₂. Nesse trabalho foi demonstrada a aplicação das LPGs como equalizadores de ganho de um amplificador óptico. Como a amplitude das redes era proporcional às curvaturas aplicadas, os desvios em comprimento de onda provocados pelas curvaturas podiam ser compensados termicamente, já que a sensibilidade térmica da rede (-0,3 nm/°C) era linear e elevada, para obter um perfil de ganho. A amplitude das LPGs modificava-se somente em cerca de 0,1 dB, no intervalo de -40 a 120°C, provando que a amplitude era praticamente insensível às variações de temperatura. No mesmo trabalho mostrou-se a aplicação das LPGs como elementos sensores de carga transversal e temperatura. Demonstrou-se que a sensibilidade às cargas transversais dependia altamente da orientação da carga, ou seja, os deslocamentos em comprimento de onda eram diferentes para diferentes direções de aplicação de uma mesma carga. Nas orientações segundo as quais as redes eram insensíveis às cargas, por não apresentarem deslocamentos em comprimento de onda, havia alterações da amplitude das redes e essas alterações de amplitude eram diretamente proporcionais às cargas aplicadas. O fenômeno no qual o vale principal da LPG divide-se em dois vales na medida em que a rede recebe a ação de cargas transversais, como se observou com LPGs gravadas com UV (LIU, ZHANG e BENNION, 1999), não foi visto pelo grupo de Rao aplicando-se cargas

até o valor limite de $200 \text{ g}\cdot\text{mm}^{-1}$. Isso indicou que o efeito da birrefringência daquelas redes não é significativo enquanto a carga for aplicada segundo a orientação na qual a LPG é insensível às cargas (RAO, ZHU, RAN *et al*, 2004).

Uma LPG insensível à curvatura foi proposta pela primeira vez por Wang e seu grupo. A rede foi gravada com laser de CO_2 medindo-se um deslocamento espectral de apenas $-0,018 \text{ nm}$ para uma curvatura de $1,1 \text{ m}^{-1}$. A posição rotacional da rede era selecionada para obter-se uma sensibilidade quase nula ($-0,016 \text{ nm/m}^{-1}$). Houve duas orientações simétricas da fibra para as quais a rede foi insensível às curvaturas, que são os dois lados da fibra perpendiculares à direção da luz incidente na gravação. Os resultados demonstraram que uma LPG insensível às curvaturas poderia ser utilizada para solucionar problemas de sensibilidade cruzada entre curvaturas e outros parâmetros tais como temperatura, deformações longitudinais ou índice de refração. Outras orientações simétricas da fibra, que mostraram sensibilidade de -7 nm/m^{-1} , foram as correspondentes à direção de incidência do laser na gravação (WANG, RAO, RAN *et al*, 2004).

A gravação de uma LPG com laser de CO_2 em uma fibra ótica insensível à curvatura foi relatada em 2005. Comentou-se que a amplitude do vale de atenuação de uma LPG escrita em uma fibra insensível à curvatura tem uma sensibilidade a esse parâmetro muito maior do que a de redes escritas em fibras modelo padrão de telecomunicações. Mas o comprimento de onda de ressonância dessa rede é muito menos sensível à curvatura em algumas direções. Baseados nessa descoberta, um novo equalizador de ganho foi proposto para planificar o ganho de um amplificador controlando diretamente a curvatura da LPG sem alterar significativamente a posição espectral. A sensibilidade da amplitude, bem como dos deslocamentos em comprimento de onda para a curvatura foram respectivamente iguais a $0,0173 \text{ dB/mm}^{-1}$ e $0,50 \text{ pm/mm}^{-1}$, segundo a orientação circular de maior sensibilidade (RAO, HU e NIU, 2005).

Para medidas de curvaturas e direções de curvaturas, em uma faixa de 0 a 360° , foi proposto um sensor constituído por três LPGs gravadas em série em uma fibra. Uma LPG era gravada com radiação UV e duas com um laser de CO_2 . Os espectros de transmissão das três redes eram distanciados entre si para que pudessem ser monitorados. A sensibilidade à curvatura das redes gravadas com o laser de CO_2 , que depende da direção da curvatura, apresentou duas orientações insensíveis à curvatura e duas orientações que demonstraram máxima sensibilidade a esse parâmetro. Já a rede gravada com radiação UV apresentou deslocamentos espectrais lineares de acordo com as curvaturas impostas, com sensibilidade de $5,2 \text{ nm/m}^{-1}$, porém mostrou-se insensível às alterações na direção das curvaturas. As redes gravadas com laser de CO_2 apresentavam uma diferença de 45° entre as direções de máxima sensibilidade à curvatura de uma e de outra, sendo

que a sensibilidade à curvatura de ambas apresentou-se como uma função senoidal, já que variava periodicamente conforme as orientações da fibra variavam de 0 a 360°. O sensor funcionava da seguinte forma: (i) primeiramente detectava-se o deslocamento espectral da rede gravada com UV e era determinado o valor da curvatura (já que essa tinha sensibilidade linear à curvatura), (ii) depois com o valor da curvatura e os deslocamentos espectrais das duas redes gravadas com o laser de CO₂ eram determinados os valores da sensibilidade à curvatura dessas duas redes (pois eram grandezas que variavam senoidalmente), (iii) por fim identificava-se a direção da curvatura através dos dois gráficos que exibiam a variação senoidal da sensibilidade de cada uma dessas redes. Desta forma foi possível monitorar curvaturas e suas direções em tempo real (WANG e RAO, 2005).

Um sensor de direções de curvatura baseado na modificação assimétrica da modulação do índice de refração da casca de uma fibra foi fabricado em dois estágios por Allsop e seus colaboradores. Primeiramente uma LPG, com período de 400 μm e comprimento de 5 cm, foi gravada ponto-a-ponto com um laser de argônio em uma fibra hidrogenada, com um núcleo concêntrico de raio 3,5 μm e casca de raio de 62,5 μm. Depois a casca foi modificada com um laser femtosegundo. Foram escritos três guias de onda (modificações de $1,5 \cdot 10^{-3}$ no índice da casca) no mesmo plano e paralelos ao núcleo. Dois guias foram escritos a 2 μm do núcleo, um de cada lado do núcleo, e outro a 20 μm do núcleo. O diâmetro de cada guia foi de 5 μm. Depois a LPG foi introduzida dentro de um tubo de borracha flexível com 4 mm de diâmetro. Curvaturas, denominadas de côncava e convexa, eram impostas ao tubo de borracha e ao mesmo tempo à rede. Foi denominada de curva convexa aquela na qual o guia de onda escrito a 20 μm do núcleo ficava na parte externa da curvatura e côncava quando esse guia de onda ficava na parte interna. Observaram-se duas bandas no espectro. A primeira já aparecia com a rede esticada e perdia amplitude na medida em que a rede era curvada. Para esta primeira banda as sensibilidades encontradas para a curva côncava e convexa foram, respectivamente, de $+5,6 \pm 0,1 \text{ nm/m}^{-1}$ e $+4,6 \pm 0,2 \text{ nm/m}^{-1}$. Já a segunda banda, não detectada com a rede esticada, ganhava gradativamente amplitude com os acréscimos de curvatura. Para esta segunda banda as sensibilidades encontradas para a curva côncava e convexa foram, respectivamente, de $-1,6 \pm 0,1 \text{ nm/m}^{-1}$ e $+3,8 \pm 0,5 \text{ nm/m}^{-1}$. Esse comportamento foi explicado pela introdução de uma assimetria na LPG. Uma vantagem apresentada para esse sensor foi a facilidade de integrá-lo ao sistema ótico, já que a fibra nele empregada foi padrão monomodo (ALLSOP, DUBOV, MARTINEZ *et al*, 2005).

Zhao e seus colaboradores gravaram LPGs em fibras D (*D*-“*shaped optical fibre*”), que apresentam a secção transversal na forma de uma letra D. O núcleo dessa fibra é elíptico e a face plana da casca é paralela ao eixo maior do núcleo elíptico bem como ao plano de polarização da

luz. Uma LPG foi gravada ponto-a-ponto nessa fibra hidrogenada, com um laser UV, operando em 244 nm. O período da rede foi de 381 μm . No espectro de transmissão dessa rede foram observadas duas séries de vales, devidos à birrefringência da fibra, correspondentes à orientação da luz linearmente polarizada segundo os eixos rápido e lento da fibra que são ortogonais entre si. Através do ajuste do controlador de polarização, uma das séries de vales podia ser eliminada enquanto outra era mantida. Por exemplo, um vale de atenuação de 8,48 dB situado em 1629,66 nm era eliminado quando o controlador de polarização era girado, e permanecia, para esse referido modo, um vale de atenuação de 8,34 dB situado em 1645,432 nm. Se o controlador de polarização era girado de 90°, era eliminado o vale situado em 1645,432 nm e o vale situado em 1629,66 nm voltava a ser visto. A LPG foi submetida a ensaios de curvaturas, que variaram de 0 a 8 m^{-1} , em seis diferentes direções, que variaram de 0° a 270°, e a sua sensibilidade demonstrou-se altamente dependente da direção da curvatura, havendo também uma orientação insensível a esse parâmetro. A resposta a curvatura do vale situado em 1629,66 nm bem como do situado em 1645,432 nm foi linear em todas as orientações. Para um vale localizado em 1545,43 nm a sensibilidade foi máxima, havendo deslocamentos de -20,02 nm e +22,78 nm, para uma curvatura aplicada de 8 m^{-1} , dependendo do sentido no qual a curvatura era imposta, resultando em sensibilidades de -2,5 e +2,85 nm/m^{-1} . Nas orientações menos sensíveis o máximo deslocamento detectado foi menor do que 1 nm e essa medida estava no limite da resolução do analisador de espectros óticos utilizado. De acordo com Zhao, a forte dependência rotacional da resposta à curvatura era devida à localização assimétrica do núcleo, relativamente ao centro geométrico da secção transversal da casca. Então quando a fibra era curvada em orientações de 225° e 270° o núcleo era submetido a uma expansão de modo que os vales da LPG moviam-se para longos comprimentos de onda. Alternativamente, em orientações de 90° e 120° o núcleo era submetido a uma compressão, de modo que os vales moviam-se no sentido de menores comprimentos de onda. Como a fibra D é mantenedora do estado de polarização, foi investigado se a curvatura induzia mudanças na sua birrefringência. Para a LPG gravada nessa fibra, a separação entre sucessivos vales ortogonalmente polarizados forneceria a medida da birrefringência induzida por curvatura. Mas como a separação foi de ± 1 nm, sendo medida para curvaturas em todas as seis orientações, concluiu-se que a alteração da birrefringência devida às curvaturas é insignificante. Esse resultado já era esperado uma vez que a origem da birrefringência dessa fibra é devida principalmente à forma geométrica do núcleo que não é alterada sob a ação de curvaturas (ZHAO, CHEN, ZHOU *et al*, 2004).

Allsop também gravou LPGs ponto-a-ponto em fibras óticas hidrogenadas com a secção transversal em forma de D (*D-“shaped optical fibre”*), com laser de argônio operando em 244 nm.

Após a inscrição as redes foram recozidas por 24 horas a uma temperatura de 80°C para remover o hidrogênio molecular remanescente. Segundo Allsop e seu grupo, quando uma LPG é fabricada em uma fibra assimétrica ela torna-se dependente do estado de polarização da luz, ou seja, é gerado um problema adicional de birrefringência. Por outro lado, a dependência com o estado de polarização pode tornar a LPG um filtro de polarização. O uso de um polarizador e de um controlador de polarização revelou um deslocamento espectral de 15 nm de determinadas bandas de atenuação associado a dois estados de polarização ortogonais. Mas foi detectada uma banda de atenuação insensível à mudança do estado de polarização, a qual pode ser utilizada nos ensaios de curvatura para reduzir erros, pertinentes a dependências do estado de polarização, que normalmente ocorrem em redes escritas em fibras óticas assimétricas. A sensibilidade à curvatura dependeu da orientação das fibras. Os maiores valores foram de $-3,56$ e $+6,51$ nm/m⁻¹ indicando que as redes eram úteis para monitorar a direção de curvaturas com erros reduzidos associados à dependência ao estado de polarização. Bandas espectrais vizinhas foram monitoradas a fim de discriminar os efeitos das curvaturas dos efeitos da variação de temperatura (ALLSOP, DOBB, MEZENTSEV *et al*, 2006).

Em 2006 Allsop utilizou um laser de femtosegundo para modificar a casca de fibras contendo LPGs já gravadas ponto-a-ponto com laser de argônio, complementando o trabalho desse grupo que já havia sido publicado em 2005 (ALLSOP, DUBOV, MARTINEZ *et al*, 2005). O dispositivo produzido em fibras monomodo, com período de 400 μm, foi capaz de identificar a magnitude e a direção de curvaturas. As sensibilidades medidas foram de $-1,62$ nm/m⁻¹ e de $+3,82$ nm/m⁻¹, dependendo do sentido no qual a curvatura era imposta. Dispositivos também foram produzidos com períodos de 400 μm e 250 μm utilizando fibras com núcleo elíptico a fim de investigar os efeitos da modificação da casca sobre dois estados de polarização. Uma modificação da casca aplicada sobre o eixo rápido da fibra, identificado com o auxílio de um polarímetro, afetava a luz que se propagava segundo a direção do eixo rápido muito mais significativamente do que a luz que se propagava segundo a direção do eixo lento. Tal comportamento capacitou o sensor a detectar a direção de uma curva em duas dimensões. Foi investigada também a dependência com o estado de polarização da luz das LPGs gravadas em fibras monomodo com a casca modificada pelo laser de femtosegundo. Essas redes foram iluminadas com luz polarizada e não polarizada e a máxima dependência com o estado de polarização mostrou uma diferença espectral de apenas 0,6 nm. Essa diferença foi pequena comparada à dependência com o estado de polarização de redes gravadas em fibras com núcleo elíptico ou fibras D, nas quais as mudanças são de aproximadamente 15 nm (ALLSOP, DUBOV, MARTINEZ *et al*, 2006).

Falate e seus colaboradores apresentaram as mudanças que ocorrem na sensibilidade à curvatura quando uma LPG gravada com arco elétrico tem diferentes deslocamentos de fase. Uma rede de período longo com fase deslocada (PS-LPG – “*Phase-Shifted Long Period Grating*”) é obtida quando duas LPGs com o mesmo período são gravadas em série e separadas por uma determinada distância d que é menor do que o período da rede. O espectro de transmissão de uma PS-LPG apresenta duas bandas de atenuação e entre essas há um pico (banda passante). O grupo indicou três efeitos típicos que ocorrem quando curvaturas são aplicadas a uma rede: (i) deslocamentos em comprimento de onda, devidos à modificações do índice de refração efetivo dos modos de casca ou aumentos do período da rede pela indução de deformações longitudinais, (ii) reduções da amplitude da rede devidas a alterações da constante de acoplamento em redes não re-acopladas ou fracas, ou seja, redes que não tiveram o re-acoplamento do modo de casca para o modo de núcleo, e (iii) a formação de novas bandas no espectro de transmissão devido a quebras na simetria dos modos de casca ou por birrefringência induzida pela curvatura. Quando curvaturas foram aplicadas a uma PS-LPG a posição espectral de uma das bandas manteve-se constante, mas sua amplitude aumentou, enquanto que a outra banda deslocou-se para menores comprimentos de onda, mas manteve sua amplitude praticamente constante. Outra PS-LPG apresentou redução da amplitude das duas bandas, com aumentos de curvatura, sendo que uma banda deslocou-se no sentido de menores comprimentos de onda e a outra no sentido de maiores. Quando curvaturas eram aplicadas àquelas redes a evolução espectral seguia o caminho inverso das evoluções observadas durante a fabricação das mesmas. Isso mostrou que a seleção de um deslocamento de fase apropriado possibilita o controle da sensibilidade à curvatura de uma PS-LPG. No mesmo trabalho foi realizado um ensaio submetendo uma PS-LPG a temperaturas que variaram de 24 a 200°C. Durante o aquecimento foi registrado um deslocamento de 14 nm para as bandas espectrais, no sentido de maiores comprimentos de onda, e mudanças na amplitude de 0,22 dB, 0,18 dB e 0,19 dB para a primeira, segunda banda e pico do espectro, respectivamente. As investigações de todo aquele trabalho indicaram que o controle da sensibilidade à curvatura poderia ser aplicado para medidas simultâneas de curvatura e temperatura (FALATE, FRAZÃO, REGO *et al*, 2007).

Com um laser de femtosegundo LPGs com período de 400 μm foram gravadas em fibras de cristal fotônico por Allsop e seus colaboradores. Tais redes exibem baixa sensibilidade térmica e isso ameniza o problema da sensibilidade cruzada, quando há mais do que um parâmetro não constante envolvido em uma medição. Foram gravadas redes com e sem simetria nas modulações periódicas do índice de refração (simétricas e assimétricas). Quando as redes assimétricas eram submetidas a ensaios de curvatura, demonstravam-se espectralmente sensíveis à orientação das

curvaturas e dependentes do estado de polarização da luz por elas transmitida. Através de um controlador do estado de polarização era feito o ajuste da polarização da luz transmitida nas redes a fim de maximizar-se a eficiência do acoplamento de cada uma das bandas de atenuação presentes em cada espectro. Através do ajuste apropriado do estado de polarização, tanto a LPG simétrica quanto a assimétrica apresentaram alterações em duas bandas de ressonância, sendo uma centrada aproximadamente em 1350 nm e outra em 1590 nm. A rede assimétrica apresentou um aumento visualmente significativo da atenuação da banda centrada em 1350 nm. Além disso, os deslocamentos espectrais das bandas da rede assimétrica foram maiores do que os da rede simétrica de acordo a alteração do estado de polarização da luz. Na rede assimétrica os deslocamentos foram de 4,1 nm e 6,4 nm para as bandas centradas em 1350 nm e 1590 nm, respectivamente. Já na rede simétrica esses deslocamentos foram de 0,5 nm e 1,4 nm (ALLSOP, KALLI, ZHOU *et al*, 2008).

Um estudo das propriedades térmicas de LPGs fabricadas com variados períodos em fibras dopadas com B-Ge foi feito por Shu e sua equipe. As redes foram gravadas com máscaras de amplitude e um laser YAG. Demonstrou-se que aquelas fibras apresentavam elevada fotossensibilidade. A resposta térmica de sete redes foi analisada aquecendo-as de 0°C a 60°C em degraus de 10°C. Constatou-se que o espectro de todas as redes apresentou um único vale de ressonância no intervalo de comprimentos de onda de 1400 nm a 1600 nm. Mas a ordem do modo de casca de cada rede era diferente. As redes com os maiores períodos, cujos modos de casca apresentaram-se com ordem menos elevada, tiveram sensibilidade térmica negativa. Já as redes com os menores períodos e modos de casca de ordem mais elevada apresentaram sensibilidade térmica positiva. Isso evidenciou que a resposta térmica de uma LPG depende da ordem do modo de casca que é analisado. A máxima sensibilidade térmica média (-1,75 nm/°C) foi obtida para o 10º modo de casca da rede gravada com período de 240 µm. Esse valor foi 24 vezes maior do que a mínima sensibilidade (0,075 nm/°C), que foi calculada para o 30º modo de casca de uma rede com período de 34 µm. Mas a rede mais sensível à temperatura não apresentou uma resposta térmica linear. Para mudanças de temperatura de 0°C a 10°C o deslocamento espectral total foi de -27,5 nm, resultando em uma supersensibilidade de -2,75 nm/°C. Esse valor foi significativamente maior do que a sensibilidade média da rede (-1,75 nm/°C) (SHU, ALLSOP, GWANDU *et al*, 2001).

Rego e seus colaboradores submeteram redes gravadas com arco elétrico a elevadas temperaturas, de até 1190°C. Foram feitas gravações em fibras dopadas com germânio bem como dopadas com enxofre e dopadas com nitrogênio. Obtiveram-se atenuações entre 20 e 30 dB com baixas perdas por inserção, de cerca de 0,1 dB. Foi relatado que o principal mecanismo para a formação das redes era o rápido aquecimento e resfriamento local devido às descargas do arco

elétrico ponto-a-ponto, criando pontos de tensões periódicas. Tais redes operavam bem em elevadas temperaturas (de até 800°C quando gravadas em fibras dopadas com germânio e até 700°C quando dopadas com enxofre) sem nenhuma degradação espectral irreversível. Contudo um processo de recozimento em temperaturas que variavam de 700 a 800°C era necessário para a estabilização das redes. A fibra que continha 12% de GeO₂ conseguiu suportar por 30 minutos a temperatura de 1190°C sem apresentar degradações. Tais resultados abriram a possibilidade de trabalhar em elevadas temperaturas sem a requisição de fibras especiais. Após os processos de aquecimento e resfriamento as redes apresentavam deslocamentos espectrais cujos valores (que chegavam a até 20 nm) variavam de acordo com a ordem do modo de casca considerado. Tais deslocamentos, que eram irreversíveis, eram devidos a tensões relacionadas com deformações plásticas da fibra (REGO, OKHOTNIKOV, DIANOV *et al*, 2001).

Humbert e Malki também realizaram caracterizações de LPGs gravadas em fibra padrão monomodo com arco elétrico em temperaturas que variaram de 30° a 1200°C. Inicialmente as redes fabricadas foram aquecidas de 30°C a 160°C com acréscimos de 1°C/min. A sensibilidade térmica dos vales de atenuação correspondentes a três modos de casca, de uma rede gravada com período de 610 µm, foram determinados no intervalo de 30°C a 160°C, encontrando-se os valores de 58 pm/°C, 59 pm/°C e 70 pm/°C. A fim de investigar a estabilidade térmica das redes, uma delas foi submetida a três ciclos de recozimento em temperaturas de 200°C, 400°C e 600°C, de uma hora de duração cada, não sendo observada nenhuma degradação da rede. Outra rede gravada com o período de 590 µm foi aquecida de 30°C a 1200°C com acréscimos de 5°C/min. Nessa rede foi acompanhada a evolução de três vales de atenuação, correspondentes a três modos de casca, de acordo com os acréscimos de temperatura. Os deslocamentos no sentido de maiores comprimentos de onda foram maiores para o vale de atenuação de ordem mais elevada. Foi identificada uma zona plana, entre 800° e cerca de 900°C, que delimitou duas regiões com sensibilidades distintas. Para temperaturas inferiores a 800°C, encontraram-se sensibilidades que variaram de 78 a 110 pm/°C e entre 880 e 1100°C a sensibilidade estimada foi de 350 pm/°C. O aumento da sensibilidade foi explicado pela expansão da fibra, na qual há alongação do período da rede. A partir dos 1100°C os deslocamentos espectrais registrados foram relacionados a rearranjos que ocorrem na fibra na proximidade do ponto de fusão da sílica. No mesmo trabalho Humbert e Malki, com o intuito de investigar a zona plana que é gerada em torno de 800°C, promoveram o recozimento de uma LPG, inicialmente a 750°C durante 6 horas, e depois a deixaram resfriar lentamente a fim de minimizar a criação de tensões internas. No dia seguinte eles submeteram a mesma rede ao mesmo processo de recozimento. Os vales de transmissão apresentaram deslocamentos de -4 nm e de +6 nm, depois do

primeiro e segundo ciclos de recozimento. Esses deslocamentos mostraram que um rearranjo irreversível ocorre durante os recozimentos. Na temperatura estipulada para o processo, de 750°C, as tensões internas residuais geradas durante o processo de gravação começam a relaxar. Para examinar os efeitos da relaxação das tensões internas, foi analisada a evolução temporal dos deslocamentos espectrais de algumas redes durante os primeiros e os segundos processos de recozimento. Os dois ciclos de recozimento também foram feitos com outras redes a 700°C, 760°C e 800°C, durando 9 horas cada um. Durante o primeiro ciclo de recozimento foram observados inicialmente deslocamentos para menores comprimentos de onda. Depois de ser atingido um valor mínimo, os vales de atenuação passavam a deslocar-se no sentido de maiores comprimentos de onda. O deslocamento inicial, para menores comprimentos de onda, diminui na medida em que a temperatura do recozimento aumenta. A explicação para esse comportamento foi respaldada no fato de que as fibras monomodo (“*Corning SMF-28*”) apresentam tensões axiais na casca e compressões no núcleo. Desta maneira, os primeiros deslocamentos são explicados pelo aumento do índice de refração da casca, devido a sua contração, e pela redução do índice de refração do núcleo. Durante o segundo ciclo de recozimento, os pequenos deslocamentos para menores comprimentos de onda, são devidos a tensões internas mecânicas remanescentes. Uma vez atingido o mínimo deslocamento para menores comprimentos de onda, é estabelecido um equilíbrio entre as tensões mecânicas e as térmicas, quando os deslocamentos espectrais passam a ocorrer no sentido de maiores comprimentos de onda. Segundo Humbert e Malki, as tensões térmicas são causadas pela diferença entre a viscosidade do núcleo e da casca em altas temperaturas. O coeficiente de expansão térmica do núcleo é maior do que o da casca e isso gera tensão radial compressiva sobre o núcleo. Quanto mais baixa é a temperatura do recozimento maior é a viscosidade da fibra e mais tempo as tensões térmicas demoram para equilibrar a relaxação das tensões mecânicas. Nenhuma degradação das redes foi observada após os processos de recozimento. Com isso foi comprovado que a relaxação de tensões internas não é o principal mecanismo envolvido na formação das LPGs gravadas com arco elétrico. Humbert e Malki acentuaram que o mecanismo de escrita de tais redes é devido à modificações estruturais, ou seja, densificações. Observou-se ainda que os deslocamentos em comprimento de onda dependeram das temperaturas do recozimento bem como da ordem dos modos de casca que foram monitorados (HUMBERT e MALKI, 2002).

Outra investigação a respeito da resposta térmica de LPGs foi realizada por Khaliq e seus colaboradores em 2002. Demonstrou-se que as bandas centrais de atenuação de uma LPG poderiam assumir uma sensibilidade positiva, negativa ou nula, dependendo do período da rede e da geometria e composição da fibra ótica. A idéia desse trabalho foi construir um sensor no qual a

LPG estaria mergulhada em um óleo (com índice igual a 1,462), de elevado coeficiente termo-ótico, para aumentar a sua sensibilidade térmica (KHALIQ, JAMES e TATAM, 2002).

Em 2003 houve a publicação de estudos da resposta de LPGs submetidas à temperaturas criogênicas (JAMES, TATAM, TWIN et al, 2003). Tais redes foram gravadas com laser Nd:YAG operando a 266 nm com o uso de uma máscara de amplitude com período de 400 μ m. A resposta térmica foi monitorada no intervalo de 4,2 a 280 K. Observou-se uma resposta linear entre 77 e 280 K, sendo encontrada uma sensibilidade de 0,2 nm/K.

Para a fabricação de LPGs com elevada sensibilidade térmica sugeriu-se o uso de fibras de diferentes composições e geometrias (YIN, CHUNG e ZHU, 2001 in JAMES, TATAM, TWIN et al, 2003) e o uso de coberturas com polímeros (JANG, KIM, KIM et al, 1999 in JAMES, TATAM, TWIN et al, 2003).

Um estudo da caracterização térmica de LPGs foi feita por O'Flaherty e seus colaboradores em 2004. Os resultados obtidos demonstraram que LPGs com período menor (410 μ m) são menos sensíveis do que aquelas com período maior (700 μ m) em idênticas variações de temperatura. A rede com período de 410 μ m apresentou sensibilidade de 0,0595 nm/ $^{\circ}$ C e outra com período de 700 μ m apresentou sensibilidade de -0,2429 nm/ $^{\circ}$ C. O grupo concluiu que a direção do gradiente de temperatura, comparando-se redes com idênticas propriedades físicas e óticas, depende do período da rede (FLAHERTY, GHASSEMLOOY, MANGAT *et al*, 2004).

Gao e Fang determinaram as características do espectro de transmissão de LPGs em cascata, e demonstraram que o valor absoluto do fator de dispersão do guia de onda (γ) poderia ser obtido. Ao mesmo tempo demonstraram que o coeficiente termo-ótico relativo à diferença do índice de refração efetivo entre os modos de núcleo e de casca (μ) poderia ser obtido através da sensibilidade térmica (GAO e FANG, 2004).

Em 2005, Wang e seus colaboradores demonstraram teórica e experimentalmente que a posição espectral, do vale central de ressonância de uma LPG, pode ser alterada de uma grande magnitude cobrindo a rede com um fino filme de espessura de alguns nanômetros. O índice de refração desse filme deveria ser maior do que o da casca da fibra. As alterações na posição do vale central seriam resultantes da variação da espessura do filme e/ou da variação do índice de refração do mesmo. Afirmou-se que a sensibilidade da LPG depende da ordem do modo de casca e da escolha da espessura e índice de refração do filme (WANG, HEFLIN, STOLEN *et al*, 2005).

Kamikawachi e seus colaboradores estudaram a influência do índice de refração externo na sensibilidade à temperatura e tensões longitudinais de LPGs gravadas com a técnica do arco elétrico. Imergindo a LPG em meios com índices variando de 1 a 1,447, foi determinada a

sensibilidade às tensões longitudinais e os coeficientes termo-óptico de acoplamento e elasto-óptico (que dependeram de cada meio). Observou-se um comportamento não linear da sensibilidade térmica em meios com índices maiores do que 1,430. O comportamento não linear foi resultante de dois efeitos: (i) a região de alta sensibilidade ao índice de refração, na qual se encontram os fluidos com índice maior do que 1,430, que faz com que mudanças no índice atribuídas ao efeito termo-óptico aumentem a sensibilidade térmica e, (ii) a redução no índice de refração, provocada por aumentos de temperatura, que faz diminuir a sensibilidade ao índice. Esses efeitos deram-se a uma pequena contribuição das mudanças no índice externo (com o aumento da temperatura) para a sensibilidade térmica (KAMIKAWACHI, POSSETI, FALATE *et al*, 2007).

Como uma LPG apresenta problemas de sensibilidade cruzada, sempre foi necessário empregar métodos de análise de dados que identificassem as medidas corretas dos parâmetros envolvidos. Para a análise e interpretação dos resultados fornecidos por transdutores que utilizavam fibras de alta birrefringência, que apresentaram problemas de sensibilidade cruzada, relativa à alteração de mais de um parâmetro físico-químico, foram empregados métodos tais como o da matriz inversa (JIN, MICHIE, THURSBY *et al*, 1997). Mas o método da matriz inversa mostrou-se eficaz apenas quando os parâmetros registrados na medição eram funções lineares das variações das grandezas mensuradas. Em 1998, Chan e seus colaboradores realizaram medidas simultâneas de variações de temperatura e deformações relativas e depois compararam dois métodos de análise dos dados. Um dos métodos analisados foi o da matriz inversa e o outro foi o de redes neurais artificiais (RNA) (CHAN, JIN, RAD *et al*, 1998). Para os transdutores que apresentavam pequena sensibilidade cruzada, a acurácia das medidas com o emprego dos modelos matemáticos das RNA (PATTERSON, 1996), foi similar a do método que utilizou a matriz inversa. Os erros médios quadráticos obtidos com as redes neurais artificiais (RNA) e com o método da matriz inversa foram iguais a 0,4°C e 0,9°C, para as medidas de temperatura, e 4,9 $\mu\epsilon$ e 1,1 $\mu\epsilon$, para as medidas de deformações relativas, respectivamente. Contudo, quando o problema da sensibilidade cruzada foi acentuado ou a resposta do sensor não foi uma função linear das grandezas a serem determinadas, a acurácia do método que empregou as RNA foi maior, apresentando erros médios quadráticos de 2°C e de 10 $\mu\epsilon$ nas medidas de temperatura e deformações longitudinais, respectivamente.

Sun e seu grupo propuseram a aplicação de redes neurais artificiais (RNA), em monitoramentos simultâneos de curvaturas e variações de temperatura em um sistema que empregava duas LPGs, com períodos de 450 μm . Uma LPG foi gravada em uma fibra ótica hidrogenada e outra em uma fibra dopada com boro e germânio. A rede gravada em fibra hidrogenada foi estabilizada após recozimento de 5 horas em temperatura de 85°C. O emprego da

RNA possibilitou medições simultâneas de temperaturas e curvaturas. O erro médio quadrático encontrado foi de $0,0072 \text{ m}^{-1}$ nas medidas de curvatura e de $0,1898 \text{ }^\circ\text{C}$ nas medidas de temperatura. Esse resultado demonstrou o potencial das RNA como método de análise de dados referentes a variações espectrais de LPGs, que apresentam problemas de sensibilidade cruzada bem como respostas não lineares a determinados parâmetros (SUN, CHAN, TAN *et al*, 2007).

Ainda em 2007, Sun e seus colaboradores aplicaram uma RNA nos resultados experimentais de medidas simultâneas de temperatura e tensões longitudinais usando uma LPG gravada em uma fibra de cristal fotônico. O erro que o grupo detectou foi de $0,04 \text{ }^\circ\text{C}$, em medidas de temperatura que variaram de 35°C a 120°C , e de $2,7 \text{ }\mu\text{e}$ em medidas de deformações relativas que variaram de 0 a $3000 \text{ }\mu\text{e}$ (SUN, CHAN, DONG *et al*, 2007).

Em 2008, Possetti e seus colaboradores através dos valores da densidade e do índice de refração de combustíveis, bem como dos resultados da análise dos espectros de uma LPG, quando mergulhada naqueles mesmos combustíveis, empregaram RNA para realizar a análise da conformidade dos mesmos. Foram utilizadas 45 amostras de gasolina coletadas em vários postos de distribuição de combustíveis e previamente analisadas de acordo com as regras da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (brasileira), para construir e validar duas RNA. As variáveis de entrada da primeira rede neural (RNA-1) foram os valores do índice de refração das amostras, medidas com um refratômetro Abbe, e da densidade das mesmas medidas com um densímetro digital. Para a segunda rede neural (RNA-2) as variáveis de entrada incluíram, além das densidades das amostras, a resposta em comprimento de onda de uma LPG, gravada ponto-a-ponto com arco elétrico, aos índices de cada amostra. Um conjunto de 35 amostras, randomicamente escolhidas, foi usado para construir e treinar as duas RNA. As 10 amostras restantes foram usadas para validar a arquitetura final das RNA. A probabilidade de execução de classificações corretas das amostras, em conformes e não conformes, foi de 70 % por meio da RNA-1 e de 80% por meio da RNA-2 (POSSETTI, CORADIN, CÔCCO *et al*, 2008a).

Ainda em 2008, Possetti e seus colaboradores realizaram um trabalho demonstrando o uso de LPGs no setor do petróleo para aplicações específicas. Tais sensores podiam identificar fluidos simulando fluxos de seis líquidos diferentes no interior de tubulações ou verificar a conformidade da gasolina comercializada em postos de distribuição. As respostas das redes em cada caso específico foram empregadas para treinar e validar duas distintas topologias de redes neurais artificiais (POSSETTI, CORADIN, CÔCCO *et al*, 2008b).

1.3 JUSTIFICATIVAS E OBJETIVOS

1.3.1 Justificativas

Embora as fibras óticas ainda encontrem maiores aplicações nas telecomunicações do que no sensoriamento (KROHN, 2006), o processo de busca de conhecimento na área de sensores é bastante acelerado. Estima-se que esses dispositivos atingirão um potencial de mercado que poderá exceder um bilhão de dólares até 2010 (KROHN, 2006). Já foi comentado anteriormente que a tecnologia dominante nos sensores desenvolvidos em fibras óticas é baseada na formação de redes. Apesar de muitos dispositivos, que fazem uso de redes de reflexão e de transmissão ainda encontrarem-se na fase de protótipo, a pesquisa continua sendo bem atrativa tendo-se em vista os inúmeros atributos que os sensores dessa espécie são capazes de oferecer.

Especialmente as redes de período longo tornam possíveis monitoramentos de grandezas físicas tais como temperatura, tensões longitudinais e pressão com elevada sensibilidade. Sem ser necessário o acesso ao campo eletromagnético evanescente da fibra, também é possível mensurar o índice de refração de fluidos com os quais a mesma entra em contato, uma vez que a potência ótica não está confinada somente no interior da fibra e próxima ao núcleo, como acontece com as redes de Bragg. Nas FBGs a sensibilidade ao índice de refração do meio externo só é alcançada reduzindo-se o diâmetro da casca da fibra até um valor no qual o campo eletromagnético evanescente passe a interagir com o meio externo. Além disso, as LPGs podem ser implementadas utilizando esquemas mais simples e mais econômicos do que os de gravação de redes de Bragg (BHATIA, 1996).

O processo de escrita de redes de período longo mais amplamente utilizado é o que faz uso de radiação UV (JAMES e TATAM, 2003). Tendo-se em vista a disponibilidade, no Laboratório de Laser da UTFPR, de uma fonte ótica laser YAG operando em 266 nm, decidiu-se implementar um novo sistema ótico de gravação para as redes de período longo. Optou-se pelo sistema de gravação ponto-a-ponto pelo fato desse dispensar o uso de máscaras de amplitude, que têm elevados preços, e por possibilitar maior flexibilidade na escolha do valor do período das redes. Vale salientar que os pesquisadores do laboratório já dominavam o processo de escrita com arco elétrico para as LPGs.

Dentre os predicados buscados para as novas redes gravadas através da técnica ponto-a-ponto, com radiação UV, estava a investigação da estabilidade desses dispositivos em altas temperaturas. Esta inquirição pareceu promissora porque durante a fotoinscrição a rede suporta toda

a concentração da densidade de energia do laser focalizada em um único ponto a cada distância correspondente ao período. Na técnica ponto-a-ponto somente um ponto é gravado a cada exposição da fibra, diferentemente das técnicas que empregam máscaras de amplitude nas quais a densidade de energia é distribuída ao longo da máscara. Esse diferencial fundamentou a realização de ensaios em temperaturas de até 1200°C com essas redes, bem como a investigação da estabilidade térmica das mesmas em elevadas temperaturas.

Outra questão foi a possibilidade da modulação do índice de refração, de uma LPG gravada ponto-a-ponto com radiação UV, apresentar assimetrias através da sua secção transversal, pois na gravação que utiliza máscaras de amplitude essa assimetria não existe (RAO, ZHU, RAN, *et al*, 2003). Essa hipótese motivou a investigação da sensibilidade dessas redes à curvaturas em diferentes direções, pois a dependência da resposta à curvatura, com as direções das curvaturas, pode gerar aplicabilidade para essa nova LPG na identificação de curvaturas em diferentes planos de uma determinada estrutura.

1.3.2 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é produzir redes de período longo, em fibras óticas, através da técnica ponto-a-ponto com o uso de uma fonte laser YAG operando em 266 nm, bem como investigar a aplicabilidade desses dispositivos no monitoramento de parâmetros físico-químicos.

Os objetivos específicos são:

- (i) Determinar os parâmetros de gravação bem como os tipos de fibras apropriados para a produção das redes de período longo.
- (ii) Investigar a sensibilidade dos dispositivos produzidos a determinadas grandezas tais como índice de refração do meio externo, variações de temperatura, deformações longitudinais e curvaturas em diferentes orientações.
- (iii) Estudar diferentes estratégias para alcançar a estabilização térmica, em elevadas temperaturas, das redes produzidas em fibras hidrogenadas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese é constituída de cinco capítulos.

No capítulo 1 são feitas algumas reflexões sobre a evolução do conhecimento que conduziu à descoberta das redes em fibras óticas. Na seção do estado da arte, é apresentada uma revisão bibliográfica de publicações a respeito das redes de reflexão e de transmissão, ou seja, FBGs e LPGs. Consta também uma seção com a apresentação das justificativas e dos objetivos do trabalho.

No capítulo 2 está a fundamentação teórica, na qual são abordados conceitos básicos para o entendimento das redes em fibras óticas. Explica-se o que é o efeito da fotossensibilidade e como ela pode ser intensificada. É dada uma descrição básica das redes dos tipos FBG e, especialmente, LPG com suas aplicações. São apresentados os principais processos de fabricação da LPG e, ainda, uma descrição teórica a respeito de redes neurais artificiais (RNA) que podem ser implementadas para interpretar as mudanças espectrais de uma LPG que apresente respostas não lineares, nem unívocas, a determinados parâmetros ou problemas devidos à sensibilidade cruzada.

No capítulo 3 são descritos os procedimentos experimentais, ou seja, materiais e métodos empregados para o alcance dos objetivos propostos.

No capítulo 4 estão expostos e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as diretrizes para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ASPECTOS MATERIAIS

Basicamente as fibras óticas são capilares formados por materiais dielétricos cristalinos e homogêneos. Tais materiais, de plástico ou vidro, devem ser suficientemente transparentes para guiar um feixe de luz (com comprimentos de onda na faixa do visível ou infravermelho). A estrutura mais simplificada de uma fibra ótica apresenta cilindros concêntricos, com determinadas dimensões, e índices de refração tais que permitam o fenômeno da reflexão interna total. O centro da fibra é denominado de núcleo e a região que o circunda é chamada de casca. Para proteger as fibras de impactos mecânicos muitas delas têm uma camada protetora conhecida como capa. O material constituinte da capa normalmente é um polímero. Para que ocorra a reflexão total do feixe guiado em uma fibra, em conformidade com a Lei de Snell-Descartes da ótica geométrica (HECHT, 1990), é necessário que o índice de refração do núcleo seja maior do que o índice de refração da casca.

Do ponto de vista da capacidade de transmissão, a tecnologia atual de fibras óticas caracteriza-se por três tipos distintos: (i) multimodo com índice degrau, (ii) multimodo com índice gradual e (iii) monomodo. As fibras multimodo conduzem muitos modos de propagação. As fibras monomodo conduzem um único modo de propagação. Os guias de onda, com um perfil de índice de refração degrau, têm um índice de refração constante ao longo da seção reta do seu núcleo. Já aquelas com perfil de índice gradual, apresentam o núcleo constituído por materiais especiais com valores de índices de refração que diminuem gradualmente a partir do eixo central da fibra até a interface núcleo-casca (AGRAWAL, 1997; OKAMOTO, 2006), conforme a ilustração da Figura 1.

As fibras multimodo, com índice degrau, apresentam o núcleo com dimensões que variam de 50 a 400 μm , conforme o tipo de aplicação. Mas são limitadas quanto à capacidade de transmissão. Possuem atenuação elevada (maior do que 5 dB/km) e pequena largura de banda. Por isso são utilizadas em transmissão de dados à curta distância e iluminação (SILVA JÚNIOR, 1990; GIOZZA, CONFORTI e WALDMAN, 1991).

As fibras multimodo com índice gradual, por apresentarem diferentes valores do índice de refração no núcleo, diminuem as diferenças de tempo de propagação da luz no núcleo, devido aos vários caminhos que a luz pode tomar no interior da fibra. Isso diminui a dispersão e aumenta a

largura de banda passante na fibra ótica. Essas fibras apresentam atenuação de 3 dB/km em 850 nm e alta capacidade de transmissão (SILVA JÚNIOR, 1990; GIOZZA, CONFORTI e WALDMAN, 1991).

Na fibra monomodo apenas o modo fundamental de distribuição eletromagnética (raio axial) é guiado. Com isso evitam-se os vários caminhos de propagação da luz diminuindo a sua dispersão. Para que isso ocorra é necessário que o diâmetro do núcleo seja poucas vezes maior do que o comprimento de onda da luz utilizada para a transmissão. As dimensões típicas são de 2 a 10 μm para o diâmetro do núcleo e 80 a 125 μm para o da casca. A atenuação é baixa (0,7 dB/km em 1300 nm e 0,2 dB/km em 1550 nm) e a largura de banda é grande, ou seja, a capacidade de transmissão é elevada. Nos sistemas de transmissão mais modernos chega-se à banda de transmissão da ordem de THZ (GIOZZA, CONFORTI e WALDMAN, 1991).

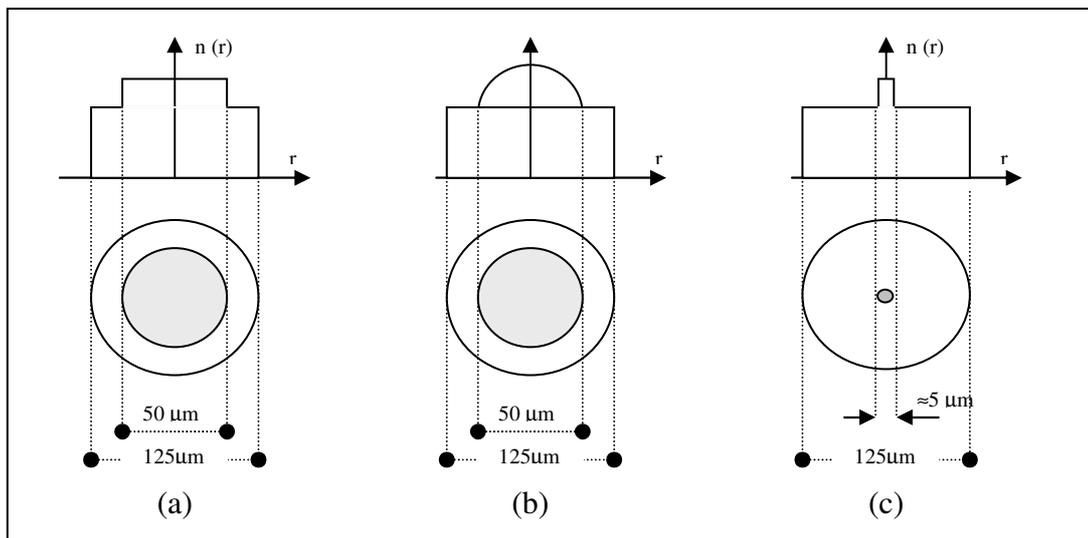


Figura 1: (a) Secção transversal de fibra multimodo, sem capa, e perfil de índice de refração degrau; (b) Secção transversal de fibra multimodo, sem capa, e perfil de índice de refração gradual; (c) Secção transversal de fibra monomodo, sem capa, e perfil de índice de refração degrau.

Para reduzir o ponto de fusão do vidro e facilitar o processo de fabricação das fibras alguns materiais tais como o fósforo, o boro e o germânio são utilizados juntamente com a sílica. Em fibras de sílica dopadas com germânio são utilizados também o flúor e o boro trivalente (B_2O_3) como dopantes. O índice de refração aumenta com a concentração de germânio e diminui com a concentração de boro e flúor (KASHYAP, 1999).

2.2 GUIAMENTO DE LUZ EM FIBRAS ÓTICAS

O comportamento da luz é descrito pelas equações de Maxwell. Resolvendo essas equações para as condições de contorno da fibra, que é um guia de onda, encontra-se certo número de soluções finitas. Assim sendo, a luz que percorre uma fibra ótica não se propaga aleatoriamente, mas é canalizada em certos modos. Um modo de propagação é, portanto, uma onda com determinada distribuição de campo eletromagnético que satisfaz as equações de Maxwell e que transporta uma parcela individual da energia luminosa total transmitida. Além disso, cada modo tem a propriedade de possuir uma distribuição espacial que não é alterada com a propagação (AGRAWAL, 1997). Dependendo do sentido no qual a luz é injetada na fibra, os modos podem ser chamados de propagantes ou contra-propagantes.

Considerando a fibra ótica como um meio isotrópico, dielétrico, sem carga prescrita ou distribuições de corrente e com condutividade nula, pode-se reescrever a Lei de Ampère generalizada, a forma diferencial da Lei de Faraday da indução eletromagnética, a Lei de Gauss proveniente da Lei de Coulomb e o divergente que expressa a inexistência de monopolos magnéticos, da seguinte forma no sistema gaussiano (REITZ, MILFORD e CHRISTY, 1982):

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = 0 \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

Essas quatro expressões são as equações de Maxwell, nas quais \vec{E} é o campo elétrico, \vec{H} é o campo magnético, \vec{D} é o vetor densidade de fluxo elétrico, \vec{B} o vetor densidade de fluxo magnético e c é a velocidade da luz no vácuo. Os vetores \vec{D} e \vec{B} , relacionados aos campos elétrico e magnético são dados por:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (6)$$

onde ε é a permissividade elétrica absoluta e μ é a permeabilidade magnética absoluta do meio. Substituindo as Equações 5 e 6 na Equação 1 tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\mu\varepsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

A Equação 2 pode ser re-escrita como:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

Aplicando o operador rotacional nos dois termos das Equações 7 e 8 tem-se:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} - \frac{\mu\varepsilon}{c} \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \vec{E})}{\partial t} = 0 \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{E} + \frac{\mu\varepsilon}{c} \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \vec{B})}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

No primeiro termo das Equações 9 e 10 aplica-se a identidade vetorial diferencial $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{F}) = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{F}) - \nabla^2 \vec{F}$ (SPIEGEL, 1973):

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \nabla^2 \vec{B} - \frac{\mu\varepsilon}{c} \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \vec{E})}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

$$\vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} + \frac{\mu\varepsilon}{c} \frac{\partial (\vec{\nabla} \times \vec{B})}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Substituindo na Equação 11 as Equações 2 e 4 e, na Equação 12, assumindo que na ausência de cargas livres $\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$ e fazendo a substituição do valor do rotacional do campo magnético dado na Equação 7, tem-se:

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{\mu\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \quad (13)$$

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (14)$$

As Equações 13 e 14 são as equações de onda para os campos elétrico e magnético. Como o produto $\mu\epsilon$ é igual ao quadrado do índice de refração do material e sendo essas duas equações idênticas, elas podem ser re-escritas como uma equação genérica que é representada por uma só variável chamada de ψ :

$$\nabla^2 \Psi - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = 0 \quad (15)$$

A Equação 15 é chamada de equação de onda. No caso das fibras óticas que apresentam simetria radial, essa equação deve ser expressa em coordenadas cilíndricas (ρ , ϕ e z), supondo a onda eletromagnética propagando-se ao longo do eixo z , Ψ_z representa a componente longitudinal (AGRAWAL, 1997):

$$\frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \Psi_z}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \cdot \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 \Psi_z = 0 \quad (16)$$

Na Equação 16, $k_0 = \omega / c = 2\pi / \lambda$ é definido como o número de onda no espaço livre, sendo λ o comprimento de onda e ω a frequência da radiação eletromagnética. Para uma fibra com índice de refração de núcleo com raio a o índice de refração n é:

$$n = \begin{cases} n_1 : \rho \leq a \\ n_2 : \rho > a \end{cases} \quad (17)$$

A Equação 16 é resolvida utilizando o método de separação de variáveis, assim tem-se:

$$\Psi_z(\rho, \phi, z) = F(\rho)\Phi(\phi)Z(z) \quad (18)$$

Através da substituição da Equação 18 na Equação 16 obtém-se as três seguintes equações diferenciais:

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + \beta^2 Z = 0 \quad (19)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\phi^2} + m^2 \Phi = 0 \quad (20)$$

$$\frac{d^2 F}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dF}{d\rho} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{m^2}{\rho^2} \right) F = 0 \quad (21)$$

A Equação 19 tem uma solução na forma $Z = \exp(i\beta z)$ na qual β é a constante de propagação. De forma similar a solução da Equação 20 é $\Phi = \exp(im\phi)$ na qual m é uma constante que assume valores inteiros, já que o campo eletromagnético oscilante tem um período igual a 2π . A Equação 21 é uma equação diferencial que representa as funções de Bessel. A solução geral, para as regiões do núcleo e da casca da fibra, é dada por:

$$F(\rho) = \begin{cases} AJ_m(\kappa\rho) + A_1 Y_m(\kappa\rho) : \rho \leq a \\ CK_m(\gamma\rho) + C_1 I_m(\gamma\rho) : \rho > a \end{cases} \quad (22)$$

Na Equação 22, A , A_1 , C e C_1 são constantes e J_m , Y_m , K_m e I_m são diferentes funções de Bessel. Os parâmetros κ e γ são definidos por:

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad (23)$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (24)$$

Pela consideração de que o campo eletromagnético no guia de onda deve ser finito em $\rho = 0$ e decair a zero em $\rho = \infty$ é feita uma significativa simplificação. Assim, $F(0)$ pode permanecer finito somente se $A_1 = 0$ e $F(\rho)$ dissipar-se no infinito somente se $C_1 = 0$. Dessa forma chega-se a uma solução geral para a Equação 16 que tem seis componentes de campo para a região do núcleo e seis para a região da casca. Essas componentes são E_z , H_z , E_ρ , H_ρ , E_ϕ e H_ϕ e as quatro últimas componentes podem ser representadas em função das duas primeiras, tanto para a região do núcleo quanto da casca. Após consideráveis detalhes algébricos, nos quais se aplicam as condições de contorno apropriadas para a interface núcleo-casca, chega-se à seguinte equação de autovalores (AGRAWAL, 1997):

$$\left[\frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] \left[\frac{J'_m(\kappa a)}{\kappa J_m(\kappa a)} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{K'_m(\gamma a)}{\gamma K_m(\gamma a)} \right] = \left[\frac{2m\beta(n_1 - n_2)}{a\kappa^2\gamma^2} \right]^2 \quad (25)$$

J_m e K_m são respectivamente as funções de Bessel e de Hankel modificadas (GOWAR, 1984). Para um dado conjunto de parâmetros k_0 , a , n_1 e n_2 , a Equação 25 pode ser resolvida numericamente para determinar a constante de propagação β . Geralmente essa equação pode ter múltiplas soluções para cada valor inteiro de m . Assim costuma-se enumerar tais soluções em ordem numérica descendente e denotá-las por β_{mn} para um dado m ($n = 1, 2, \dots$). Cada valor de β_{mn} corresponde a um possível modo de propagação, cuja distribuição espacial de campo obedece as equações das componentes E_z , H_z , E_ρ , H_ρ , E_ϕ e H_ϕ do núcleo e da casca da fibra.

Em geral tanto E_z quanto H_z são diferentes de zero (exceto para $m = 0$). Os modos de fibras óticas são denominados de modos híbridos e são denotados por HE_{mn} ou EH_{mn} , dependendo se o campo dominante é o H_z ou o E_z . No caso especial em que $m = 0$, HE_{0n} e EH_{0n} são também denotados por TE_{0n} e TM_{0n} , respectivamente, uma vez que eles correspondem aos modos de propagação transversal elétrico ($E_z = 0$) e transversal magnético ($H_z = 0$). Quando é utilizada a aproximação de guiamento fraco, $n_1 - n_2 \ll n_1$, as componentes E_z e H_z estão próximas de zero e o modo passa a ser descrito como LP_{mn} representando os modos linearmente polarizados e nessa notação o modo HE_{1n} corresponde ao modo LP_{0n} (AGRAWAL, 1997).

De acordo com a teoria do acoplamento de modos (LÓPEZ-HIGUERA, 1998) a conservação de momento deve ser observada numa transferência de energia entre modos. Para propagação numa estrutura periódica (como por exemplo uma rede de período longo), o momento dessa rede ($K = 2\pi/\Lambda$) deve ser considerado na conservação total dos momentos, e dois modos de propagação serão acoplados se eles tiverem idênticas constantes de propagação (β) ou se suas constantes forem apropriadamente sintonizadas (por meio de um efeito ótico adequado, por exemplo, o causado pela estrutura periódica) e seus campos modais se sobrepuserem.

Nesse contexto, pode ser definido o índice de refração efetivo $n_{eff} = \beta/k_0$, cujo valor está compreendido entre $n_1 > n_{eff} > n_2$. Um modo deixa de ser guiado quando $n_{eff} \leq n_2$. Isso pode ser entendido notando-se que o campo eletromagnético de modos guiados decai exponencialmente no interior da casca (AGRAWAL, 1997):

$$K_m(\gamma\rho) = \left(\frac{\pi}{2\gamma\rho}\right)^{1/2} \exp(-\gamma\rho) \quad \text{para} \quad \gamma\rho \gg 1. \quad (26)$$

Quando $n_{eff} \leq n_2$, pela Equação 24 percebe-se que $\gamma^2 \leq 0$ e o decaimento exponencial do campo não ocorre. O modo alcança um corte quando γ torna-se zero ou quando $n_{eff} = n_2$. Da Equação 23, $\kappa = k_0(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ quando $\gamma = 0$. Um parâmetro que desempenha um importante papel na condição de corte é denominado de frequência normalizada e é definido como (AGRAWAL, 1997):

$$V = k_0 a (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx \left(2\pi/\lambda\right) a n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (27)$$

A frequência normalizada é uma grandeza adimensional que associa informações a respeito de três parâmetros construtivos da fibra ótica, que são: (i) o raio do núcleo a , (ii) o comprimento de onda de operação λ e (iii) a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca $\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ (OKAMOTO, 2006). Existe um comprimento de onda de corte, que corresponde a um valor distinto de frequência normalizada para o qual o modo não permanece confinado no núcleo. Para comprimentos de onda acima do comprimento de onda de corte, que corresponde a um distinto valor de frequência normalizada, a propagação da radiação eletromagnética sofre uma forte atenuação, uma vez que a energia contida nessa distribuição modal escapa para a casca.

Em uma fibra com um grande valor de frequência normalizada, V , propagam-se muitos modos. Mas o número de modos decresce rapidamente à medida que a frequência de corte normalizada diminui. Abaixo da frequência normalizada ($V = 2,4$) todos os modos, exceto o modo fundamental HE_{11} que apresenta a frequência de corte nula, atingem o corte. As fibras que apresentam um único modo de propagação são denominadas de fibras óticas monomodo. Abaixo da frequência de corte normalizada toda a fibra é monomodo (AGRAWAL, 1997).

2.3 A FOTOSSENSIBILIDADE DAS FIBRAS ÓTICAS

A fotossensibilidade é um efeito não linear fotorrefrativo em fibras óticas (KERSEY, MICHAEL, HEATHER *et al*, 1997; OTHONOS, 1997). Esse efeito, que foi introduzido no capítulo 1, está associado com a alteração permanente do índice de refração do núcleo da fibra ótica

exposta à luz com comprimento de onda e intensidade característicos, que são funções do material constituinte do núcleo (OTHONOS e KALLI, 1999). A sua origem é relacionada também com defeitos presentes na rede cristalina, que são destruídos para acontecerem rearranjos moleculares que geram novos defeitos. Esses defeitos são conhecidos como “centros de cor”, devido às fortes absorções de radiação que modificam a aparência cromática do material (OTHONOS, 1997). Mas acredita-se que há mais do que um processo envolvido na modulação do índice fotoinduzido. Existem também evidências de que o rearranjo estrutural da matriz do vidro, que provoca densificação, e relaxações por tensão estejam relacionados com esse fenômeno (HILL e MELTZ, 1997). A alteração do índice pode permanecer por até 25 anos, de acordo com previsões realizadas através de experimentos que envolveram a aceleração do envelhecimento de redes gravadas em fibras dopadas com GeO₂ (LEMAIRE, 1995), com uma redução de refletividade menor do que 1% (ZHANG, LEE, FANG *et al*, 1999).

Um elemento incorporado na estrutura vítrea das fibras que desempenha o papel de dopante e contribui para o fenômeno da fotossensibilidade é o germânio. O aparecimento de determinados defeitos está relacionado com a incorporação do germânio para a formação do núcleo da preforma, o seu posterior aquecimento (cerca de 2000°C) e puxamento na fabricação das fibras. Mas, embora as ligações de Ge-Si atuem a fotossensibilidade, não são as únicas responsáveis pelo fenômeno (KASHYAP, 1999). A fotossensibilidade também não é associada somente com fibras óticas dopadas com germânio (DIANOV, GOLANT, KHRAPKO *et al*, 1997), porque ela também tem sido observada em variadas espécies de fibras e muitas não apresentam esse elemento químico como dopante (HILL e MELTZ, 1997). Outros tipos de dopagens também podem apresentar alta fotossensibilidade, embora não tão acentuada quanto à das fibras dopadas somente com germânio, tais como: dopagens com cério (HILL, MALO, BILODEAU *et al*, 1991), európio e germânio-érbio (BILODEAU, JOHNSON, MALO *et al*, 1990). Entretanto, fibras óticas contendo o núcleo dopado com germânio permanecem sendo o mais importante material para a fabricação de dispositivos (HILL e MELTZ, 1997).

Na Figura 2 estão representados quatro tipos de defeitos que foram associados ao germânio que são os principais responsáveis pela fotossensibilidade das fibras dopadas com esse elemento. Na Figura 2 (a) o átomo de Ge está ligado a três átomos de oxigênio e mais uma ligação com o átomo de Si ou Ge formando o centro de germânio deficitário em oxigênio, GODC (“*germanium-oxygen deficient Center*”), ou centro GeO. Este defeito tem uma banda de absorção característica em 240 nm (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989). Quando a fibra ótica é exposta à radiação UV nessa banda, ocorre absorção de fóton e a quebra de uma das ligações Ge-Ge ou Ge-Si criando o

centro GeE', um defeito ionizado que apresenta a banda de absorção em 195 nm, e que está representado na Figura 2 (b). Um elétron fracamente ligado de um centro GeE', associado com o átomo de germânio, permanece livre para se mover na matriz vítrea até que ocorra uma recombinação espontânea com uma lacuna de oxigênio de outro centro GeE'. A quantidade desses defeitos aumenta depois de uma exposição prolongada à radiação UV em 240 nm. A remoção do elétron fracamente ligado causa uma reconfiguração na forma da molécula que altera a densidade do material, bem como a sua banda de absorção. Dessa maneira os centros GeE' tornam-se responsáveis pelo aumento do índice de refração nas regiões da fibra que são expostas à radiação UV. Outros tipos de defeitos, do tipo Ge(1) e Ge(2), estão apresentados nas Figuras 2 (c) e (d) e têm configuração de tetraedro apresentando um elétron armadilhado adicional preso a um átomo de Ge. A banda de absorção característica do Ge(1) está em 280 nm e há um elétron armadilhado num sítio de Ge ou Si. Já a banda de absorção do Ge(2) está em 213 nm (KASHYAP, 1999).

A fotossensibilidade está associada diretamente com o rompimento dos GODC para a formação dos centros GeE'. Logo o índice de refração está relacionado com a densidade local de centros de absorção de radiação UV, sendo definido pelo seu espectro de absorção. A mudança do índice de refração, Δn , em um dado comprimento de onda, λ , pode ser calculada a partir das alterações das bandas de absorção ao UV utilizando a relação de Kramers-Kronig (SMITH, 1985 e HAND e RUSSEL, 1990 in KASHYAP, 1999):

$$\Delta n(\lambda) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_i \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \frac{(\Delta \alpha_i(\lambda') \cdot \lambda'^2)}{(\lambda^2 - \lambda'^2)} d\lambda' \quad (28)$$

na qual a somatória é dada em intervalos discretos de comprimentos de onda para i mudanças na absorção medida, α_i . Assim a mudança fotoinduzida de uma banda de absorção que estava em λ' ($\lambda_1 \leq \lambda' \leq \lambda_2$) provoca uma mudança de índice que é função de um comprimento de onda λ .

Tratamentos térmicos de recozimento (“*annealing*”) foram realizados para investigar a estabilidade térmica dos defeitos GeE' em fibras dopadas com germânio e não submetidas a nenhum processo de realce da fotossensibilidade, tal como o de hidrogenação, demonstrando que a modulação de índice de refração Δn é proporcional à concentração de centros GeE' até a temperatura aproximada de 650°C. A mudança de índice Δn por unidade de concentração de centros GeE' é avaliada em $6 \cdot 10^{-23} \text{ cm}^3$, ou seja, para uma concentração de 10^{17} centros GeE' por cm^3 , a modulação de índice devida a esses centros é de $6 \cdot 10^{-6}$. Da temperatura ambiente até 300°C a modulação de índice de refração mantém-se constante, passando a diminuir gradativamente à

medida em que a temperatura vai aumentando. Após a temperatura do recozimento ultrapassar os 650°C, a modulação de índice Δn continua a diminuir, contudo os centros GeE' e outros centros de defeitos não são mais detectados, restando a contribuição de outros tipos de estruturas fotoinduzidas, tais como densificações, na modulação de índice ainda presente (OTHONOS e KALLI, 1999).

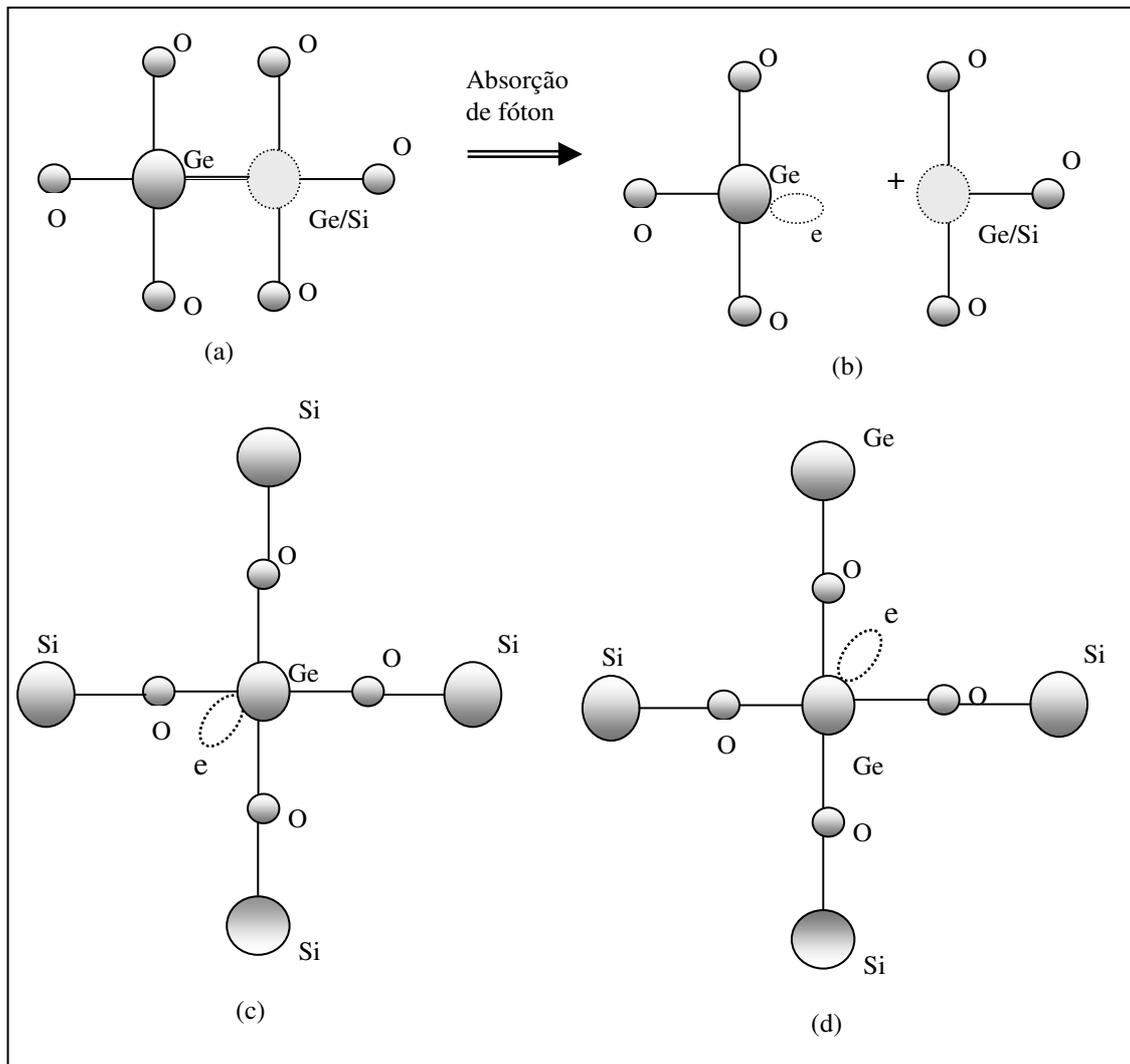


Figura 2: Defeitos associados à dopagem com Ge: (a) Centro GeO ou GODC , (b) defeito ionizado GeE' , (c) $\text{Ge}(1)$ e (d) $\text{Ge}(2)$ (KASHYAP, 1999).

O índice de refração da fibra também depende da densidade do material que a constitui. Então mudanças de volume provocadas por relaxação induzida termicamente durante a gravação das redes conduzem a mudanças de índice Δn (KASHYAP, 1999):

$$\frac{\Delta n}{n} \approx \frac{\Delta v}{v} \approx \frac{3n}{2} \delta \quad (29)$$

na qual a razão entre a mudança de volume Δv e o volume original v é proporcional a mudança fracional δ na dimensão linear da fibra.

A modulação do índice de refração devido à exposição à radiação UV é capaz de alterar as tensões internas do núcleo da fibra ótica. Experimentos realizados por Fonjallaz e seus colaboradores mostraram que antes e depois da exposição ao UV há diferença nas tensões axiais internas da fibra, sendo que antes da exposição foram medidos valores entre -5 e 1,6 kg.mm⁻² e depois da exposição, em fibras com uma concentração de 12% de germânio, a máxima tensão axial sobre o eixo da fibra foi de 14,2 kg.mm⁻² (FONJALLAZ, LIMBERGER, SALATHÉ *et al*, 1995). Aumentos nas tensões internas provocam reduções no índice de refração. Aproximadamente 30% da modulação do índice de refração fotoinduzido pela radiação UV é negativa, devido às tensões internas, mas as contribuições devidas aos processos de densificação e mudanças no espectro de absorção da radiação UV produzem no final do processo um aumento do índice de refração (LIMBERGER, FONJALLAZ and SALATHÉ, 1995).

Em síntese, há três fatores que são capazes de contribuir com a modulação do índice de refração de fibras que contenham o germânio como dopante: (i) a formação dos “centros de cor” GeE', (ii) densificações e tensões internas e (iii) a formação de centros GeH, que estão apresentados no item 2.3.1.

2.3.1 O Realce da Fotossensibilidade das Fibras Óticas

Para as fibras tornarem-se mais sensíveis à radiação UV é necessária a utilização de alguma técnica que realce a sua fotossensibilidade, tal como: (i) a hidrogenação, (ii) a varredura à chama ou a (iii) adição de dopantes. Tais medidas permitem a gravação das redes sem a necessidade de se utilizar altas potências óticas no feixe de escrita ou prolongar os tempos de exposição.

2.3.1.1 A Hidrogenação

A hidrogenação, ou carregamento de hidrogênio, é uma técnica simples que quando empregada propicia a obtenção de alta sensibilidade à radiação UV, permitindo mudanças permanentes no índice de refração da região do núcleo da fibra que é irradiada (tais como 0,01). Num processo como esse, a fibra é submetida à difusão de moléculas de hidrogênio para dentro do seu núcleo, à elevada pressão (OTHONOS, 1997). Esse processo pode ocorrer a frio (em temperatura ambiente) ou a quente (acima da temperatura ambiente).

No processo de hidrogenação a frio as fibras óticas só permanecem fotossensíveis enquanto o hidrogênio estiver presente. Quando as fibras são retiradas da câmara de hidrogenação, as moléculas desse gás passam a difundir para fora do núcleo e as fibras passam a perder a sua fotossensibilidade. Assim as fibras devem ser armazenadas a baixas temperaturas ou a altas pressões numa atmosfera hidrogenada, até o momento em que serão utilizadas, para impedir a difusão do hidrogênio para o meio ambiente. Quando é necessário retirar uma fibra da câmara de hidrogenação, sem que ela seja imediatamente utilizada em uma gravação de redes, para prevenir difusões prematuras de hidrogênio molecular na fibra, a mesma necessita ser guardada em temperaturas de cerca de -70°C até que possa ser utilizada (KASHYAP, 1999).

No processo de hidrogenação a quente o tempo de permanência das fibras na câmara de hidrogênio é menor do que no processo a frio, considerando-se uma mesma pressão. Desde que o hidrogênio permaneça quimicamente vinculado ao material, o tratamento com o hidrogênio aquecido tem a vantagem de aumentar permanentemente a fotossensibilidade da fibra (MELTZ e MOREY, 1991). O tempo de armazenamento das fibras em atmosfera de gás hidrogênio varia de acordo com a temperatura e a pressão. Em 1993, Lemaire e seus colaboradores fizeram experimentos de manutenção de fibras em câmaras de hidrogenação por doze dias com pressões compreendidas entre 20 e 750 atm e temperaturas que variaram de 20 a 75°C . O grupo descobriu que a fotossensibilidade de fibras, dopadas com germânio, dobrava quando elas eram hidrogenadas a alta pressão antes de serem gravadas com UV. Quando expostas a pulsos de luz UV em 241 nm detectaram-se grandes mudanças no índice de refração ($\Delta n \sim 3.10^{-3}$) (LEMAIRE, ATKINS, MIZRAHI *et al*, 1993). E em 1995, Lemaire, com outro grupo de pesquisadores, mostrou que a fotossensibilidade de fibras hidrogenadas, na banda centrada em 248 nm, cresce significativamente com o aumento da temperatura durante a exposição ao UV. Aquecimentos entre 250 e 400°C aumentaram a absorção do UV em fibras dopadas com GeO_2 . Fibras dopadas com P_2O_5 também se tornaram fotossensíveis com o aumento da temperatura do núcleo durante a irradiação com UV em 248 nm. (LEMAIRE, VENGSARKAR, REED *et al*, 1995).

Como o processo de hidrogenação é dependente tanto da temperatura quanto da pressão da câmara na qual as fibras são armazenadas com o gás hidrogênio, pode-se determinar o coeficiente de difusão (LEMAIRE, 1991) das moléculas de H₂ através da expressão:

$$D = 2,83 \cdot 10^{-4} e^{(-40,19 \text{ kJ/mol})/RT}, \text{ cm}^2 / \text{ s} \quad (30)$$

onde $R = 8,311 \text{ J/(K.mol)}$ e T é a temperatura. Em altas temperaturas um nível de saturação é atingido rapidamente (OTHONOS e KALLI, 1999). A concentração de hidrogênio na fibra é determinada através de uma equação de difusão (CARSLAW, 1978) que é função da posição radial ρ e do tempo t :

$$C(\rho, t) = \frac{2}{C_0} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n \rho)}{J_1^2(\mu_n \rho)} e^{-D(\mu_n/r)^2 t} \int_0^1 \varphi(\rho) J_0(\mu_n \rho) d\rho \quad (31)$$

onde μ_n são os n -ésimos zeros das funções de Bessel J_0 , D é o coeficiente de difusão e ρ é o raio da fibra. C_0 é a concentração inicial e $\varphi(\rho) = 1$ se o hidrogênio molecular é difundido dentro da fibra e $\varphi(\rho) = -1$ se é difundido para fora da fibra (KASHYAP, 1999).

Sem utilizar a técnica da hidrogenação, a fotossensibilidade das fibras dopadas com germânio é atribuída à excitação dos centros de germânio deficitários em oxigênio (GODC), conforme o que está apresentado nas Figuras 2 (a) e (b), que apresentam bandas de absorção ao UV em 240 nm (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989) ou 330 nm (DIANOV, STARODUBOV, VASILIEV *et al*, 1997). Contudo, se a hidrogenação é empregada antes da gravação das redes, os processos físicos que explicam a fotossensibilidade são alterados (GRUBSKY, STARODUBOV e FEINBERG, 1999). Quando a fibra ótica é inserida no interior de uma câmara hermética, contendo gás hidrogênio, as moléculas desse gás difundem para o interior do seu núcleo e promovem mudanças no seu índice de refração. O gás hidrogênio reage com o oxigênio das ligações de Si-O-Ge formando íons de hidroxila (OH). Quando as fibras hidrogenadas são irradiadas com UV ocorre uma dissociação molecular e são formadas as ligações Si-OH e Ge-OH. E além dos centros de impureza GeE' (TSAI, WILLIAMS e FRIEBELE, 1997), resultantes das quebras de ligação dos centros de impureza com deficiência de oxigênio (GODC), são formados os centros GeH que estão associados com a alta fotossensibilidade observada nas fibras hidrogenadas. O centro GeH, que muda consideravelmente a estrutura de bandas no UV, é resultante da reação do hidrogênio com o

íon Ge. O GeH altera o índice de refração de acordo com a regra de Kramers-Kronig (SMITH, 1985 e HAND e RUSSEL, 1990 *in* KASHYAP, 1999). Os íons hidroxila (OH) por sua vez dão origem a uma banda de absorção em torno de 1,4 μm (1 mol% de OH gera perdas de 5 dB) (KASHYAP, 1999), o que é prejudicial quando se pretende usar essas fibras em sistemas de comunicação, porque essa banda leva a perdas na janela de comunicações óticas. Utilizando o deutério no lugar do hidrogênio, para armazenar as fibras e promover o aumento da sua fotossensibilidade, o pico de absorção do OH é desviado para aproximadamente 1,9 μm (KASHYAP, 1999).

Atkins e seu grupo relataram que os GODC (defeitos com banda de absorção em 240 nm) de fibras hidrogenadas, quando irradiados com UV, geram os centros GeE' com forte absorção na banda centrada em 205 nm (ATKINS, LEMAIRE, ERDOGAN *et al*, 1993). Já Albert e seu grupo conseguiram produzir mudanças de índice em fibras hidrogenadas que não apresentavam GODC's, ou seja, absorção inicial na banda centrada em 240 nm, utilizando lasers que emitiam em 193 nm e 248 nm como fonte de radiação UV (ALBERT, MALO, BILODEAU, 1994).

A Figura 3 apresenta uma possível reação química para a formação dos íons GeH e OH em fibras hidrogenadas. Segundo Grubsky e seu grupo, esse processo é composto por diferentes estágios (GRUBSKY, STARODUBOV and FEINBERG, 1999). Primeiramente, um fóton com energia $h\nu$ (produto da constante de Planck pela frequência do fóton) excita um centro GeO, ou GODC, cuja reação está esquematizada na Figura 3(a). Enquanto o centro GeO é excitado, uma molécula de hidrogênio próxima se dissocia para formar novas ligações. Em temperatura ambiente o hidrogênio liga-se ao oxigênio formando a hidroxila (OH). Essa reação produz Si-OH, um centro GeE', e um íon H^+ (WILLIAMS, AINSLIE, KASHYAP *et al*, 1993), conforme o esquema da Figura 3 (b). Embora uma fração de íons H^+ possa reagir rapidamente com os centros GeE' e formar ligações GeH, conforme indicado na Figura 3 (c) (SMITH, 1985 e HAND e RUSSEL, 1990 *in* KASHYAP, 1999), a maioria dos átomos de hidrogênio provavelmente participa da quebra de uma nova ligação em outro centro GeO (GRUBSKY, STARODUBOV and FEINBERG, 1999).

A espectroscopia Raman (GREENE, KROL, KOSINSKI *et al*, 1994) indica que a modulação de índice de refração, Δn , em fibras hidrogenadas, ao gravarem-se redes sensoras em tais fibras, pode ser expressa como a soma das contribuições de cada concentração de centros GeE' e GeH para a mudança de índice, adicionando-se ainda outras contribuições relativas à determinadas estruturas fotoinduzidas.

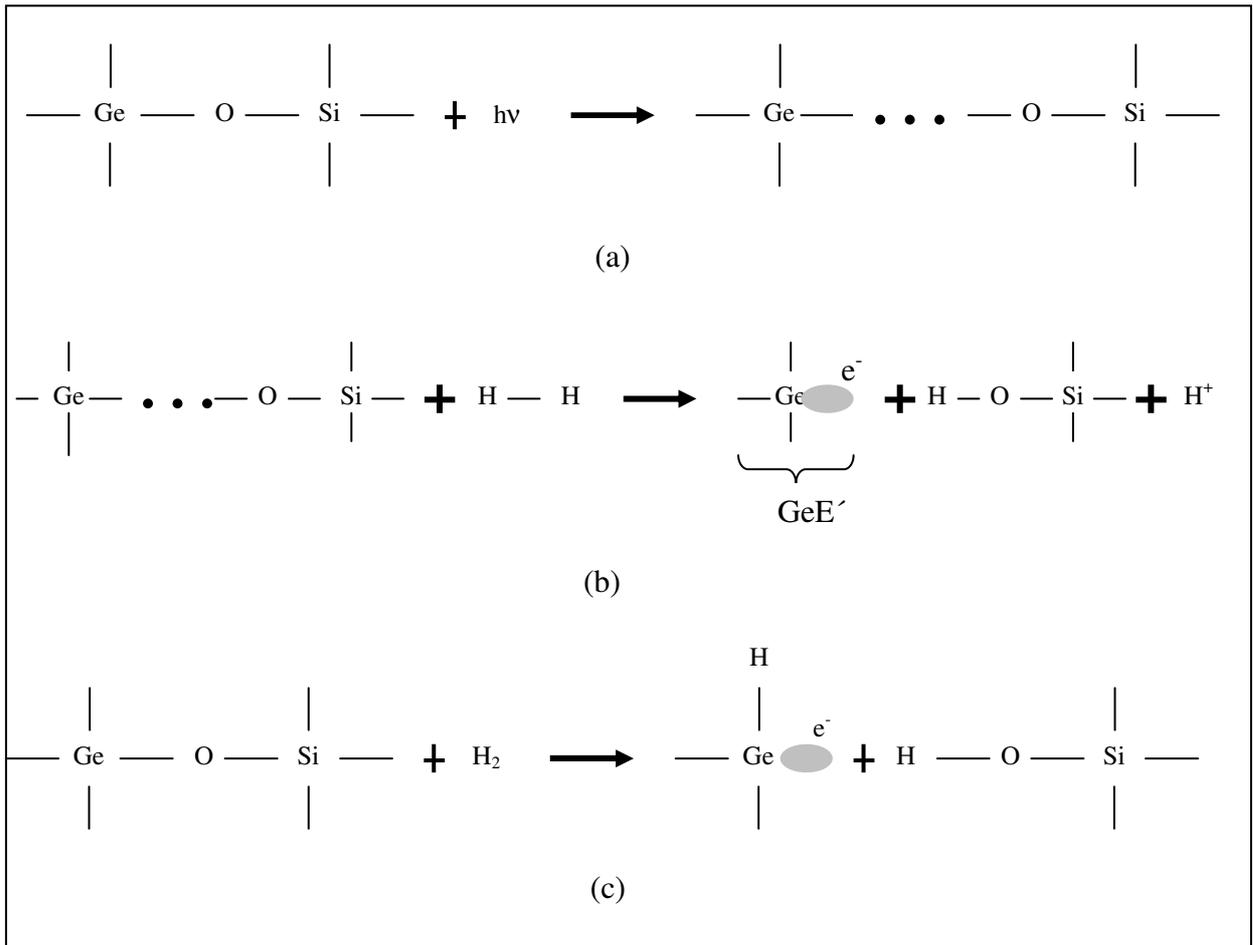


Figura 3: Reação química para a formação dos íons GeH e OH em fibras hidrogenadas (GRUBSKY, STARODUBOV e FEINBERG, 1999).

O processo de recozimento (“*annealing*”) das fibras hidrogenadas, que é empregado para estabilização térmica das redes, provoca a substituição dos centros GeE' por centros GeH , assim tem-se uma modulação de índice dada por (TSAI, WILLIAMS and FRIEBELE, 1997):

$$\Delta n = K_{GeH} ([GeE']_0 + [GeH]_0) + K_X [X] + (K_{GeE'} - K_{GeH}) [GeE']. \quad (32)$$

Na Equação 32, X representa a contribuição de alguma estrutura fotoinduzida (que não seja GeE' ou GeH), associada com a rede. K_I representa as mudanças de índice de refração por unidade de concentração de I , sendo I_0 a concentração inicial de I , e $I = GeE'$, GeH , X . A contribuição dos centros GeE' para a modulação de índice Δn , nas fibras hidrogenadas e nas não hidrogenadas, é a mesma. Mas o valor de Δn de redes fabricadas em fibras hidrogenadas é o dobro do valor das fabricadas em fibras não hidrogenadas. Isso é explicado pela contribuição adicional dos centros

GeH na modulação Δn . Sem a presença do hidrogênio, a quantidade de centros GeH é muito menor do que a de centros GeE' e a sua contribuição na modulação de índice Δn é muito pouco significativa. Nesse caso Δn é linearmente relacionado aos centros GeE', com uma constante de proporcionalidade que representa a mudança de índice por unidade de concentração de GeE', conforme já foi comentado no início da seção 2.3 desse capítulo (OTHONOS e KALLI, 1999).

A técnica de hidrogenação também apresenta as seguintes vantagens (i) FBGs de boa qualidade podem ser fabricadas em fibras dopadas com germânio, inclusive em fibras padrão de telecomunicações que tipicamente apresentam baixas concentrações de germânio e pequena fotossensibilidade intrínseca, (ii) as mudanças permanentes do índice de refração ocorrem somente nas regiões irradiadas com UV, (iii) o hidrogênio que não é reagente em outras seções da fibra é lentamente difundido para fora da mesma (OTHONOS, 1997).

2.3.1.2 A Varredura à Chama (“*Flame Brushing*”)

Nesse processo a fibra é submetida a uma chama de hidrogênio combustível, com uma pequena quantidade de oxigênio, que passa repentinamente durante cerca de 20 minutos sobre a fibra a uma temperatura de aproximadamente 1700°C. Nessa temperatura, o hidrogênio difunde para o núcleo da fibra rapidamente e reage com o vidro para produzir centros de germânio com deficiência de oxigênio (GODC). Isso cria uma forte banda de absorção para 240 nm, no núcleo dopado com germânio, e a luz UV pode induzir uma mudança significativa no seu índice de refração (OTHONOS, 1997).

Além da possibilidade da fibra ser fotossensibilizada localmente, esse processo engloba as seguintes vantagens: (i) o fato do aumento da fotossensibilidade ser permanente e (ii) a possibilidade de poderem ser fabricadas redes com maior estabilidade térmica em fibras padrão de telecomunicações, as quais apresentam uma sensibilidade intrínseca bem pequena (OTHONOS, 1997).

2.3.1.3 Co-Dopagem com Boro

Diferentemente dos processos de hidrogenação e de varredura à chama, a adição de co-dopantes com boro não produz centros de germânio com deficiência de oxigênio (GODC). Esse

processo permite que ocorra uma relaxação de tensões internas fotoinduzidas para aumentar a fotossensibilidade. As fibras co-dopadas com boro apresentam um aumento nas mudanças do índice de refração fotoinduzido. A adição de boro aparentemente reduz o índice de refração do núcleo (OTHONOS, 1997).

A vantagem principal dessa técnica é que a co-dopagem com boro não produz íons OH e portanto não ocorre atenuação do sinal ótico na janela de comunicação em 1300 nm por absorção de hidroxila.

2.4 A FORMAÇÃO DE REDES EM FIBRAS ÓTICAS

A formação de redes em fibras óticas consiste na produção de estruturas de modulação do índice de refração do seu núcleo. Tais estruturas de modulação do índice são geradas ao longo do comprimento da fibra, que corresponde à direção de propagação da luz. De acordo com o perfil da modulação, existem os tipos de configuração apresentados na Figura 4.

As redes podem ser distinguidas por seu período (espaçamento entre os planos da rede) ou inclinação (ângulos entre os planos da rede e os eixos da fibra). O tipo mais comum é o de perfil uniforme. Uma rede inclinada tem a fase frontal inclinada com relação ao plano axial da fibra, que é o ângulo entre os planos da rede e o eixo da fibra (menor do que 90°). A rede com gorjeio (“*chirp*”) apresenta o período variável ao longo da estrutura, ou seja, existe um aumento no espaçamento entre os planos da rede.

Cada tipo de perfil de modulação de índice que é arquitetado durante a gravação tem aplicações específicas. A operação conhecida como apodização, que gera uma modulação da amplitude do índice de refração mínima nas extremidades da rede e máxima na metade do comprimento da mesma, suprime os lóbulos laterais que surgem à direita e à esquerda do pico de reflexão de uma FBG. Em 1974, Hill explicou que isso acontece porque a eficiência do acoplamento entre modos contra-propagantes passa a variar espacialmente ao longo do comprimento da rede (HILL, 1974). Já as redes com gorjeio, têm como principal aplicação a compensação da dispersão. Como em uma rede de Bragg uniforme o acoplamento entre dois modos contra-propagantes ocorre apenas em uma faixa espectral definida, ao ser produzido um perfil com gorjeio o comprimento de onda que é acoplado entre os modos passa a variar linearmente ao longo da rede. Desta maneira, a condição de Bragg de primeira ordem, que está apresentada no item 2.4.1 dessa seção, torna-se uma função linear da posição ao longo da rede, de forma que frequências

ópticas diferentes são acopladas em pontos diferentes. Esse efeito pode compensar a dispersão adquirida por um pulso propagante (OUELLETTE, 1987).

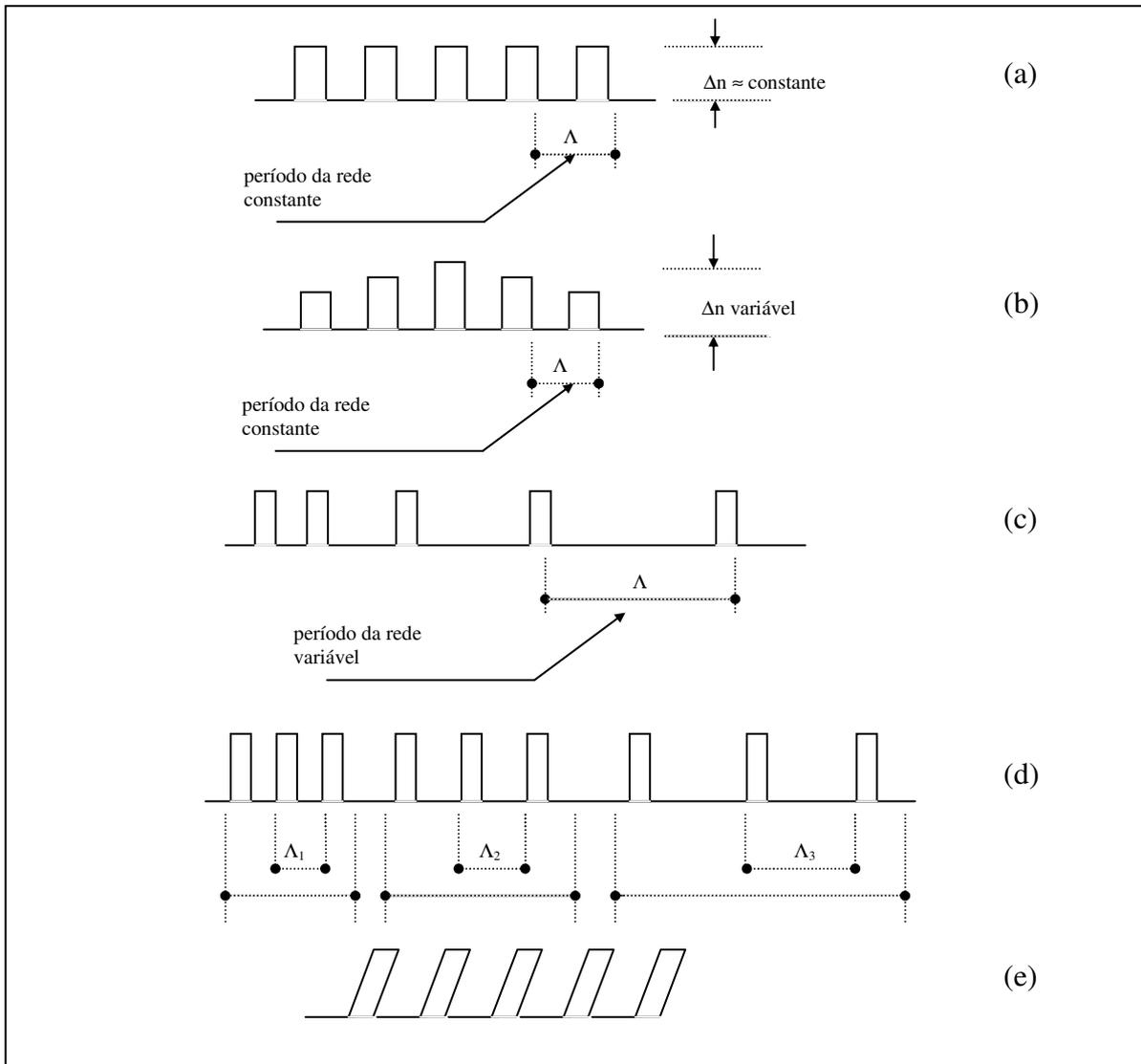


Figura 4: (a) perfil uniforme; (b) perfil apodizado; (c) perfil com gorjeio ("chirp"); (d) perfil segmentado e (e) perfil inclinado.

O perfil inclinado tem sido utilizado em FBGs para a monitoração de índice de refração. Redes com pequena inclinação (ZHAO, YANG, DEMOKAN *et al*, 2006) e com grande inclinação (ZHOU, CHEN, ZHANG *et al*, 2006) têm mostrado sensibilidades ao índice de refração do meio externo. Redes com pequena inclinação acoplam luz do modo de núcleo para modos contra-propagantes de casca e o aumento da inclinação da rede faz com que o acoplamento ocorra para modos de radiação e, após essa condição, o aumento do ângulo ocasiona acoplamento para modos co-propagantes de casca. Uma vantagem das redes com perfil inclinado para a refratometria é a

baixa sensibilidade térmica que elas apresentam. Outra aplicação para FBGs com perfil inclinado é o monitoramento de curvaturas (BAEK, JEONG and LEE, 2002).

2.4.1 Redes de Bragg

Na seção 1.2.1 do Capítulo 1 comentou-se que uma rede de Bragg pode ser escrita em uma fibra ótica empregando-se um processo interno ou externo. No processo interno a radiação emitida por um laser de argônio, operando em 488 nm, é lançada no interior de uma fibra ótica. Dessa maneira a fibra é submetida a um intenso padrão de interferência ótica e é gerada uma modulação periódica do índice de refração do seu núcleo. A estrutura da rede com índices de refração fotoinduzidos atua como um refletor distribuído que acopla a onda propagante com a onda contra-propagante. O acoplamento desses feixes forma uma estrutura de realimentação positiva que aumenta a intensidade do padrão de interferência e intensifica a modulação de índice ainda mais, conforme demonstra a ilustração da Figura 5. Esse processo continua e cessa quando a refletividade da rede atinge a saturação (HILL, FUJII, JOHNSON *et al*, 1978). As redes geradas com uma pequena modulação do índice de refração são mais longas e denominadas de redes fracas, pois apresentam pouca reflexão em cada plano. Já as redes geradas com alta modulação do índice de refração são mais curtas e denominadas de redes fortes, já que apresentam elevada reflexão em cada plano.

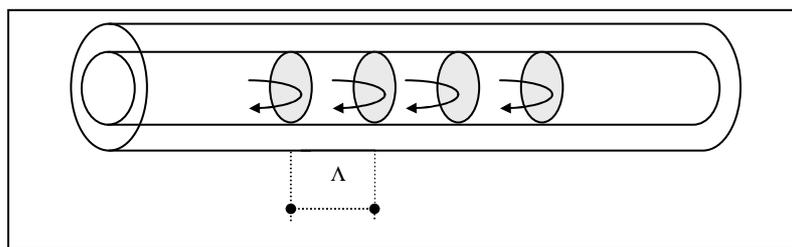


Figura 5: Reflexão acontecendo em cada plano da rede onde começa a mudança de índice.

As técnicas de escrita externa das redes de Bragg são mais versáteis, ou seja, de mais fácil reprodutibilidade, permitindo a possibilidade de ajuste do comprimento de onda de reflexão. Outra vantagem da técnica externa é a possibilidade de gerar maiores modulações de índice de refração (OTHONOS, 1997), por isso elas são as mais utilizadas. A magnitude do índice de refração obtido é função de uma série de fatores, tais como as condições de irradiação (comprimento de onda,

intensidade e fluência da luz irradiada), a composição do material vítreo que forma o núcleo da fibra e algum tratamento da fibra antes de expô-la à irradiação. Também uma grande variedade de diferentes fontes e esquemas de gravação que utilizam lasers de ondas contínuas e pulsadas, com comprimentos de onda variando do visível até o ultravioleta, tem sido usada para fotoinduzir mudanças no índice de refração em fibras óticas (MELTZ, MOREY e GLENN, 1989; HILL, MALO, BILODEAU *et al*, 1993; ANDERSON, MIZRAHI, ERDOGAN *et al*, 1993; BENNION, WILLIAMS, ZHANG *et al*, 1996; HILL e MELTZ, 1997). Na prática, as fontes de luz mais usadas são os lasers de excímero de KrF e de ArF (ALBERT, MALO, BILODEAU *et al*, 1994; DYER, FARLEY, GIEDL *et al*, 1994). As condições de irradiação típicas consistem na exposição à luz laser com fluências de 100 a 1000 mJ/cm² por alguns minutos. Com essas condições Δn é positivo numa fibra monomodo dopada com germânio com uma faixa de magnitude entre 10^{-5} e 10^{-3} .

Após a formação da rede de Bragg na fibra, a luz guiada ao longo do núcleo é espalhada por cada plano da rede. Se a condição de Bragg não é satisfeita, a luz refletida de cada plano subsequente torna-se progressivamente fora de fase e eventualmente cancela-se. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida de cada plano somam-se construtivamente na direção contra-propagante para formar uma banda de reflexão com um comprimento de onda central definido pelos parâmetros da rede.

A condição de Bragg é deduzida por meio da conservação da energia e da conservação do momento (OTHONOS, 1997). Pela conservação de energia, entende-se que a frequência da radiação incidente deve ser igual à frequência da radiação refletida ($\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$). Pela conservação do momento entende-se que a soma do vetor de onda incidente \vec{K}_i com o vetor da rede \vec{K} , seja igual ao vetor de onda da radiação espalhada \vec{K}_f .

$$\vec{K}_i + \vec{K} = \vec{K}_f \quad (33)$$

O vetor de onda da rede tem a direção perpendicular aos planos da rede e magnitude $2\pi/\Lambda$ (onde Λ é a periodicidade da rede). O vetor de onda difratada é igual em módulo, mas oposto em sentido ao vetor de onda incidente. Então a condição de conservação do momento torna-se:

$$2 \cdot \left(\frac{2\pi n}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (34)$$

Simplificando essa expressão encontra-se a condição de Bragg de primeira ordem, que é:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (35)$$

onde λ_B é o comprimento de onda central no espaço livre da luz que é enviada e que será refletida pela rede de Bragg. O espectro de reflexão da rede de Bragg apresenta um pico centrado aproximadamente em λ_B . Na Equação 35 n_{eff} é o índice de refração efetivo do núcleo da fibra para o comprimento de onda central do espaço livre. O período de uma rede de Bragg é pequeno, tipicamente da ordem de 1 μm .

Qualquer mudança de temperatura, ou aplicação de tensões mecânicas sobre uma rede de Bragg, é capaz de provocar uma alteração no seu índice de refração efetivo ou então alterar o espaçamento periódico entre os planos da rede. A mudança no comprimento de onda central da rede de Bragg, devida à mudanças de temperatura e tensões longitudinais, é o parâmetro utilizado no sensoriamento dessas grandezas físicas.

Um tipo especial de rede de Bragg é a FBG Hi-Bi (“*High Birefringence*”). Na secção transversal de uma FBG Hi-Bi, ou de alta birrefringência, existem dois eixos, x e y , perpendiculares entre si, ao longo dos quais o índice de refração é diferente, n_x e n_y , que são chamados de eixo rápido e eixo lento. Os índices de refração diferentes estabelecem dois comprimentos de onda diferentes, λ_{Bx} e λ_{By} , de acordo com a Equação 35, que determina a condição de Bragg. Isso faz com que o espectro de reflexão de uma FBG Hi-Bi apresente dois picos, um centrado em λ_{Bx} e outro em λ_{By} . Quando a luz polarizada é orientada ao longo do eixo x observa-se apenas o pico de reflexão que corresponde a λ_{Bx} , quando a orientação é ao longo do eixo y observa-se apenas o pico de reflexão λ_{By} . E, em uma situação intermediária, quando a luz polarizada é orientada a 45° com os dois eixos, os dois picos de reflexão, λ_{Bx} e λ_{By} , são detectados com igual intensidade.

2.4.2 Redes de Período Longo

As redes de período longo acoplam potência ótica entre o modo propagante de núcleo e modos co-propagantes de casca. A periodicidade de modulação do índice de refração dessa rede é de centenas de micrometros. Embora a LPG seja similar à FBG em termos da introdução de uma modulação periódica de índice de refração no núcleo das fibras, principalmente quando uma LPG é

gravada oticamente, existem diferenças entre as duas no tocante ao princípio de operação e das respostas espectrais.

O princípio de operação da LPG, proposto por Vengsarkar (BHATIA, 1996) está ilustrado na Figura 6. A luz do modo fundamental LP_{01} é perturbada pela presença da rede no núcleo. Os comprimentos de onda de ressonância da LPG são dados pela condição de casamento de fase (VENGSARKAR *et al*, 1996):

$$\beta_{01} - \beta_n = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (36)$$

onde $\beta_{01} = 2\pi n_{\text{eff}} / \lambda_n$ e $\beta_n = 2\pi n_{\text{ca}}^n / \lambda_n$ são as constantes de propagação, do modo fundamental guiado e do n -ésimo modo com o qual o acoplamento ocorre, respectivamente, e Λ é o período da rede. Esta equação pode ser reescrita em função do comprimento de onda que satisfaz a condição de casamento de fase. Assim tem-se:

$$\lambda_n = (n_{\text{nu}} - n_{\text{ca}}^n) \Lambda \quad (37)$$

onde λ_n é o comprimento de onda central do n -ésimo modo de casca, n_{nu} é o índice de refração efetivo do modo fundamental de núcleo, n_{ca}^n é o índice de refração efetivo do n -ésimo modo de casca.

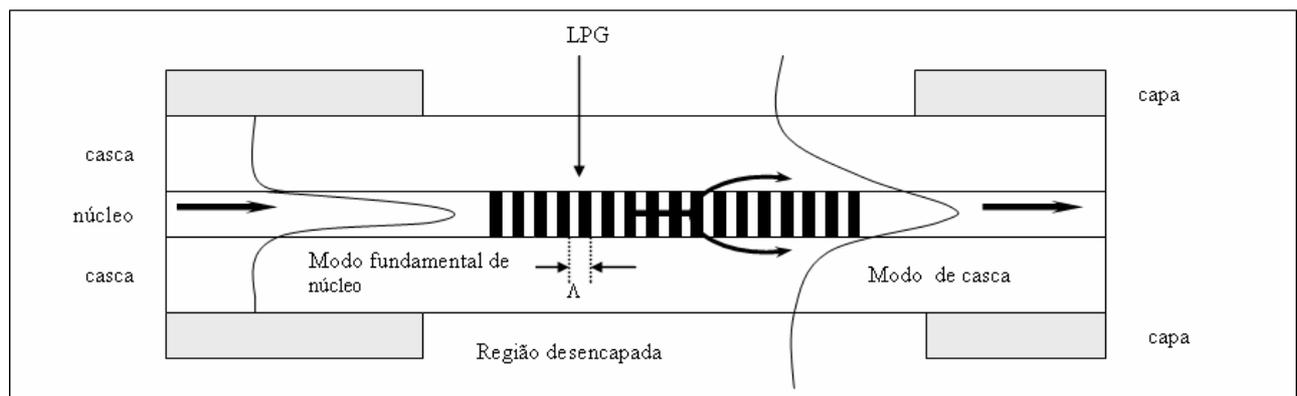


Figura 6: Corte longitudinal de uma fibra com LPG gravada. Acoplamento do modo fundamental de núcleo para modo de casca. Λ é o período da rede (BHATIA, 1996).

Quando a luz é acoplada para os modos de casca, ao ser satisfeita a condição de casamento de fase, dada pela Equação 37, a potência óptica atenua rapidamente devido a espalhamentos na interface casca/meio externo. Isso faz com que o espectro de transmissão apresente vales de atenuação posicionados no comprimento de onda que satisfaz a Equação 37. Para fibras padrão a diferença entre o índice de refração efetivo, entre o modo fundamental de núcleo e os modos de casca, está entre 10^{-3} e 10^{-2} . Então, o acoplamento ocorre em um comprimento de onda situado entre 1200 nm e 1600 nm e o período dessas redes tem centenas de micrometros (BHATIA, 1996).

A Figura 7 mostra um esquema simplificado do mecanismo de acoplamento que ocorre em uma LPG. Os valores positivos e negativos no eixo $\beta=n\omega/c$ representam as direções de propagação.

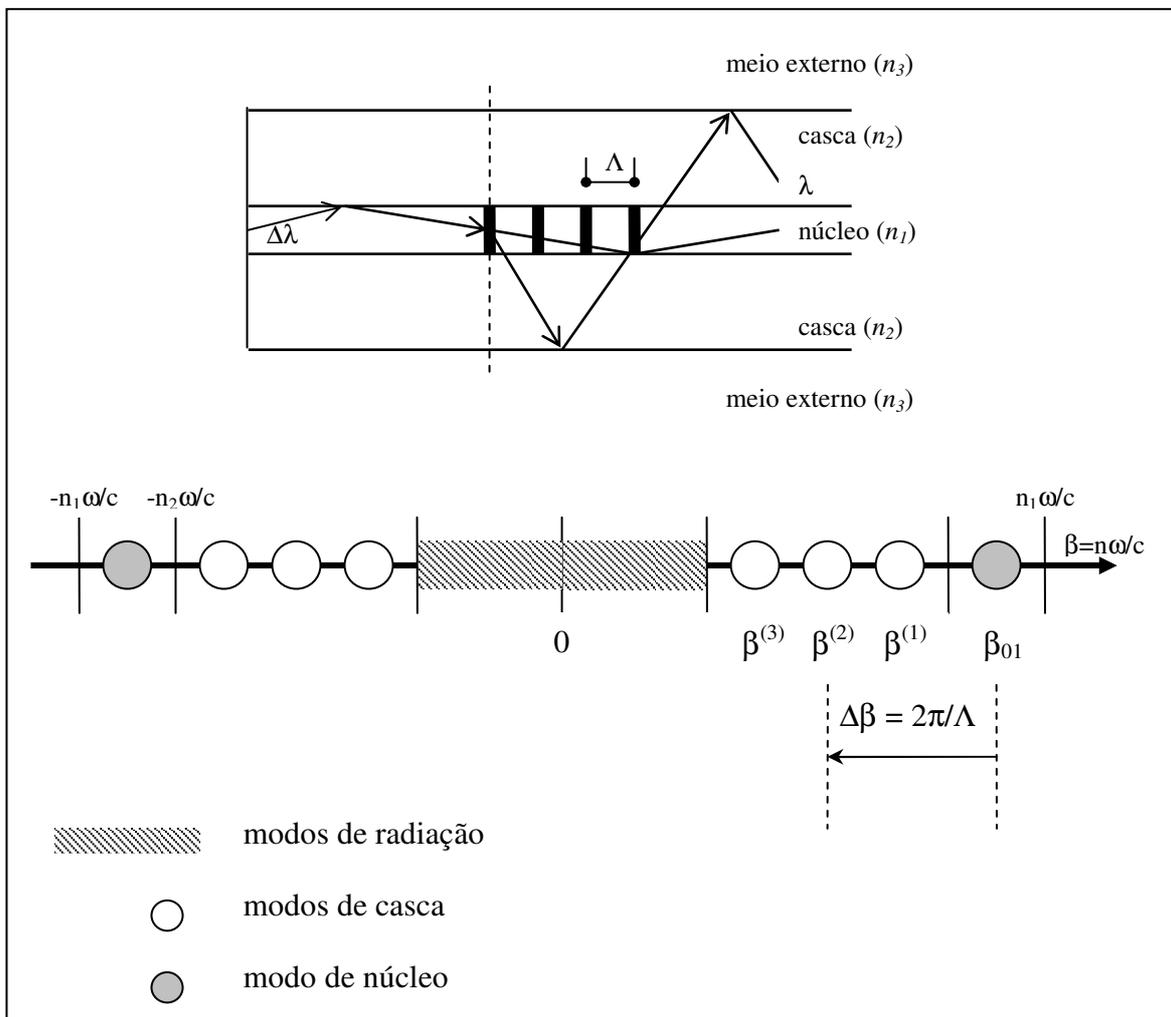


Figura 7: Mecanismo de acoplamento dos modos em uma LPG (BHATIA, 1996; KAMIKAWACHI, 2007). β_{01} é a constante de propagação do modo fundamental de núcleo e $\beta^{(n)}$ são as constantes de propagação dos modos de casca circularmente simétricos que podem ser envolvidos no acoplamento.

Na Figura 7 os valores n_1 , n_2 e n_3 são os índices de refração do núcleo, da casca e do meio externo. A mudança $\Delta\beta$, representada na figura, corresponde ao acoplamento de um modo propagante de núcleo para um modo co-propagante de casca. Esses acoplamentos são bem seletivos, uma vez que a diferença entre os coeficientes de acoplamento $\Delta\beta$ só assume determinados valores discretos. Esse acoplamento na LPG do modo propagante de núcleo, com constante de propagação β_{01} , com um modo de casca co-propagante, com constante de propagação $\beta^{(2)}$, manteve a luz viajando na mesma direção, pois $\beta^{(n)} > 0$.

Em uma FBG, a luz acopla para modos contra-propagantes, de constante de propagação negativa, pois $\beta^{(n)} < 0$, e a luz acoplada viaja em sentido contrário ao da radiação incidente. A Equação 36 mostra que a diferença entre as constantes de propagação, $\Delta\beta$, é inversamente proporcional ao período de uma rede, Λ . Por isso como uma FBG tem o período pequeno, tipicamente menor que $1 \mu\text{m}$, a diferença entre as constantes de propagação dessa rede é grande quando comparada a de uma LPG cujo período geralmente está compreendido na faixa de dezenas a centenas de micrometros.

O acoplamento de um modo de núcleo para diferentes modos de casca resulta em distintas bandas de ressonância no espectro de transmissão, conforme demonstra a ilustração da Figura 8.

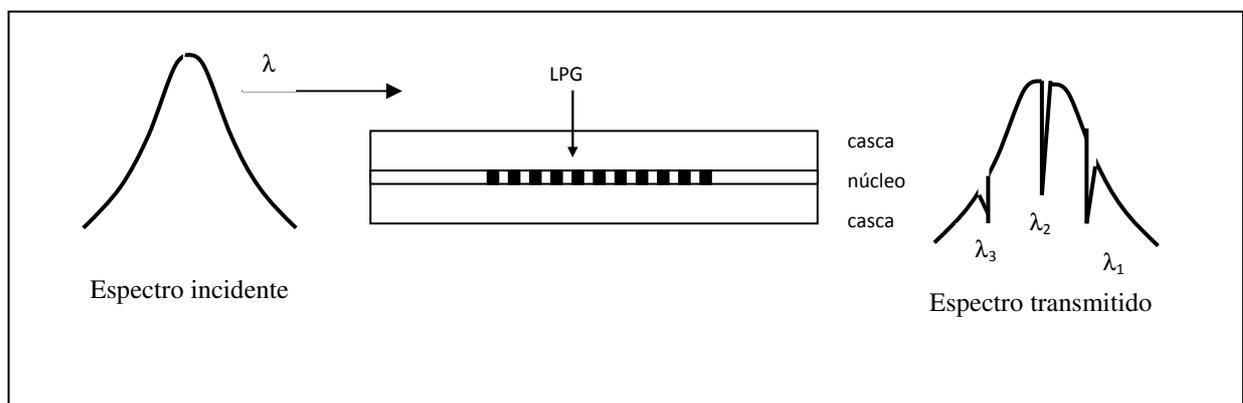


Figura 8: Modulação do espectro de uma LPG. Os comprimentos de onda λ_1 , λ_2 e λ_3 correspondem a três diferentes modos de casca (BHATIA, 1996).

Nas condições de casamento de fase, a razão $(2\pi/\Lambda)$ permanece inalterada, já que evidentemente o período da rede é o mesmo para qualquer modo de acoplamento. Mas o comprimento de onda que satisfaz a condição de casamento de fase muda de acordo com a ordem

da banda de ressonância. Como a potência ótica pode ser acoplada para mais de um modo de casca, o espectro de transmissão de uma LPG pode apresentar mais de um vale de atenuação.

A eficiência do acoplamento de um modo de núcleo para diferentes modos de casca, que resulta em distintos vales de atenuação no espectro de transmissão, é expressa em termos da transmitância espectral da potência ótica, no núcleo da fibra, através da Equação 38 (STARODUBOV, GRUBSKY e FEINBERG, 1998):

$$T(\lambda) = \cos^2\left(\frac{\kappa(\lambda)L}{2}\right) \quad (38)$$

na qual $T(\lambda)$ é a transmitância espectral, κ é o coeficiente de acoplamento e L é o comprimento da rede. Pela Equação 38 é possível verificar que com o aumento do comprimento da rede, na medida em que os pontos vão sendo gravados, a intensidade da potência ótica no núcleo varia cossenoidalmente, ou seja, periodicamente. Para comprimentos da rede múltiplos de π/κ ($\pi/\kappa, 3\pi/\kappa, 5\pi/\kappa, \dots$) a LPG acopla praticamente 100 % da luz guiada no núcleo para a casca, ou seja, a transmitância no núcleo é nula. Já quando o comprimento da rede atinge valores múltiplos de $\pi/2\kappa$ ($\pi/2\kappa, 3\pi/2\kappa, 5\pi/2\kappa, \dots$) o acoplamento atinge seu valor mínimo e a transmitância no núcleo torna-se máxima.

Outro parâmetro da LPG que vai se modificando, na medida em que a rede vai sendo gravada, é a largura de banda ou largura total a meia altura ($\Delta\lambda_{FWHM}$ – “*full width at half maximum*”), pelo fato dessa depender tanto do comprimento da rede, L , quanto do coeficiente de acoplamento, κ , e da diferença entre os índices de refração efetivos do modo de núcleo e dos n -ésimos modos de casca, $(n_{nu} - n_{ca}^n)$. A largura de banda pode ser obtida a partir da largura de banda de guias de onda (HALL, 1987) e é expressa pela Equação 39.

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{(\lambda_n)^2}{(n_{nu} - n_{ca}^n)L} \sqrt{\frac{4\kappa}{\pi}} L \quad (39)$$

2.5 SENSIBILIDADE DAS REDES

Quando uma rede é sensível à mudanças de algum parâmetro físico ou químico, ocorrem mudanças no espectro dessa rede. No caso das redes de Bragg, no espectro de reflexão acontecem deslocamentos, em comprimento de onda e frequência, do pico central de reflexão. No caso das redes de período longo, no espectro de transmissão, também acontecem deslocamentos, em comprimento de onda e frequência, dos vales de atenuação. Também podem ocorrer mudanças na amplitude dos espectros. Nessa seção comenta-se a sensibilidade das FBGs e é dada uma ênfase maior à sensibilidade das LPGs que são o objeto principal de estudo deste trabalho.

2.5.1 Sensibilidade das FBGs

Conforme o que foi apresentado na seção 2.4 deste capítulo, a rede de Bragg é um transdutor intrínseco capaz de operar como um filtro espectral reflexivo, que seleciona uma faixa estreita de comprimentos de onda, de uma fonte de banda larga que é acoplada à rede. Em outras palavras, quando a condição de Bragg é satisfeita, uma onda incidente é acoplada para o mesmo modo contra-propagante e assim refletida. Dessa maneira percebe-se que qualquer mudança nos parâmetros de uma fibra, tais como tensão longitudinal, temperatura, polarização, ou pressão acústica e hidrostática que seja capaz de alterar o índice modal ou a periodicidade da rede, provocará uma mudança espectral devida à alteração no comprimento de onda de Bragg.

A condição de ressonância de Bragg, apresentada na Equação 35, dada pelo comprimento de onda central da luz refletida pelos planos da FBG, depende do índice de refração efetivo do núcleo e da periodicidade da rede. A mudança no comprimento de onda central da rede de Bragg devida à mudanças de temperatura e tensão longitudinal, é dada por (MOREY, MELTZ e GLENN, 1992):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (40)$$

na qual o primeiro termo do segundo membro é o efeito da deformação, ou tensões longitudinais, sobre a rede. ε_z é a componente de deformação relativa por unidade de comprimento e p_e é a constante fotoelástica efetiva. Esse termo é relativo aos deslocamentos no comprimento de onda de

Bragg que correspondem a mudanças no espaçamento da rede e a mudanças fotoelásticas induzidas no índice de refração.

O segundo termo do segundo membro da Equação 40 representa o efeito da temperatura sobre a rede. O deslocamento do comprimento de onda de Bragg, referente à expansão térmica, é resultante tanto de alterações no período espacial da rede (Λ) quanto de mudanças no seu índice de refração efetivo (n). O coeficiente de dilatação térmica, α , representa a contribuição da dilatação térmica e o coeficiente termo-ótico, ξ , representa a contribuição da mudança do índice de refração, devida ao efeito da temperatura, na variação do comprimento de onda de Bragg ((MOREY, MELTZ e GLENN, 1992).

Houve também alguns estudos relativos à sensibilidade de FBGs à pressão. Em 1993, o pesquisador Xu e seus colaboradores relataram o primeiro sensor de pressão hidráulica com rede em fibra ótica (XU, REEKIE, CHOW *et al*, 1993). São encontrados também estudos a respeito de dispositivos que são capazes de medir pressão e temperatura simultaneamente (LIU, GUO, ZHANG *et al*, 2000), que utilizam filmes de paládio para a construção de sensores de hidrogênio (ZALVIDEA, DIEZ, CRUZ *et al*, 2004), que fazem uso de cilindros de metal preenchidos com polímeros (SHENG, FU, CHEN *et al*, 2004). Encontram-se ainda outras aplicações para a área médica em medidas manométricas do esôfago (SWART, LACQUET e CHTCHERBAKOV, 2002) e na engenharia para medidas de temperatura e pressão com redes Hi-Bi (CHEN, LIU, JIA *et al*, 2003).

Em 2001, Zhang e seus colaboradores fizeram um experimento utilizando uma FBG coberta com um polímero e inserida em um cilindro de alumínio. Suprimindo-se os efeitos de pressões radiais sobre a fibra, apresentaram a seguinte expressão:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = -(1 - P_e)\frac{P}{E} = k_p P \quad (41)$$

onde $k_p = -(1 - P_e)/E$ é definido como a sensibilidade à pressão que é medida pela mudança fracional no comprimento de onda de Bragg. k_p é uma constante que depende somente do módulo de Young do polímero e do coeficiente fotoelástico efetivo da fibra de vidro. Nos resultados desse grupo o comprimento de onda de Bragg mudou linearmente com a pressão aplicada (ZHANG, FENG, LIU *et al* 2001).

2.5.2 Sensibilidade das LPGs

Conforme o que foi apresentado na seção 2.4 deste capítulo, a rede de período longo é um transdutor intrínseco que muda o espectro de um sinal incidente através do acoplamento de energia entre o modo fundamental de núcleo e os modos de casca co-propagantes. Sabe-se que os índices de refração efetivos dos modos de casca dependem simultaneamente dos índices de refração do núcleo, da casca e do meio externo. Isso significa que qualquer mudança no meio externo altera o índice de refração efetivo dos modos de casca. Isso faz com que a condição de casamento de fase, dada pela Equação 37, seja alterada mudando o valor do comprimento de onda de ressonância que a satisfaz. Em consequência disso, no espectro de transmissão dessas redes haverá deslocamentos dos vales que correspondem aos modos de acoplamento. Variações de temperatura, tensões longitudinais ou modificações no índice de refração do meio externo à rede podem provocar esses deslocamentos. Como nos campos de maior ordem n o campo eletromagnético transversal apresenta uma distribuição radial mais próxima da interface casca-meio externo, estes modos têm uma maior interação com o meio externo e em consequência uma maior sensibilidade a alterações nesse meio.

O mecanismo de operação de uma LPG é baseado na modulação dos índices de refração efetivos do modo de núcleo e dos modos de casca e/ou da periodicidade da rede por perturbações externas (BHATIA, 1996).

Diferenciando-se a Equação 37 com relação à temperatura, pode-se fazer uma análise da sensibilidade de uma LPG com relação às variações de temperatura (ABRAMOV, EGGLETON, ROGERS *et al*, 1999):

$$\frac{d\lambda_n}{dT} = \Lambda \left[\frac{d(n_{nu} - n_{ca}^n)}{dT} \right] + (n_{nu} - n_{ca}^n) \left(\frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (42)$$

Na Equação 42 observa-se que o primeiro termo, relativo ao efeito termo-ótico, apresenta a variação dos índices de refração efetivos devida à dependência do índice de refração com mudanças de temperatura. O coeficiente termo-ótico, geralmente da ordem de $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para fibras de sílica, é dado por (QIN, WEI, WANG *et al*, 2000):

$$\xi = \frac{1}{n_{nu} - n_{ca}^n} \cdot \frac{d(n_{nu} - n_{ca}^n)}{dT} \quad (43)$$

Segundo Bhatia, a literatura revela que os valores dos coeficientes termo-ópticos de fibras dopadas com germânio não são facilmente avaliados e as mudanças no valor desse coeficiente são funções do tipo de fibra ótica bem como da sua concentração de dopantes (BHATIA, 1996).

O segundo termo da Equação 42 é relativo ao efeito da alteração da periodicidade da rede devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra, α . O coeficiente de expansão térmica é dado pela expressão (QIN, WEI, WANG *et al*, 2000):

$$\alpha = \frac{1}{\Lambda} \cdot \frac{d\Lambda}{dT} \quad (44)$$

O coeficiente de expansão térmica da sílica fundida é muito baixo, da ordem de $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e por essa razão pode ser muitas vezes ignorado (YIN, CHUNG e ZHU, 2001 in FALATE, 2002).

A Equação 42 pode ser simplificada através da substituição dos coeficientes apresentados nas Equações 43 e 44, bem com da condição de casamento de fase dada pela Equação 37. Dessa maneira pode-se reescrever:

$$\Delta\lambda = [(\xi + \alpha)\lambda_n] \Delta T \quad (45)$$

Para LPGs sensíveis à temperatura, a sensibilidade térmica pode ser positiva ou negativa. A direção do gradiente de temperatura depende do período da rede, comparando-se redes gravadas em fibras com idênticas propriedades óticas e físicas (FLAHERTY, GHASSEMLLOY, MANGAT *et al*, 2004).

Diferenciando-se a Equação 37 com relação à deformação, pode-se fazer uma análise da sensibilidade de uma LPG com relação à deformações mecânicas:

$$\frac{d\lambda_n}{dl} = \Lambda \left[\frac{d(n_{nu} - n_{ca}^n)}{dl} \right] + (n_{nu} - n_{ca}^n) \left(\frac{d\Lambda}{dl} \right) \quad (46)$$

Na Equação 46 observa-se que o primeiro termo, relativo ao efeito fotoelástico, apresenta a variação do índice de refração devida à deformação da fibra. O segundo termo apresenta a variação da periodicidade da rede devida à deformação elástica da fibra (QIN, WEI, WANG *et al*, 2000).

Através da escolha do período de uma LPG bem como da composição do material da fibra ótica é possível obterem-se redes praticamente insensíveis à deformação mecânica (JAMES e TATAM, 2003). Essa afirmação pode ser justificada pela Equação 46, na qual aparece a soma de duas contribuições distintas para o deslocamento espectral. Se uma contribuição for positiva e outra negativa, pode-se obter uma rede insensível ou com sensibilidade positiva ou negativa a esse parâmetro. Por exemplo, as redes com período superior a 100 μm apresentam contribuição negativa no primeiro termo da Equação 46, relacionado ao efeito fotoelástico, e contribuição positiva no segundo termo da mesma equação, relacionado à deformação elástica. Por isso as redes com períodos maiores do que 100 μm são praticamente insensíveis à deformações mecânicas mas altamente sensíveis à temperatura (JAMES e TATAM, 2003).

Com relação à sensibilidade de uma LPG ao índice de refração do meio externo, os deslocamentos do comprimento de onda central, em função das alterações no índice de refração do meio externo, são descritos pela equação de Chiang (CHIANG, LIU, NG *et al*, 2000):

$$\Delta\lambda \cong \frac{u_{\infty}^2 \lambda_0^3 \Lambda}{8\pi^3 n_{ca} \rho^3} \left(\frac{1}{\sqrt{n_{ca}^2 - n_{ex0}^2}} - \frac{1}{\sqrt{n_{ca}^2 - n_{ex}^2}} \right) \quad (47)$$

na qual $\Delta\lambda$ são as mudanças do comprimento de onda da LPG devidas à variação do índice de refração do meio externo desde n_{ex0} até n_{ex} , λ_0 é o comprimento de onda da rede imersa no ar, n_{ca} é o índice de refração da casca, Λ é o período da rede, u_{∞} é uma das raízes da função de Bessel de primeira espécie J_0 e ρ é o raio da casca. Pode-se observar, pelo segundo termo do segundo membro da Equação 47, que na medida em que a LPG é inserida em meios fluidos, cujo valor de índice de refração se aproxima do valor do índice de refração da casca da fibra ($n_{ex} \rightarrow n_{ca}$), a sensibilidade a esse parâmetro aumenta consideravelmente.

A derivada da Equação 47, com respeito ao índice de refração do meio externo, determina a sensibilidade ao índice de refração (RIS – “*Refractive Index Sensitivity*”) da LPG (KAMIKAWACHI, POSSETTI, FALATE *et al*, 2007).

$$RIS = \frac{d\lambda}{dn_{ex}} = -\frac{u_{\infty}^2 \lambda_0^3 \Lambda}{8\pi^3 n_{ca} \rho^3} \cdot \left[\frac{n_{ex}}{(n_{ca}^2 - n_{ex}^2)^{3/2}} \right] \quad (48)$$

Quando o meio externo a uma LPG é submetido a alterações de temperatura, ocorrem modificações no índice de refração desse meio. Esse efeito, conhecido como termo-ótico, altera não somente o coeficiente termo-ótico de acoplamento, ξ , como também como a sensibilidade da LPG ao índice de refração do meio externo (RIS). He e seus colaboradores obtiveram uma equação, que relaciona os deslocamentos em comprimento de onda com as alterações de temperatura, na qual está incluída a contribuição do efeito termo-ótico do meio externo, γ . Essa equação é dada por (HE, SHI, CAI *et al*, 2002):

$$\Delta\lambda = [(\xi + \alpha)\lambda_n + \gamma]\Delta T \quad (49)$$

na qual ξ é o coeficiente termo-ótico de acoplamento, α é o coeficiente de expansão térmica e γ é a contribuição do efeito termo-ótico da amostra para o deslocamento total. Essa grandeza é dada por:

$$\gamma = -\frac{u_\infty^2 \lambda_0^3 n_{ex} \Lambda \alpha_{ex}}{8\pi^3 \rho^3} \times \left\{ \frac{u_\infty^2 \lambda_0^3}{4\pi^3 \rho^3} (n_{ca}^2 - n_{ex}^2)^{5/2} + (n_{ca}^2 - n_{ex}^2) \times \left[(n_{nu}^2 - n_{ca}^2) \left(\frac{a}{\rho} \right)^2 \left(\frac{J_0^2(u_\infty a/\rho) + J_1^2(u_\infty a/\rho)}{J_0^2(u_\infty) + J_1^2(u_\infty)} \right) + n_{ca}^2 - \frac{u_\infty^2 \lambda_0^2}{4\pi^2 \rho^2} \right] \right\}^{1/2} \quad (50)$$

Na Equação 50, λ_0 é o comprimento de onda de ressonância na temperatura inicial, a e ρ são os raios do núcleo e da casca da fibra, n_{nu} , n_{ca} e n_{ex} são os índices de refração do núcleo, da casca e do meio externo, α_{ex} é o coeficiente termo-ótico do meio externo, J_0 e J_1 são as funções de Bessel de ordem zero e de primeira ordem e u_∞ é a raiz da função de Bessel de ordem zero.

O deslocamento espectral de uma LPG pode ser induzido por diversos parâmetros, ou seja, pode acontecer a chamada sensibilidade cruzada. Uma alternativa para esse problema é buscar empregar simultaneamente duas redes a fibra, com diferentes respostas aos parâmetros envolvidos, ou pelo menos utilizar uma rede que não tenha sensibilidade a uma determinada grandeza física (OTHONOS e KALLI, 1999; BATHIA, 1996).

2.6 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO DA LPG

As redes de período longo podem ser gravadas em fibras óticas com diferentes estratégias, quais sejam: (i) com radiação UV (por meio da técnica ponto-a-ponto ou com o uso de máscara de amplitude), (ii) com laser de CO₂ (por meio da técnica ponto-a-ponto), (iii) com arco elétrico (por meio da técnica ponto-a-ponto) e (iv) por meio de indução mecânica. Nesta seção serão descritos os processos de escrita de LPGs ponto-a-ponto e com o uso de máscara de amplitude, envolvendo a utilização de feixe de radiação UV, os processos de escrita ponto-a-ponto com arco elétrico e laser de CO₂ e alguns processos de gravação por indução mecânica.

2.6.1 Gravação com Radiação UV

Redes de período longo podem ser gravadas com radiação UV em fibras óticas fotossensíveis, hidrogenadas ou não, dependendo do tipo de fibra e da fonte ótica utilizada, tanto por meio da técnica ponto-a-ponto quanto da técnica que utiliza máscaras de amplitude.

2.6.1.1 Processo de Escrita Ponto-a-Ponto com Radiação UV

A técnica de escrita ponto-a-ponto consiste em focalizarem-se pontos fixos ao longo de uma fibra ótica fazendo incidir nesses pontos um feixe de laser. Dessa maneira o índice de refração do núcleo aumenta no local irradiado. Então a fibra, ou o feixe de laser é deslocado de uma distância, que é igual ao período da rede, ao longo do eixo longitudinal da fibra e o processo de alteração do índice de refração recomeça em outro ponto. Esse procedimento, representado esquematicamente na Figura 9, é repetido até a formação da rede desejada (MALO, HILL, BILODEAU *et al*, 1993). Embora a uniformidade do período da rede dependa da precisão no deslocamento do estágio de translação, essa técnica é vantajosa em relação ao processo que utiliza a máscara de amplitude porque há mais flexibilidade na escolha do valor desse parâmetro.

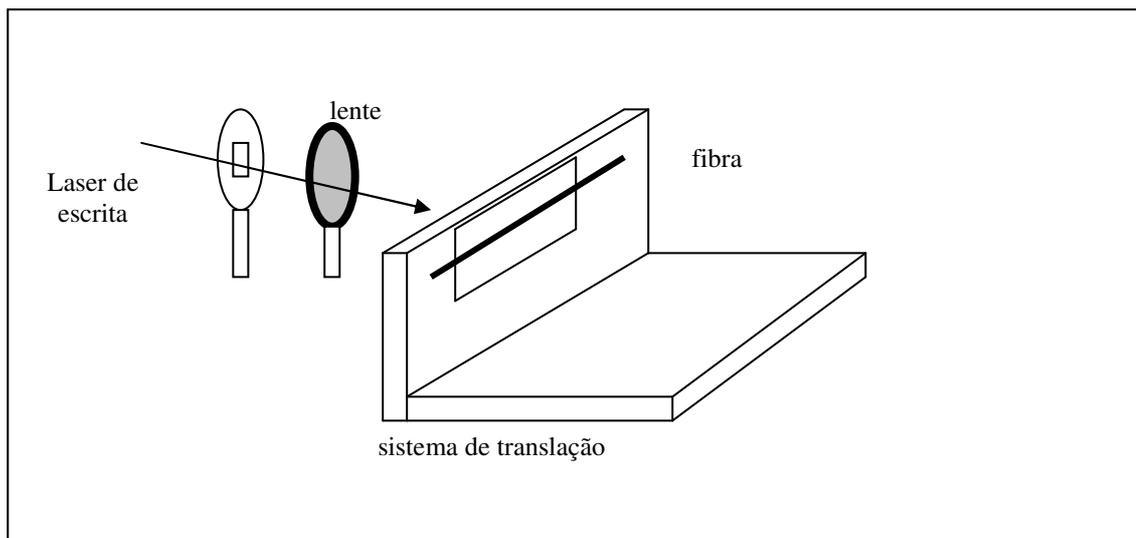


Figura 9: Técnica de escrita ponto-a-ponto (MALO, HILL, BILODEAU *et al*, 1993).

2.6.1.2 Processo de Escrita com Máscara de Amplitude

A Figura 10 ilustra um arranjo experimental que utiliza a técnica de escrita com máscara de amplitude. A montagem apresenta um conjunto de lentes que é utilizado para se obter um determinado padrão de feixe de radiação UV, que pode ser expandido ou contraído dependendo da configuração desejada. O estágio de translação faz com que o feixe se desloque ao longo da máscara, que é posicionada logo acima da fibra. A máscara de amplitude é formada por um filme composto por um material, que é normalmente um metal, que absorve a radiação UV e que é depositado sobre um substrato composto de um material transparente ao UV (VENGSARKAR, LEMAIRE, JUDKINS *et al*, 1996). O período da LPG que é gravada é o mesmo da máscara de amplitude. Por isso uma desvantagem dessa técnica é a necessidade de dispor de uma variada quantidade de máscaras para obter LPGs com períodos diferentes.

2.6.2 Processo de Escrita com Laser de CO₂

O processo de escrita com laser de CO₂ utiliza a técnica de escrita ponto-a-ponto, ilustrada na Figura 9. A radiação infravermelha, do laser de CO₂, aquece cada ponto da fibra e produz uma relaxação da tensão residual do núcleo alterando o seu índice de refração. A cada período Λ o feixe

do laser CO₂, ou a fibra, são transladados precisamente. Redes produzidas com essa técnica apresentam elevada estabilidade térmica (STEPHEN, JAMES e TATAM, 2003).

Quando os pulsos de alta frequência da radiação infravermelha do laser de CO₂, que emite em 10,6 μm , incidem em um ponto da fibra eles são rapidamente absorvidos e transformados em calor. Na medida em que os pontos de gravação da rede vão sendo concluídos eles vão passando por rápidos resfriamentos que induzem a modulação do índice de refração da fibra. Mas a distribuição da modulação do índice de refração, na secção transversal da fibra que é gravada por esse processo, apresenta uma assimetria, diferentemente da modulação do índice da LPG gravada com UV e máscara de amplitude, que é simétrica. Van Wiggeren e seus colaboradores explicaram essa assimetria uma vez que a intensidade da radiação infravermelha, do CO₂, é gradualmente enfraquecida ao longo da direção de incidência na fibra ótica, ou seja, a intensidade é alta no lado de incidência da radiação e fraca no lado de escape. Dessa forma, o índice de refração no lado de incidência do feixe fica maior do que no lado de escape do mesmo (VAN WIGGEREN, GAYLORD, DAVIS *et a*, 2000). Outra contribuição para a alteração do índice de refração nesse processo é o aquecimento da fibra tracionada, que provoca reduções no diâmetro da mesma, nas regiões nas quais o feixe de CO₂ é focalizado.

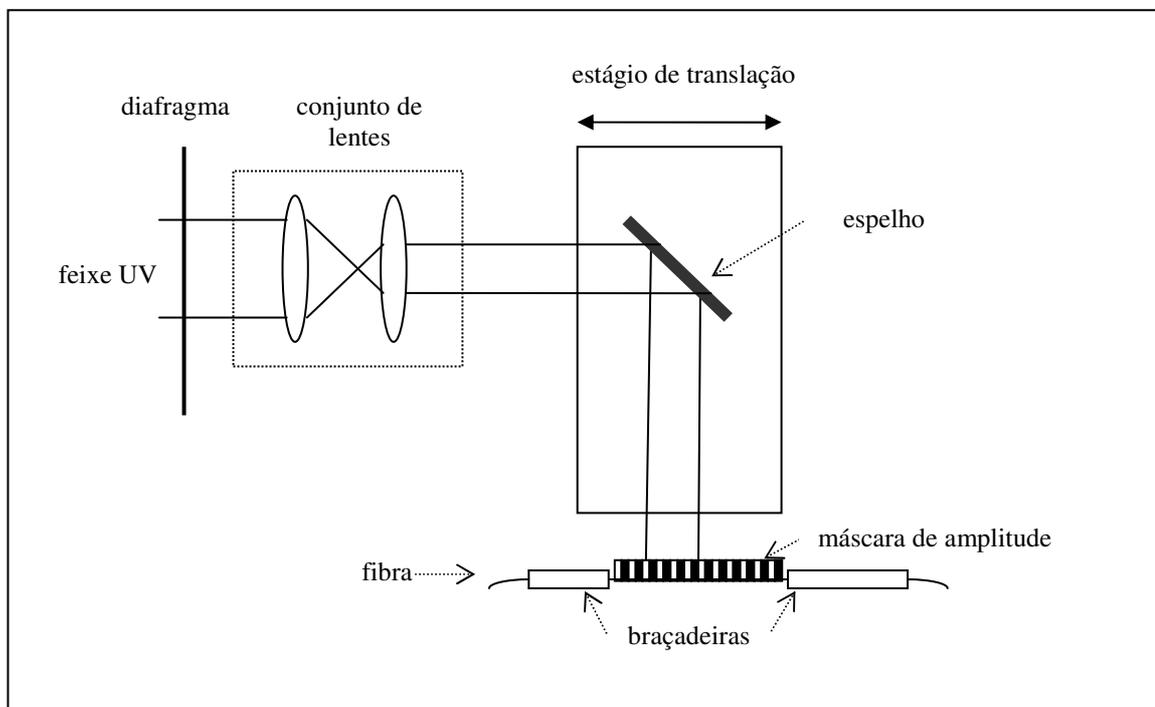


Figura 10: Técnica de escrita com máscara de amplitude.

2.6.3 Processo de Escrita com Arco Elétrico

A técnica de escrita que faz o uso de arco elétrico ponto-a-ponto está ilustrada na Figura 11. Na escrita com arco elétrico, a fibra é desencapada e colocada entre os eletrodos de uma máquina de emendas sob tensão axial constante, mantendo-se uma de suas extremidades presa a uma massa e a outra fixa a um sistema de translação preciso. A fibra receberá, ponto-a-ponto, uma descarga elétrica com intensidade de corrente e intervalo de tempo controlados. A descarga elétrica produzida em todos os pontos, equidistantes e espaçados por um período Λ , gera aquecimento que modula o índice de refração da fibra. Redes gravadas com essa técnica têm mostrado bom desempenho em temperaturas superiores a 800°C sem modificação permanente das suas características, quais sejam o comprimento de onda de ressonância e a atenuação na banda do sinal ótico transmitido (STEPHEN, JAMES e TATAM, 2003).

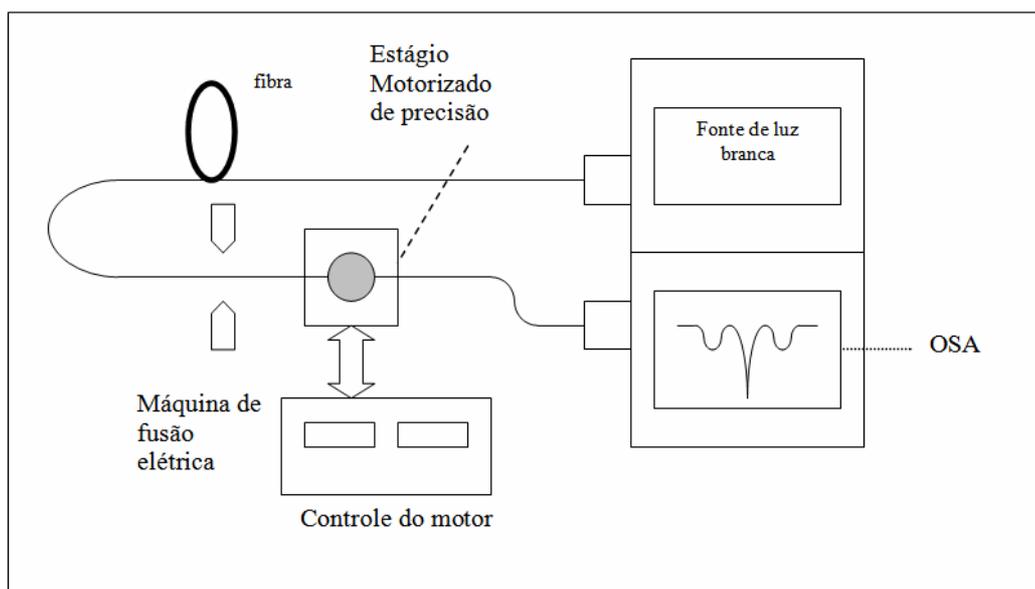


Figura 11: Esquema da técnica de escrita ponto-a-ponto por arco elétrico (PALAI, SATYANARAYAN, DAS *et al*, 2001).

2.6.4 Processos de Gravação por Indução Mecânica

Existem variadas técnicas de gravação de LPGs através de indução mecânica. Algumas técnicas mantêm a integridade da fibra ótica e outras podem fragilizá-la. Dentre as que são capazes de manter a integridade da fibra, inclusive tornando o processo de fabricação da rede totalmente

reversível, já que nem mesmo a capa da fibra ótica precisa ser retirada, destacam-se (i) pressionar a fibra entre duas chapas, sendo uma delas composta por periódicas ranhuras e outra plana (SAVIN, DIGONNET, KINO *et al*, 2000), (ii) enrolar um fio de nylon periodicamente ao redor da fibra tracionando-o (REGO, FERNANDES, SANTOS *et al*, 2003), (iii) utilizar uma bobina de fio de aço para envolver a fibra e gerar pontos periódicos de pressão sobre a mesma (YOKOUCHI, SUZAKI, NAKAGAWA *et al*, 2005) e (iv) controlar a força de atração e repulsão entre magnetos para pressionar a fibra entre duas chapas, sendo uma lisa e uma composta por um arranjo periódico de pequenos cilindros de vidro (CAUSADO-BUELVAS, GOMEZ-CARDONA e TORRES, 2008), conforme ilustra o arranjo experimental da Figura 12.

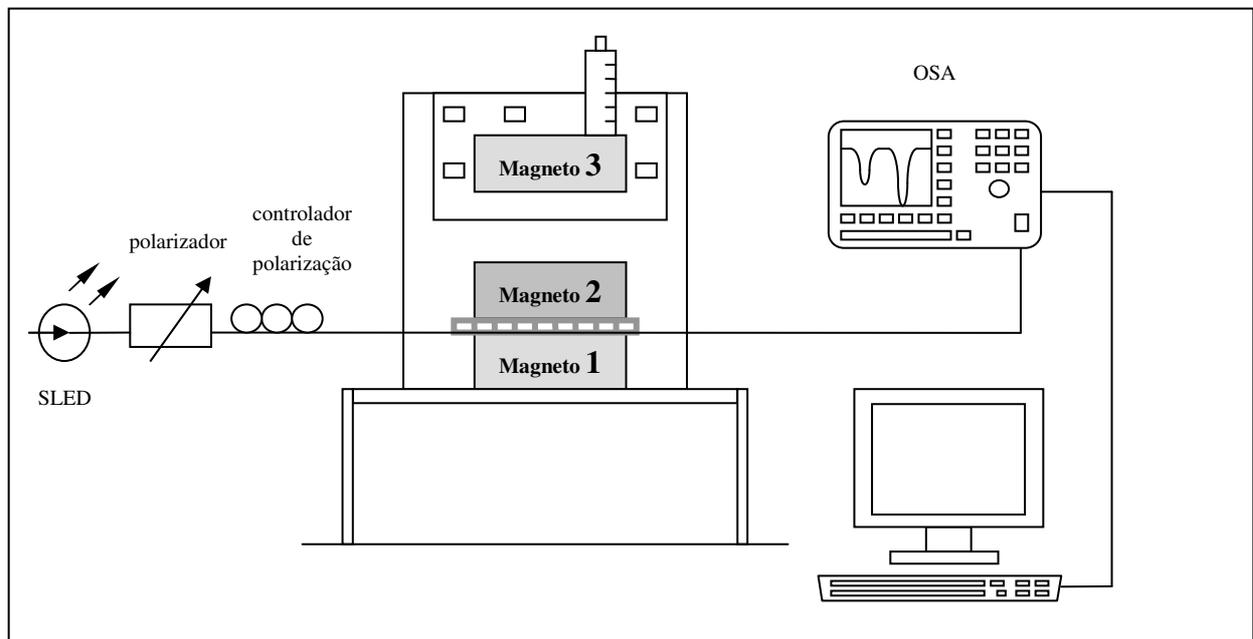


Figura 12: Arranjo experimental para LPG induzida mecanicamente através da pressão exercida por forças magnéticas (CAUSADO-BUELVAS, GOMEZ-CARDONA e TORRES, 2008).

Uma técnica que fragiliza bastante a integridade do sensor é a corrosão da casca com ácido fluorídrico em espaçamentos periódicos da ordem de centenas de micrometros. Isso é conseguido recobrando a fibra com finas camadas de metal, em forma de espiras circulares, de modo que somente as regiões da fibra expostas ao ácido sofrem corrosão reduzindo o seu diâmetro, conforme ilustra a Figura 13 (LIN e WANG, 1999).

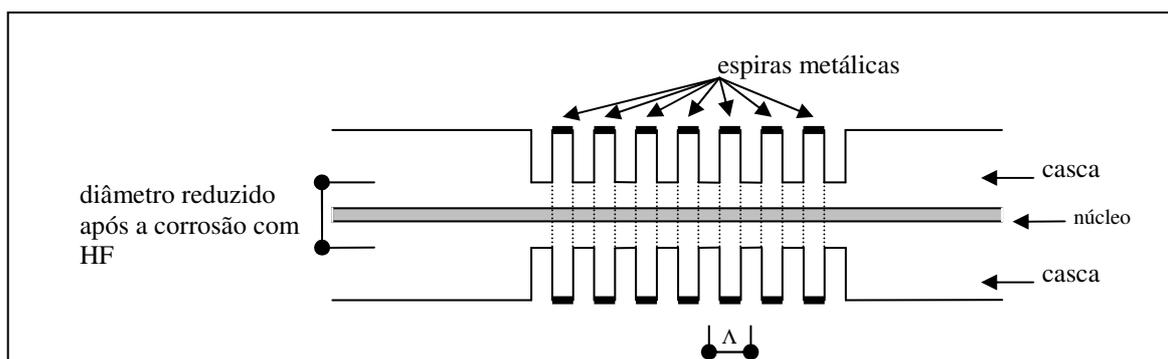


Figura 13: Corte longitudinal de uma LPG gravada através da corrosão periódica da casca da fibra óptica com HF (LIN E WANG, 1999).

2.7 AS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

De acordo com o que foi apresentado na seção 2.5 desse capítulo, mudanças no meio onde uma LPG está inserida alteram o índice de refração efetivo dos modos de casca que foram acoplados e provocam modificações no espectro de transmissão desse transdutor. As modificações do espectro de transmissão, que podem envolver tanto deslocamentos em comprimento de onda quanto alterações na transmitância da rede e alterações na largura de banda, podem ser resultado de efeitos simultâneos que agem sobre a LPG provocando sensibilidades cruzadas. Tais efeitos podem ser curvaturas juntamente com variações de temperatura (SUN, CHAN, TAN *et al*, 2007), curvaturas e sucessivas alterações do plano de curvatura, variações de temperatura e ao mesmo tempo tensões longitudinais (SUN, CHAN, DONG *et al*, 2007) e outras combinações de grandezas físico-químicas que possam ser alteradas. Para proporcionar uma correta interpretação da resposta espectral de uma LPG a análise direta dos espectros é complicada, já que eles podem representar alterações de mais de uma grandeza físico-química à qual a rede está exposta. Existe uma técnica, ainda incipiente na área de sensores com redes em fibras ópticas, que busca associar as alterações do espectro das redes com um modelo matemático. Esse modelo matemático é denominado de rede neural artificial (RNA) (SUN, CHAN, TAN *et al*, 2007; SUN, CHAN, DONG *et al*, 2007; POSSETTI, CORADIN, CÔCCO *et al*, 2008a; POSSETTI, CORADIN, CÔCCO *et al*, 2008b).

A rede neural artificial é construída com a finalidade de simular o processamento de informações no cérebro biológico, já que esse é capaz de aprender e de realizar complexas funções. As RNA são compostas por camadas de neurônios, que são unidades de armazenamento e de transformação de informações. Tal como em um cérebro biológico, os neurônios de uma RNA se unem por meio de conexões sinápticas. A idéia de tais estruturas matemáticas é a de desenvolver

automaticamente modelos implícitos que sejam capazes de programar padrões de associação. Uma RNA pode ser utilizada em procedimentos de classificação, agrupamentos e/ou correlações. As funções de tal modelo matemático o habilitam a relacionar variáveis de entrada e de saída de um sistema, independentemente da linearidade envolvida em tais associações (HAYKIN, 1999). As variáveis de entrada podem ser, por exemplo, as posições em comprimento de onda dos vales de atenuação de distintas bandas de uma LPG e, as variáveis de saída, por exemplo, a identificação de diferentes curvaturas e direções do plano de curvatura impostas a esse sensor ótico.

Assim como um cérebro biológico tem uma fase de aprendizado, também uma RNA tem uma etapa de treinamento na qual ela deve ser alimentada com dados. De acordo com a sua arquitetura e forma existem distintos tipos de RNA. Cada conexão da rede tem um peso que é ajustado durante o processo de aprendizado. Uma vez construída uma RNA a sua utilização fica restrita ao tipo de problema para o qual ela foi elaborada. O que define esse modelo matemático é o seu número de camadas, número de neurônios em cada camada, tipo de conexão entre os neurônios e a sua topologia (CHAN, JIN, RAD *et al*, 1998; HAYKIN, 1999).

A Figura 14 ilustra uma das arquiteturas mais comuns que é a Perceptron Multicamadas (MLP). Observa-se que ela é composta por um grupo de neurônios, ou nós, interconectados e distribuídos em camadas, quais sejam (i) uma camada de entrada, (ii) uma camada de saída e (iii) M camadas intermediárias ou ocultas (CHAN, JIN, RAD *et al*, 1998). Cada conexão, ou sinapse, tem um peso (w_{ij} , com $i = 1, 2, \dots, N_j$ e com $j = 1, 2, \dots, M$). Para se propagar ao longo da MLP, o sinal de entrada apresentado para um determinado nó é, anteriormente, multiplicado por seu respectivo peso. Os nós da primeira camada recebem o sinal de entrada (x), advindo do ambiente externo. Cada sinapse multiplica o sinal pelo seu peso e o propaga para a segunda camada, que é a camada oculta. Cada nó da camada oculta processa os valores a ela apresentados por meio de uma função de ativação ou de transferência (ϕ_{ij} , com $i = 1, 2, \dots, N_j$ e com $j = 1, 2, \dots, M$), como, por exemplo, a função tangente hiperbólica. A camada de saída, por sua vez, efetua uma combinação linear de todas as mudanças sofridas pelo sinal de entrada ao longo da estrutura matemática, gerando um sinal de saída (y). Termos de polarização (b_0 ou b_{ij} , com $i = 1, 2, \dots, N_j$ e com $j = 1, 2, \dots, M$) podem ser aplicados aos nós para aumentar ou diminuir o valor resultante de cada função de transferência. A boa eficiência de uma MLP em uma determinada aplicação depende fundamentalmente da escolha correta do número de neurônios da camada oculta (M), além do número de neurônios em cada camada (N_i , com $i = 1, 2, \dots, M$) (HAYKIN, 1999).

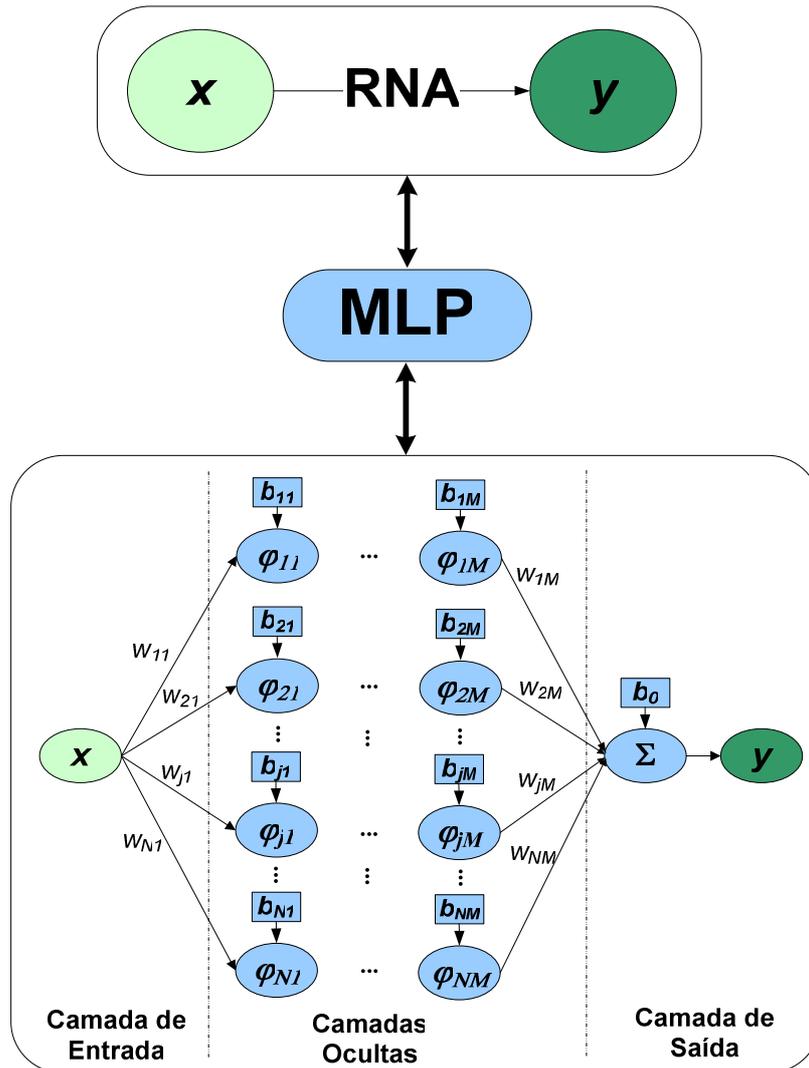


Figura 24 - Diagrama esquemático de uma RNA: Perceptron Multicamadas (MLP).

Uma das mais valiosas características de uma RNA é a capacidade de aprender por meio de exemplos e fazer deduções sobre o que aprendeu, otimizando gradativamente o seu desempenho. Isso é possível porque as redes neurais empregam um algoritmo de aprendizagem cuja tarefa é ajustar os parâmetros de sua topologia, que são os pesos das sinapses bem como as polarizações aplicadas aos nós. O processo de aprendizagem da RNA pode ser supervisionado ou não-supervisionado. No processo supervisionado alguns conjuntos de padrões de entrada, juntamente com os padrões de saída esperados, são apresentados à rede neural por um agente externo (professor). O professor deverá indicar explicitamente se a resposta calculada pela rede é satisfatória ou não, comparando a resposta fornecida pela rede com a resposta esperada. Por essa razão é preciso ter informações preliminares a respeito da saída que é esperada através da RNA. Os erros ou discrepâncias detectadas são informados à RNA a fim de que sejam realizados ajustes para

diminuir os erros das próximas respostas. Essa tarefa é desempenhada de maneira eficaz pelo algoritmo de retro-propagação do erro, também denominado de “*backpropagation*” (PATTERSON, 1996; HAYKIN, 1999).

A aprendizagem da RNA requer que sejam feitas modificações nas sinapses dos neurônios. Tais modificações ocorrem de acordo com a ativação de tais neurônios. As conexões mais utilizadas são reforçadas e as menos utilizadas são enfraquecidas, através da atribuição de maiores ou menores pesos sinápticos. Por essa razão a escolha adequada dos parâmetros da arquitetura de uma rede neural necessita de tempo para que a mesma possa ser treinada. Mas uma vez concluído o processo de treinamento, a implementação do modelo matemático é simples e o seu processamento de dados é rápido.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 O PROCESSO DE GRAVAÇÃO DE LPG COM RADIAÇÃO UV

Os experimentos de gravação das LPGs com radiação UV ocorreram no Laboratório de Laser da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A técnica proposta foi a de utilizar um sistema de gravação ponto-a-ponto com a emissão de radiação UV de um laser (*New Wave, Tempest-20 Nd: YAG*), operando em 266 nm, através de dois cristais dobradores de frequência. A taxa de repetição máxima desse laser é de 20 pulsos/s. O processo de gravação das LPG com radiação UV, passou por vários ensaios, tentativas, erros e acertos na escolha dos equipamentos e materiais utilizados, parâmetros adequados para gravação, bem como na escolha dos tipos de fibra que se adaptassem aos parâmetros escolhidos.

3.1.1 O Sistema de Gravação e Leitura das LPGs

O sistema de gravação consiste na técnica de incidência lateral de radiação UV ponto-a-ponto ao longo do comprimento da fibra ótica. A Figura 15 apresenta um diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação utilizado no laboratório. De acordo com o sistema apresentado na Figura 15, uma lente convergente de distância focal de 60 cm focaliza o feixe de UV diretamente sobre a fibra. Decorrido o tempo de incidência no primeiro ponto, um temporizador programável (*Newport Model 845, Digital Shutter Controller*) obstrui o feixe de UV e um estágio de translação movido por motor de precisão (*Newport UTMCC.5HA, Motorized Translation Stage*), controlado por computador, com resolução de $1,77 \cdot 10^{-2} \mu\text{m}$ e “backlash” (assimetria no recuo do estágio de translação) de $1,84 \mu\text{m}$, desloca o espelho E_2 por uma distância igual ao período da rede. Uma vez reposicionado o espelho E_2 , aciona-se manualmente o temporizador para liberar o feixe de UV que deverá incidir no ponto seguinte, pelo tempo programado, até obstruir novamente o feixe. Assim o processo é repetido até que todos os pontos da rede estejam gravados.

Para a escolha da lente que faz o feixe de UV convergir sobre a fibra, foi feito o cálculo apresentado na Equação 51, que fornece o valor do diâmetro do feixe, ou “spot size”, que deve incidir sobre a fibra, conforme ilustra a Figura 16.

$$d = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} = \frac{4 \cdot 266 \cdot 10^{-9}}{\pi} \cdot \frac{600 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} \cong 203 \mu\text{m} \quad (51)$$

Na Equação 51, o resultado $d \cong 203 \mu\text{m}$ é o diâmetro do feixe que deve incidir sobre a fibra, $\lambda = 266 \text{ nm}$ é o comprimento de onda de operação do laser, $f = 60 \text{ cm}$ é a distância focal da lente e $D = 1 \text{ mm}$ é o diâmetro do feixe do laser após ultrapassar a íris e antes de incidir na lente. Com o intuito de gravar redes com período de $407 \mu\text{m}$, escolheu-se a lente de distância focal de 60 cm pelo fato dessa oferecer um “spot size”, ou diâmetro de feixe convergente, com aproximadamente a metade do período da rede (CHERN e WANG, 1999).

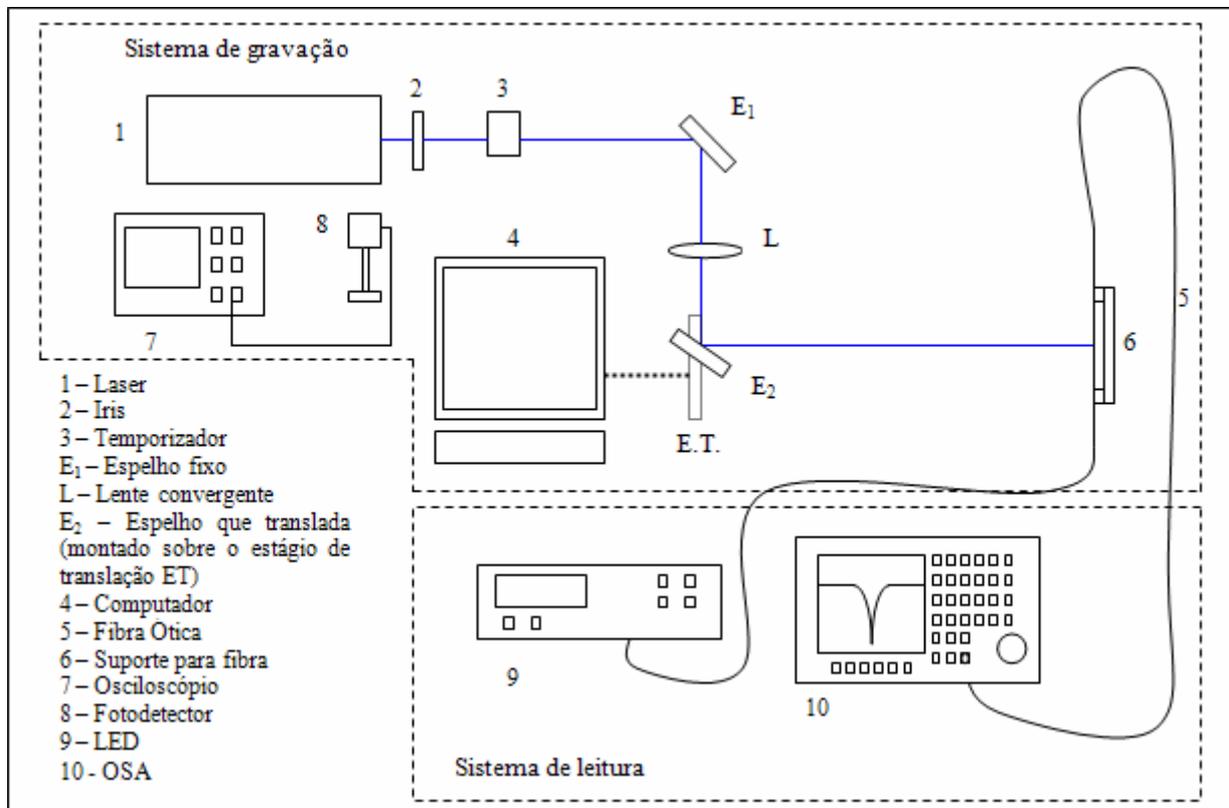


Figura 15: Diagrama esquemático do sistema de gravação ponto-a-ponto com laser UV e leitura de LPG

A distância da lente convergente até o ponto da fibra onde é feita a gravação da LPG é de aproximadamente 60 cm . Nesse processo de gravação, o período da LPG pode ser mudado alterando-se o passo do estágio de translação (ET), movido por motor de precisão (*Newport UTMCC.5HA, Motorized Translation Stage*), sobre o qual fica montado o espelho E₂, que é controlado pelo computador.

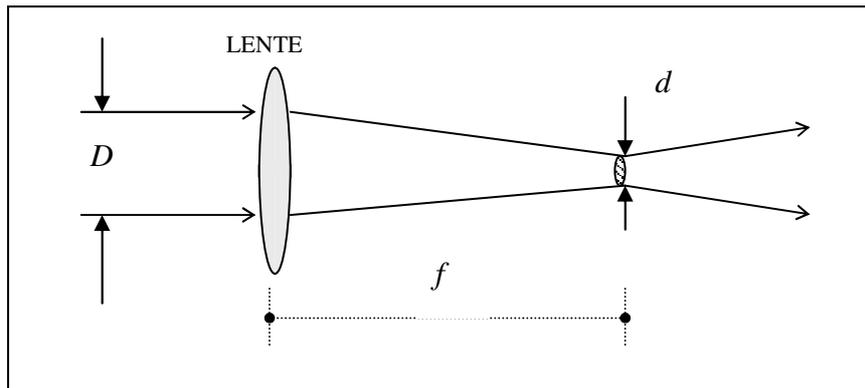


Figura 16: Ilustração da convergência do feixe de UV após passar pela lente.

A Figura 17 apresenta uma fotografia do sistema de gravação das LPGs montado sobre a bancada do Laboratório de Laser. A linha traçada em verde representa o trajeto do feixe de radiação UV desde a fonte óptica laser até o suporte de gravação das redes.

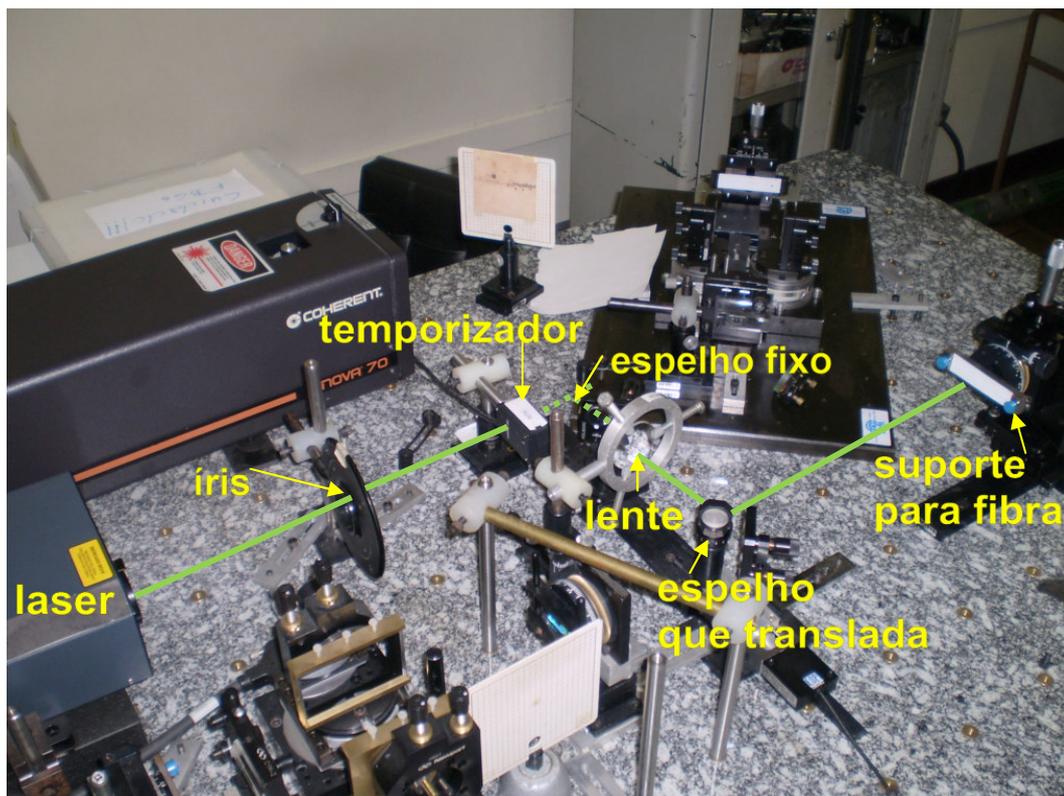


Figura 17: Fotografia do sistema de gravação de LPGs do Laboratório de Laser.

Do sistema de gravação também fazem parte o osciloscópio (*Tektronix TDS220, Digital Real-Time Oscilloscope*) e o fotodetector (*Newport 818E Series, Energy Detector*) ligado a ele. Antes de iniciar a gravação das redes, sempre foi preciso aguardar para que a fluência do laser

atingisse a estabilidade. Sendo assim, o fotodetector, acoplado ao osciloscópio, era utilizado para fazer o controle dessa fluência. Inclusive esse controle era feito durante a gravação, nos intervalos entre os diferentes pontos de incidência, nos momentos em que o feixe de UV era obstruído pelo temporizador programável. O fotodetector sempre foi posicionado entre a íris e o temporizador para fazer o controle da fluência do laser durante a gravação das redes. Mas essas leituras foram posteriormente corrigidas, descontando-se 18,58 % dos seus valores, a fim de determinar-se a fluência do feixe no exato local onde ficava o suporte de fixação das fibras. Essa providência foi necessária tendo-se em vista as porcentagens de perdas, devidas à reflexão nos espelhos, E_1 e E_2 , e à refração na lente L, que foram determinadas. Tais perdas foram confirmadas por quatro conjuntos de medições que estão apresentados na Tabela 1. Em cada conjunto, determinou-se a fluência média com o fotodetector posicionado entre a íris e o temporizador e, na sequência, com o fotodetector posicionado em frente ao suporte de fixação das fibras.

Tabela 1: Medidas de tensão pico a pico, registradas no osciloscópio, com o fotodetector posicionado entre a íris e o temporizador e diante do suporte de fixação das fibras para gravação.

	tensão pico a pico 1 (mV) (fotodetector posicionado entre a íris e o temporizador)	tensão pico a pico 2 (mV) (fotodetector posicionado diante do suporte de gravação)	porcentagem média de perdas (%)
1º grupo de medidas	2,24	1,84	18,58
	2,32	1,76	
	2,16	1,92	
	2,40	1,84	
2º grupo de medidas	2,00	1,92	
	2,16	1,68	
	2,08	1,76	
	2,24	1,84	
	2,32	2,00	
3º grupo de medidas	2,32	2,00	
	2,40	1,92	
	2,24	1,76	
4º grupo de medidas	2,16	1,68	
	2,48	2,00	
	2,40	1,76	
	2,16	1,84	
	2,24	1,68	
média	2,32	1,92	
	2,26	1,84	

Do sistema de leitura fazem parte um LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), operando na faixa de 1445 nm a 1645 nm e um analisador de espectros óticos (*OSA – Optical Spectrum Analyser, Anritsu, MS9710B*) operando com uma resolução de 1 nm e estabilidade de comprimento de onda de ± 5 pm. O LED (*Superlum, Pilot-2*) era utilizado como fonte de luz a ser transmitida na fibra. O extremo final da fibra era conectado ao OSA. Antes de iniciar cada gravação, era salvo em um disquete inserido no OSA o espectro do sinal do LED. Existe um comando no OSA que permite fazer a razão entre o sinal da rede e o sinal do LED. Naturalmente, com nenhum ponto gravado na fibra, o sinal dessa razão de espectros era basicamente uma linha horizontal com ruídos nas extremidades que saíam fora da região espectral do LED. À medida que os pontos iam sendo gravados esse espectro da razão de sinais ia gradativamente se modificando. Com cerca de dez pontos inscritos, já era possível visualizar um vale de atenuação se pronunciando em algumas das redes. A observação da razão, entre o sinal do espectro de transmissão da rede e o sinal do espectro do LED, em tempo real no OSA, permitiu acompanhar visualmente o processo de crescimento das LPGs.

3.1.2 Procedimentos Experimentais para a Gravação das LPGs

Primeiramente foi preciso identificar os valores da fluência do laser que seriam utilizados na gravação. O osciloscópio conectado ao fotodetector, que era colocado diante do feixe de UV, entre a íris e o temporizador, registrava valores de médias de tensões pico a pico em *mV* (*millivolts*). Por isso foi preciso converter esses valores de tensão, registrados pelo osciloscópio, em valores de energia. De acordo com o manual do fabricante do fotodetector (*Newport 818E Series, Energy Detector*), é preciso dividir a tensão registrada em *mV* por 16,8 V/J. Dessa maneira é obtido um valor em *joule* que depois deve ser multiplicado por um *fator de correção* igual a 0,62, de acordo com o mesmo manual. O resultado desse cálculo fornece a energia, em *joules*, por pulso de laser. Esse valor de energia é dividido pela área circular do “*spot*”, dada em centímetros quadrados, para obter-se então a fluência da energia em mJ/cm^2 . Um dos cálculos efetuados, utilizado para obter a fluência do laser fornecida para uma tensão média de 3 mV, registrada no osciloscópio, está apresentado a seguir:

$$E = \frac{3mV}{16,8V/J} = \frac{3 \cdot 10^{-3}V}{16,8V/J} = 0,17857 \cdot 10^{-3} J \times 0,62 = 110,7142 \cdot 10^{-6} J \text{ (por pulso)}$$

$$\frac{Energia}{Área} = \frac{0,1107142mJ}{\pi \cdot \left(\frac{203 \cdot 10^{-4}}{2}\right)^2} = \frac{3,4224 \cdot 10^{-6}}{10^{-8}} \cong 342,24mJ / cm^2 \text{ (por pulso)}$$

Da mesma maneira procedeu-se para o cálculo das demais fluências que foram utilizadas. Foi feito um desconto de 18,58%, devido às perdas por reflexão nos espelhos E₁ e E₂ e por refração na lente L, em conformidade com as medidas da Tabela 1, nos resultados calculados para essas fluências. Dessa maneira foram determinados os valores da fluência no exato local onde era posicionado o suporte de gravação das redes.

A fim de ser feita uma estimativa das flutuações na fluência, foram feitas duas aquisições temporais com o auxílio do fotodetector (*Newport 818E Series*), de um amplificador “*lock-in*” (*Model SR830DSP, Stanford Research Systems*) e de um computador. O esquema de montagem para a aquisição temporal está representado na Figura 18. Foram feitas duas amostragens de 300 segundos cada uma, em duas fluências diferentes. Esse tempo de amostragem excedeu em 100 segundos o tempo de exposição do feixe de UV em cada um dos pontos das redes, que era de 200 segundos, para assegurar uma maior confiabilidade nas estimativas dos erros. O fotodetector foi posicionado diante do feixe de UV, logo após a íris com abertura de 1 mm de diâmetro, e conectado ao amplificador “*lock-in*”. O amplificador “*lock-in*” estava conectado à fonte do laser através de um “*trigger*”. As medidas das amostragens foram acompanhadas em tempo real, na tela do computador, e salvas posteriormente em um disquete inserido no mesmo. As Figuras 19 e 20 apresentam os resultados das duas amostragens, bem como a média das medidas de tensão que foram registradas e o desvio padrão. Através dos desvios dessas medidas, estimou-se um erro de ± 11 % nos valores medidos com o auxílio do fotodetector. Dessa maneira, foi feita a estimativa dos erros nas diversas fluências, utilizadas na gravação das redes, que estão apresentadas na Tabela 2.

Cada ponto das LPGs recebeu um total de 4000 pulsos do laser. Como foi utilizada a frequência máxima de operação do laser que é igual a 20 pulsos por segundo, o tempo de exposição em cada ponto foi de 200 segundos.

Foram gravadas 20 (vinte) LPGs, com o sistema de gravação e leitura esquematizado na Figura 15, que faz uso da técnica ponto-a-ponto com a incidência de radiação UV. Treze redes foram gravadas em fibras fotossensíveis identificadas pelo nome “*Centaurus*” e sete redes em fibras fotossensíveis “*Nufern GFI*”. Na LPG12, LPG13, LPG14, LPG15, LPG16, LPG17, LPG19 e LPG20 foi feita a demarcação da face da fibra exposta ao laser, com o auxílio de setas de papel colorido coladas com éster de cianoacrilato, ou seja, o plano de gravação foi marcado, objetivando o uso dessas redes em futuros ensaios de curvatura.

Antes de colocar cada fibra no suporte de gravação, retirava-se a capa da mesma deixando a casca exposta por cerca de 2,5 cm a 3 cm. A fibra então era presa no suporte de gravação metálico com o auxílio de ímãs. Não foi utilizada nenhuma massa suspensa para tracionar as fibras durante a gravação. Ao iniciar-se a exposição no primeiro ponto, observava-se que a radiação UV sofria uma difração ao atingir a fibra. A figura gerada pela difração auxiliava na centralização da fibra em relação ao feixe de UV. Após terminar a exposição no primeiro ponto, o motor de precisão, controlado por computador, movia o espelho E_2 por uma distância igual ao período das redes e uma nova exposição era feita. Esse procedimento era repetido até que a exposição de todos os pontos terminasse.

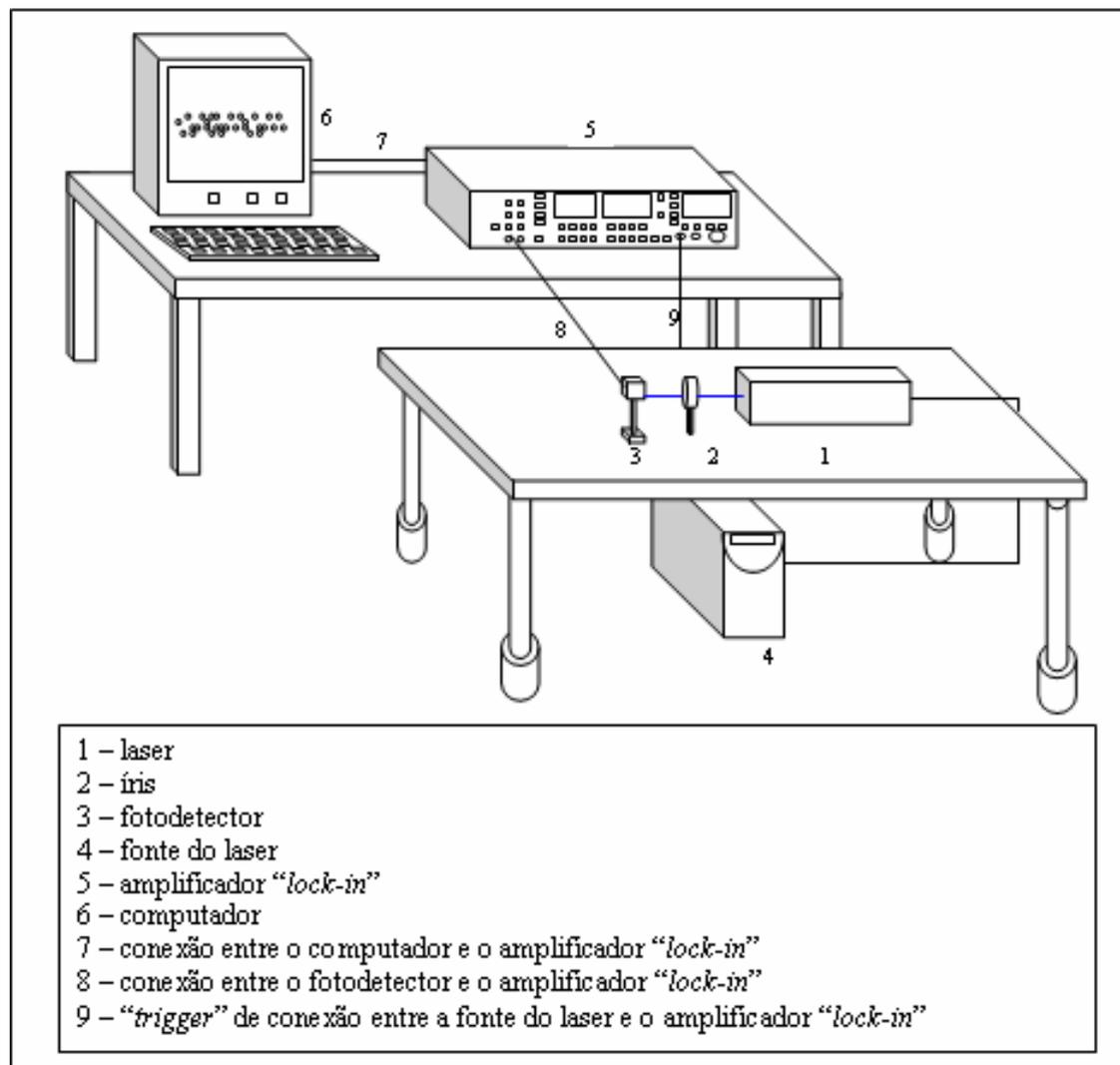


Figura 18: Esquema de montagem para a aquisição temporal da fluência do laser.

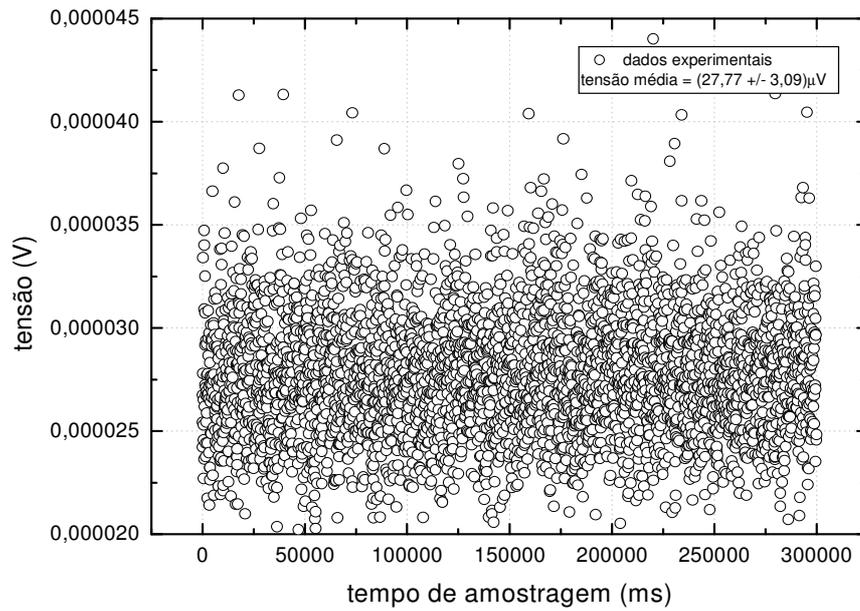


Figura 19: Primeira aquisição temporal do fotodetector com auxílio do amplificador “lock-in”.

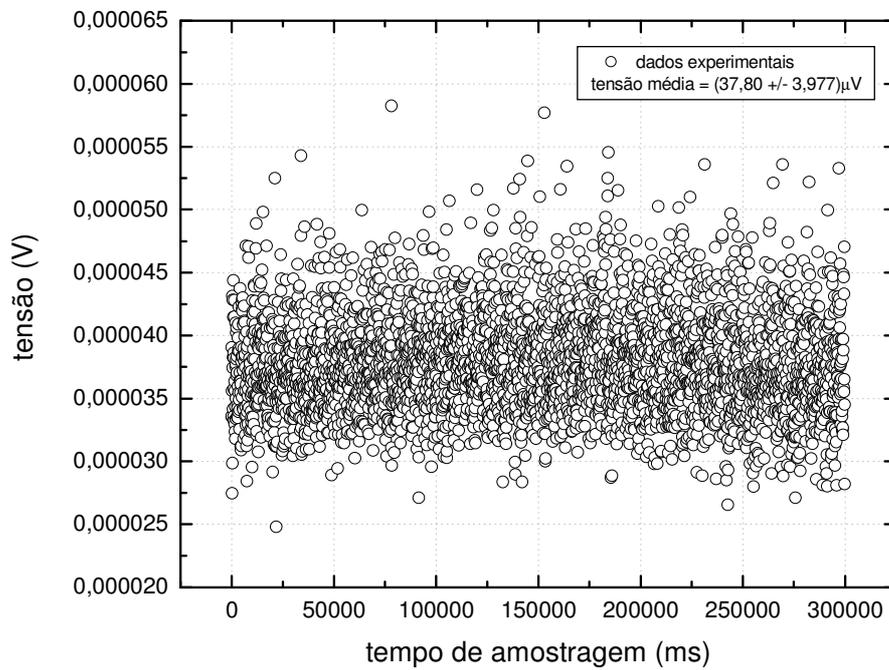


Figura 20: Segunda aquisição temporal do fotodetector com auxílio do amplificador “lock-in”.

O controle da centralização da fibra em relação do feixe de UV era feito ao longo de toda a gravação. O controle da fluência do laser, como já foi dito anteriormente, era feito durante a gravação, nos intervalos entre os diferentes pontos de incidência, nos momentos em que o feixe de laser era obstruído pelo temporizador programado. O tempo de exposição em todos os pontos de todas as redes foi de 200 segundos. Na maioria das redes os espectros foram salvos a cada cinco pontos que eram gravados nas mesmas. O período de duas das vinte redes (LPG13 e LPG14) foi de 400 μm e o das demais foi de 407 μm . Devido ao limite do avanço do estágio de translação, o valor determinado para o período das redes possibilitou a gravação de um número máximo de 60 pontos.

Tabela 2: Parâmetros das LPGs gravadas.

rede	fibra ótica utilizada	nº de pontos	nº de pulsos por ponto	comprimento da rede (cm)	fluência do laser estimada sobre a rede (mJ/cm^2)	período (μm)
LPG1	“Centaurus”	45	4000	1,83	$278,65 \pm 30,65$	407
LPG2	“Centaurus”	45	4000	1,83	$243,71 \pm 26,81$	407
LPG3	“Centaurus”	45	4000	1,83	$209,82 \pm 23,08$	407
LPG4	“Centaurus”	45	4000	1,83	$185,68 \pm 20,42$	407
LPG5	“Centaurus”	45	4000	1,83	$137,40 \pm 15,11$	407
LPG6	“Centaurus”	45	4000	1,83	$233,95 \pm 25,73$	407
LPG7	“Centaurus”	45	4000	1,83	$274,80 \pm 30,23$	407
LPG8	“Centaurus”	45	4000	1,83	$252,49 \pm 27,77$	407
LPG9	“Centaurus”	45	4000	1,83	$234,42 \pm 25,79$	407
LPG10	“Centaurus”	45	4000	1,83	$207,03 \pm 22,77$	407
LPG11	“Centaurus”	35	4000	1,42	$185,68 \pm 20,42$	407
LPG12	“Centaurus”	45	4000	1,83	$207,96 \pm 22,88$	407
LPG13	“Nufern”	36	4000	1,44	$285,07 \pm 31,36$	400
LPG14	“Nufern”	58	4000	2,32	$291,90 \pm 32,11$	400
LPG15	“Nufern”	60	4000	2,44	$301,03 \pm 33,11$	407
LPG16	“Nufern”	60	4000	2,44	$296,47 \pm 32,61$	407
LPG17	“Nufern”	56	4000	2,28	$319,27 \pm 35,12$	407
LPG18	“Centaurus”	40	4000	1,63	$376,29 \pm 41,39$	407
LPG19	“Nufern”	60	4000	2,44	$410,50 \pm 45,16$	407
LPG20	“Nufern”	60	4000	2,44	$410,50 \pm 45,16$	407

As fluências empregadas nas gravações das fibras “Centaurus” foram em média 27 % menores do que as fluências empregadas nas gravações das fibras “Nufern”. Utilizando fluências mais baixas do que $137,40 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, que aparece na Tabela 2, não foi possível realizar gravações. A fluência que se conseguiu obter mais próxima do mínimo valor que aparece na Tabela 2, com a qual se tentou gravar uma LPG sem sucesso, foi de $107,69 \text{ mJ}/\text{cm}^2$. Nas tentativas de gravar redes

com fluências maiores do que $410,50 \text{ mJ/cm}^2$, valor máximo que aparece na Tabela 2, ora o espectro ficava ruidoso sem definição de vales de atenuação ou ora a fibra acabava rompendo-se no próprio suporte de gravação. Com a fluência de $278,52 \text{ mJ/cm}^2$ tentou-se gravar sem sucesso uma rede por cima da capa de uma fibra “*Centaurus*”.

Sempre foram utilizadas fibras fotossensíveis, “*Centaurus*” ou “*Nufern GFI*”, hidrogenadas a 130 atmosferas, em temperatura ambiente, por um tempo superior a vinte dias. Com outros tipos de fibras disponíveis no laboratório, tais como a “*SMF*”, a altamente dopada com germânio ou outras, não foi possível observar o aparecimento de redes. Em fibras não hidrogenadas, pelo menos com os parâmetros escolhidos, não foi possível obter LPGs. A Tabela 3 apresenta quais foram as fibras retiradas da câmara de hidrogênio um dia antes ou no mesmo dia da gravação. Foi feito o registro da temperatura no início e no final da gravação da LPG10 e da LPG11 porque foi realizado um monitoramento contínuo e prolongado (por 595 horas e 500 horas) da evolução espectral dessas redes após o encerramento da fotoinscrição.

Tabela 3: Especificações a respeito das redes gravadas.

rede	fibra utilizada	gravação realizada no dia da retirada da câmara de hidrogenação	gravação realizada um dia depois da retirada da câmara de hidrogenação	temperatura ao início da gravação (°C)	temperatura ao final da gravação (°C)
LPG1	“ <i>Centaurus</i> ”		X		
LPG2	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG3	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG4	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG5	“ <i>Centaurus</i> ”		X		
LPG6	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG7	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG8	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG9	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG10	“ <i>Centaurus</i> ”	X		19,50	20,00
LPG11	“ <i>Centaurus</i> ”	X		21,00	21,25
LPG12	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG13	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG14	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG15	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG16	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG17	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG18	“ <i>Centaurus</i> ”	X			
LPG19	“ <i>Nufern</i> ”	X			
LPG20	“ <i>Nufern</i> ”	X			

3.2 A CINÉTICA DAS REDES DE PERÍODO LONGO GRAVADAS COM RADIAÇÃO UV

As redes LPG4, LPG7, LPG9, LPG10, LPG11, LPG13, LPG14 e LPG15 tiveram os seus espectros monitorados imediatamente após o encerramento da inscrição UV. Mudanças espectrais foram registradas durante 1 hora, 2 horas, 76 horas, 595 horas e 500 horas para as redes LPG4, LPG7, LPG9, LPG10 e LPG11, respectivamente, que foram gravadas em fibras “*Centaurus*”.

Na fibra “*Nufern*” mudanças espectrais foram registradas após 23 e 412 horas, 3 horas e 1,33 horas do encerramento da gravação da LPG13, LPG14 e LPG15, respectivamente. Para proceder ao acompanhamento da LPG4, LPG7, LPG14 e LPG15 essas ficaram presas no próprio suporte de gravação durante todo o experimento. As redes LPG9, LPG10 e LPG11 foram bem fixadas com fita isolante em um suporte rígido de vidro, conforme indica o esquema da Figura 21, para proceder aos seus acompanhamentos. Com a fixação no suporte de vidro, foi possível evitar que influências devidas a curvaturas, alterassem o espectro de transmissão das redes. A LPG13 ficou presa no próprio suporte de gravação durante 23,5 horas, até que o seu espectro foi registrado, e depois foi instalada no suporte rígido de vidro no qual, após 412 horas do encerramento da sua gravação, houve mais um registro do seu espectro.

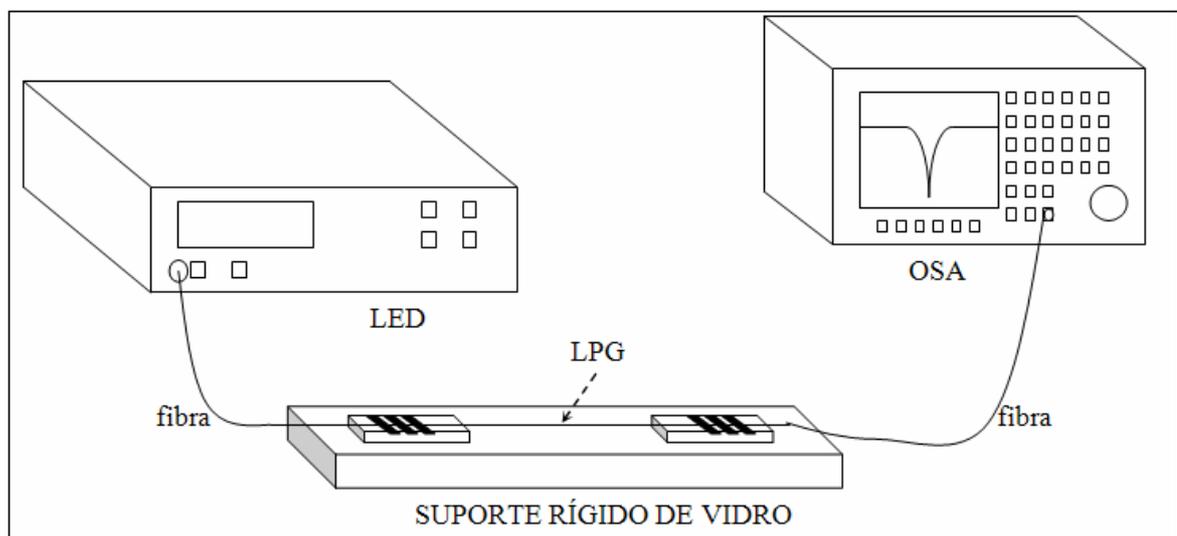


Figura 21: Esquema de como as redes LPG 9, LPG10, LPG11 e LPG13 ficaram fixadas durante os períodos de monitoramento dos seus espectros.

As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam o controle da temperatura do laboratório durante o acompanhamento dos espectros das redes LPG9, LPG10 e LPG11, respectivamente. No acompanhamento da LPG4, LPG7, LPG13, LPG14 e LPG15 as temperaturas não foram

registradas. Na LPG9 a temperatura só foi coletada durante a gravação de dois espectros. A LPG9 foi a única rede na qual não foi feito o acompanhamento do vale de maior atenuação, mas de um vale situado numa posição espectral de menor comprimento de onda e com menor atenuação, porque o vale de maior eficiência havia se deslocado para fora da região espectral do LED não ficando visível durante as horas do acompanhamento.

Na etapa de tratamento de dados da LPG9, foi feito o levantamento da largura de banda, atenuação em dB, e posição do vale de menor eficiência, que era o que podia ser visualizado na tela do OSA, durante todos os tempos especificados na Tabela 4.

Nas redes LPG10 e LPG11 fez-se a monitoração do vale de maior atenuação e a temperatura foi medida em todos os horários nos quais os espectros foram salvos. As Tabelas 5 e 6 apresentam as temperaturas do ambiente que foram medidas durante o acompanhamento dessas duas redes.

No acompanhamento da LPG10, notificou-se uma temperatura mínima de 14,00 °C (260 horas após o término da gravação) e uma máxima de 26,50 °C (501 horas após o término da gravação). Na LPG11, notificou-se uma temperatura mínima de 14,50 °C (210 horas após o término da gravação) e uma máxima de 26,00 °C (428 horas após o término da gravação). Como as maiores variações de temperatura registradas foram de 12,50°C e de 11,50 °C, nos acompanhamentos da LPG10 e da LPG11 respectivamente, a influência de deformações mecânicas poderia ser mais crítica, devido às contrações e dilatações sofridas pela fibra. Mas como o coeficiente de expansão térmica da sílica fundida é muito baixo, da ordem de $10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, esse efeito pode ser desprezado. Porém existe uma contribuição do coeficiente termo-ótico, que é da ordem de $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, relativa à variação dos índices de refração efetivos com as variações de temperatura, consoante a Equação 42, que comprova que as alterações da temperatura do laboratório também provocaram deslocamentos espectrais.

Tabela 4: Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG9.

tempo após a inscrição com UV (h)	temperatura do laboratório (°C)
20	
21	
22	
35	
36	
44	18,00
68	
76	19,50

Tabela 5: Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG10.

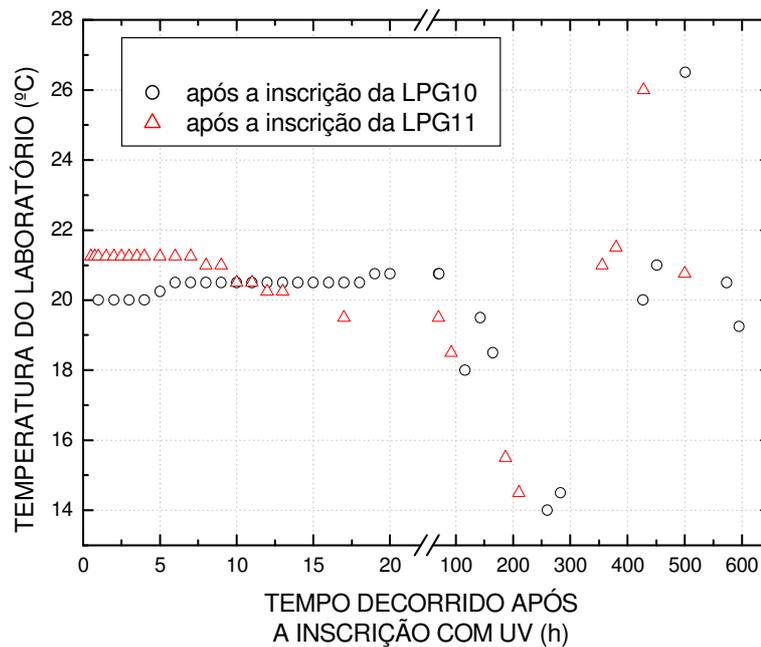
Tempo após a inscrição com UV (h)	Temperatura do laboratório (°C)
1	20,00
2	20,00
3	20,00
4	20,00
5	20,25
6	20,50
7	20,50
8	20,50
9	20,50
10	20,50
11	20,50
12	20,50
13	20,50
14	20,50
15	20,50
16	20,50
17	20,50
18	20,50
19	20,75
20	20,75
70	20,75
71	20,75
116	18,00
143	19,50
165	18,50
260	14,00
283	14,50
427	20,00
451	21,00
501	26,50
573	20,50
595	19,25

Na etapa de tratamento de dados da LPG10 e da LPG11, foi feito o levantamento da largura de banda, atenuação em dB e posição do vale de maior eficiência, durante todos os intervalos de tempo especificados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 6: Acompanhamento da temperatura no laboratório após a inscrição da LPG11

Tempo após a inscrição com UV (h)	Temperatura do laboratório (°C)
0,5	21,25
0,75	21,25
1	21,25
1,5	21,25
2	21,25
2,5	21,25
3	21,25
3,5	21,25
4	21,25
5	21,25
6	21,25
7	21,25
8	21,00
9	21,00
10	20,50
11	20,50
12	20,25
13	20,25
17	19,50
43	17,50
70	19,50
92	18,50
187	15,50
210	14,50
356	21,00
380	21,50
428	26,00
500	20,75

O gráfico apresentado na Figura 22 ilustra o acompanhamento da temperatura do laboratório, após a gravação das redes LPG10 e LPG11, que foi registrado nas Tabelas 5 e 6.



(v) A LPG3 foi submetida a um ciclo de aquecimento atingindo a temperatura de 1200°C em um forno de laboratório.

(vi) A LPG8 foi submetida a três ciclos de “*annealing*” (processo de recozimento seguido de resfriamento lento no interior do próprio forno) nos quais atingiu a temperatura máxima de 425°C.

(vii) As redes LPG5 e LPG6 foram submetidas a dois ciclos de “*quenching*” (processo de recozimento seguido de resfriamento brusco, no qual a rede é transferida diretamente do forno, em elevada temperatura, para a temperatura ambiente) após atingir a máxima temperatura de 425°C.

(viii) A LPG5, após os dois ciclos de “*quenching*”, foi submetida a um processo de aquecimento até 300°C, seguido de resfriamento programado até a temperatura ambiente, depois foi mantida por duas semanas em uma temperatura constante de 350°C e então submetida a mais dois processos de aquecimento até 300°C.

(ix) A rede LPG12 foi submetida à mudanças do estado de polarização da luz de interrogação.

(x) A LPG20 foi submetida a ensaios de curvatura em diferentes planos.

3.3.1 A Caracterização das LPGs quanto ao Índice de Refração

Para proceder a caracterização das redes quanto ao índice de refração do meio externo, foram utilizados os equipamentos apresentados no esquema da Figura 23. Sabendo-se que as redes são sensíveis a variações de temperatura, tensões longitudinais e curvaturas (BHATIA, 1996), foram tomadas precauções para que esses parâmetros fossem mantidos constantes durante as caracterizações. As fibras que continham as redes gravadas sempre foram bem fixadas com fita isolante em um suporte rígido de vidro. Durante a realização das medidas era mantido ligado o aparelho de ar condicionado do laboratório e as temperaturas das substâncias utilizadas, bem como do ambiente, eram medidas com um termômetro químico de mercúrio (*Incoterm 169351/03*) com resolução de $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Antes mesmo de ligar a fonte de luz LED superluminescente e o analisador de espectros óticos (*OSA, Anritsu MS9710B*), operando com resolução de 1 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 5 pm, que foi utilizado para monitorar e gravar em disquete as posições espectrais dos vales de atenuação das LPGs, algumas providências foram tomadas. Essas providências foram:

(i) A limpeza dos beakers onde as amostras dos fluidos seriam inseridas com detergente lava-louça, com posterior enxágue em água e secagem com papel toalha.

(ii) A inserção, nos beakers limpos, de pequenas amostras dos seguintes fluidos: água destilada, álcool etanol, tiner, aguarrás e querosene. Para todas as redes sempre foram utilizadas as mesmas substâncias.

(iii) O controle da temperatura das substâncias utilizadas com um termômetro químico de mercúrio (*Incoterm 169351/03*) com resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

(iv) A limpeza de uma seringa de vidro, que seria utilizada para depositar pequenas porções dos fluidos sobre as redes, com detergente lava-louça, com posterior enxágue em água e secagem com papel toalha.

Após ser feita essa primeira organização, procedia-se a instalação da fibra que continha a LPG no suporte de vidro. Após a certificação da fixação da fibra, conectava-se um dos seus extremos ao LED e o outro ao OSA. A região da fibra que continha a LPG não ficava em contato direto com o vidro. Havia uma folga suficiente para se encaixar uma lâmina de vidro de tal forma que a mesma não se encostasse à fibra. Essa lâmina era posicionada antes dos fluidos serem depositados sobre a LPG com o auxílio da seringa.

Quando as amostras já se encontravam na mesma temperatura, de $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$, iniciava-se o procedimento experimental salvando o espectro da LPG imersa no ar. Depois os fluidos eram depositados sobre a LPG, com o auxílio da seringa, em uma quantidade apenas suficiente para cobrir a rede. O espectro com a rede imersa no fluido então era salvo. Em seguida a lâmina de vidro depositada sob a LPG era cuidadosamente retirada, lavada com água e detergente lava-louça, enxaguada e seca com papel toalha. O mesmo processo de lavagem acontecia com a seringa. Com o auxílio de um lenço de papel, que era aproximado muito suavemente da LPG, eram absorvidas pequenas gotículas do fluido que ainda poderiam estar em contato com a rede. A próxima amostra que era captada com a seringa servia para “enxaguar” a seringa internamente; por isso era descartada. A amostra captada após esse “enxágue” é que era depositada sobre a LPG para um novo espectro ser salvo. O depósito das amostras sobre a rede aconteceu na seguinte ordem: água, álcool, tiner, aguarrás e querosene. Nos intervalos entre os depósitos das diferentes amostras sobre a LPG, sempre era salvo o espectro da rede imersa no ar para assegurar a eficiência do processo de limpeza.

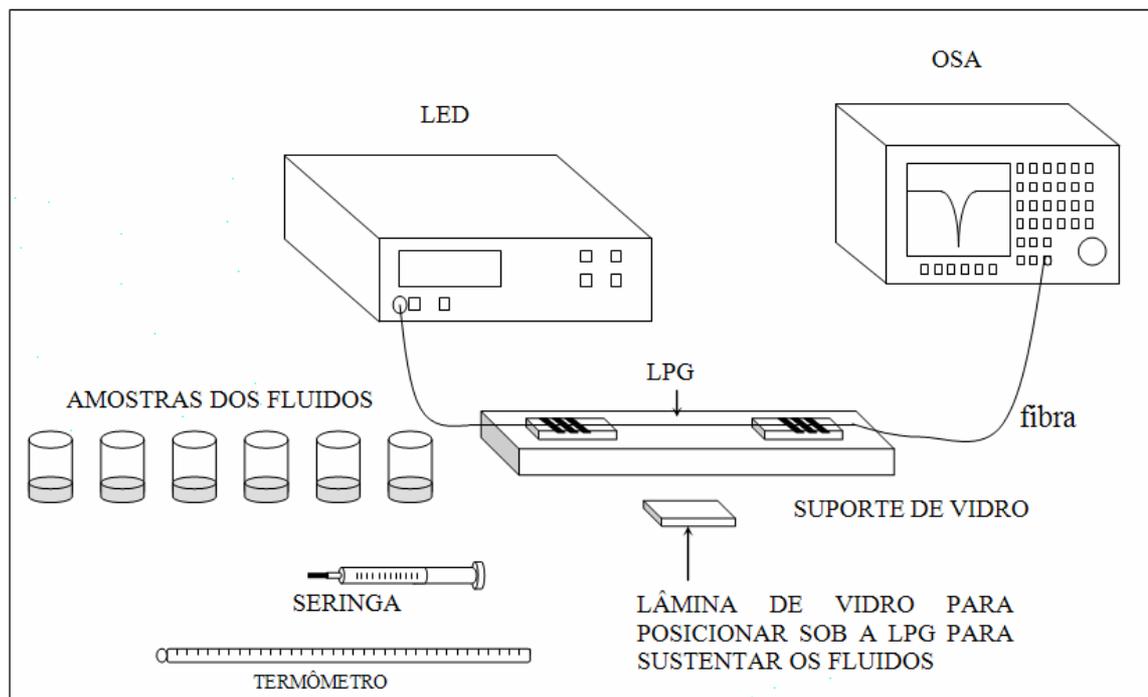


Figura 23: Esquema da montagem com equipamentos utilizados para a caracterização das LPGs quanto ao índice de refração do meio externo.

O índice de refração de cada amostra foi medido com um refratômetro Abbe em três comprimentos de onda (488,0 nm, 514,5 nm e 632,8 nm) de lasers de Ar^+ e He-Ne a uma temperatura de $20 \pm 1^\circ\text{C}$. A equação de Cauchy de segunda ordem (LI e WU, 2004), apresentada como Equação 52, foi empregada para estimar o índice de refração das amostras na faixa do espectro infravermelho, na qual se situava o comprimento de onda da fonte de luz utilizada, no caso do LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), operando na faixa de 1445 nm a 1645 nm, com comprimento de onda central em 1544,2 nm e largura de banda de 58,8 nm.

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} \quad (52)$$

A Tabela 7 apresenta o intervalo de dias decorridos, desde a gravação até a caracterização quanto ao índice de refração do meio externo, para cada rede.

A análise dos espectros, para o levantamento do comprimento de onda do vale de atenuação das LPGs imersas nos diferentes fluidos, foi feita através do ajuste de múltiplas gaussianas, após ser traçada uma linha de base, com o programa Origin.

Tabela 7: Especificação do intervalo de tempo decorrido desde a gravação até a caracterização das redes quanto ao índice de refração do meio externo.

rede	intervalo de tempo decorrido desde a gravação até a caracterização da rede quanto ao índice (dias)
LPG1	23
LPG2	7
LPG3	164
LPG4	0
LPG5	7
LPG6	130
LPG8	8
LPG9	105
LPG10	33
LPG11	73

Os dados experimentais dos valores dos índices de refração de cada amostra, juntamente com o comprimento de onda do vale de atenuação das LPGs imersas nessas mesmas amostras, foram plotados em gráficos que estão apresentados na Figura 63 e no Anexo 4. No eixo das abscissas ficaram os índices de refração e no eixo das ordenadas os comprimentos de onda. Nos pontos plotados nesse gráfico foi feito um ajuste com a equação de Chiang (CHIANG, LIU, NG *et al.*, 2000) representada pela Equação 47. No ajuste foram sempre utilizados os valores fixos: $\Lambda = 407 \mu\text{m}$, $n_{\text{ext}} = 1$ (ar) e $\rho = 62,5 \mu\text{m}$. Os parâmetros variáveis foram u_{∞} , λ_0 e n_{ca} . A raiz da função de Bessel J_0 mais próxima do valor encontrado nos ajustes, u_{∞} , correspondeu ao modo de casca linearmente polarizado LP_{0n} para cada uma das redes caracterizadas (SPIEGEL, 1973).

3.3.2 A Caracterização Térmica das LPGs com um Elemento *Peltier*

A caracterização térmica de algumas das redes foi realizada no arranjo experimental ilustrado na Figura 24. Nesse experimento, um dos extremos da fibra que continha a LPG foi conectado ao LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*, 1445-1645 nm), que funcionava como fonte luminosa, e o outro foi conectado ao analisador de espectros óticos (OSA, *Arintsu MS9710B*), operando com resolução de 0,07 nm e estabilidade em comprimento de onda de $\pm 5 \text{ pm}$. Os espectros de transmissão da LPG foram salvos em um disquete inserido no OSA.

Com o auxílio de suportes a LPG foi posicionada sobre um elemento *Peltier*. A fixação da fibra nos suportes foi feita com fita isolante. Uma pequena lâmina de alumínio, de dimensões 1 cm x 4,9 cm e cerca de 1 mm de espessura, foi posicionada exatamente em cima da LPG para ajudar a manter o seu contato com o elemento *Peltier*. Essa lâmina tinha um sulco, desenhado ao longo do seu comprimento, com uma espessura suficiente para encaixar apenas uma fibra ótica. No meio desse sulco a LPG foi encaixada e o peso da lâmina ajudou a mantê-la em contato com a superfície do elemento *Peltier*.

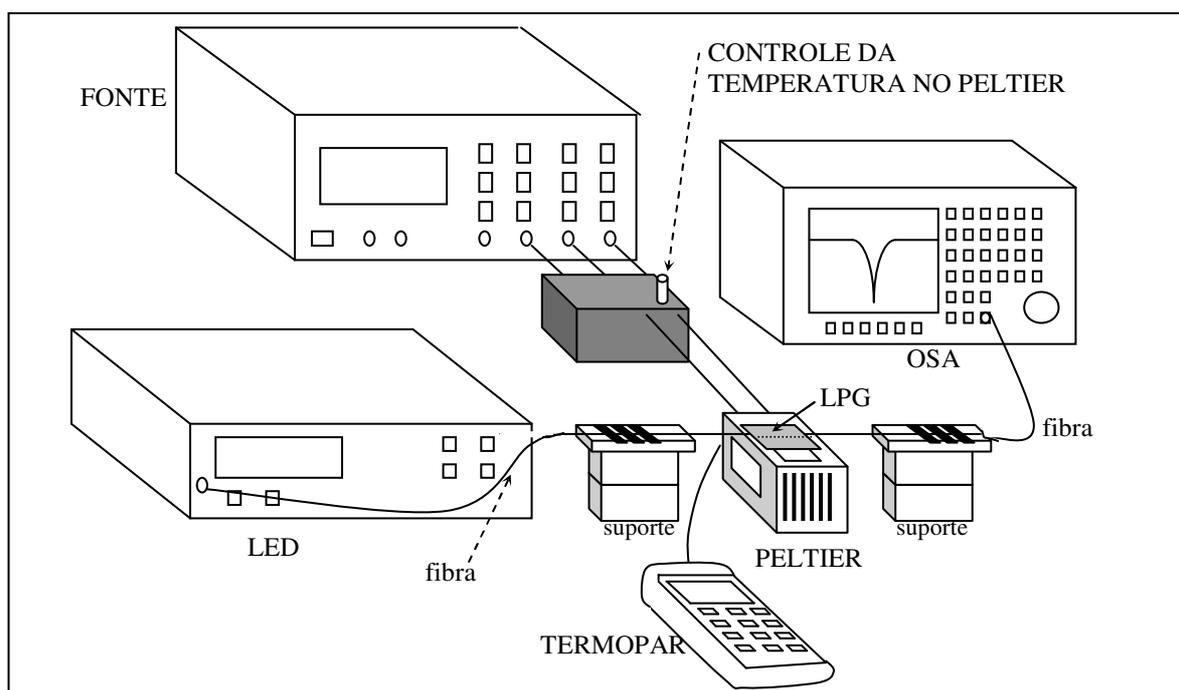


Figura 24: Arranjo experimental para a caracterização térmica das LPGs com um elemento *Peltier*.

A LPG11 foi submetida a três ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento. A mínima temperatura atingida pela rede nesses ciclos foi de $-1,5^{\circ}\text{C}$ e a máxima foi de $61,1^{\circ}\text{C}$. Os espectros de transmissão da rede foram salvos a cada acréscimo, ou decréscimo, de temperatura de 5°C . Os registros da temperatura atingida na superfície do *Peltier*, que ficou em contato com a rede, foram feitos por um termopar (*Minipa MT-520*) com resolução de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. O aparelho de ar condicionado permaneceu ligado durante esse experimento e a temperatura ambiente foi medida através de um termômetro químico de mercúrio (*Incoterm 169351/03*) com resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. A temperatura do ambiente manteve-se nos $19,5 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

A LPG9 também passou por três ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento para que ocorresse a estabilização térmica dos seus defeitos. A mínima temperatura atingida pela rede nesses ciclos foi de 8,7°C e a máxima foi de 60,8°C.

Para a análise dos espectros de transmissão dessas redes, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.3 A Caracterização Térmica da Sensibilidade ao Índice de Refração do Meio Externo

A LPG9 já havia sido recozida durante os três ciclos de aquecimento e resfriamento pelos quais ela passou no elemento *Peltier*, quando foi instalada horizontalmente na célula de vidro esquematizada na Figura 25. Essa célula de vidro foi usada para a caracterização térmica da LPG9 quanto ao índice de refração do meio externo à fibra. A célula de vidro tinha quatro aberturas. Duas delas foram usadas para inserir a fibra. As outras duas (contidas na parte superior e na parte inferior da célula) eram utilizadas para inserir e retirar as amostras da célula. A fim de impedir a sensibilidade cruzada da rede à tensões longitudinais, um dos extremos da fibra foi colado com éster de cianoacrilato, enquanto o outro passava através de uma roldana fixa e era mantido na posição vertical com o auxílio de uma massa de 10 g colada a ele com fita isolante. Um termômetro digital com resolução de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ foi usado para monitorar a temperatura das amostras.

O índice de refração de cada amostra foi medido com um refratômetro Abbe em três comprimentos de onda (488,0nm, 514,5 nm e 632,8 nm) de lasers de Ar^+ e He-Ne a uma temperatura de $20\pm 1^\circ\text{C}$. A equação de Cauchy de segunda ordem (apresentada como Equação 52) foi empregada para estimar o índice de refração das amostras na faixa do espectro infravermelho, na qual se situava o comprimento de onda da fonte de luz utilizada, no caso do LED superluminescente, (*Superlum, Pilot-2*), operando na faixa de 1445 nm a 1645 nm, com comprimento de onda central em 1544,2 nm e largura de banda de 58,8 nm.

Para a caracterização da sensibilidade da rede ao índice de refração do meio externo, as amostras foram mantidas em temperatura constante de $20\pm 1^\circ\text{C}$. Por isso o ar condicionado do laboratório permaneceu ligado durante todo o experimento e a temperatura ambiente foi medida através de um termômetro químico de mercúrio (*Incoterm 169351/03*) com resolução de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Para proceder a caracterização térmica da rede, as amostras dentro da célula de vidro eram aquecidas até 50°C . Os espectros de transmissão da rede eram salvos em intervalos de 3°C em 3°C , desde o momento em que a temperatura atingia 45°C até chegar a 21°C . Para cada amostra foram

repetidos três ciclos de medidas. Todos os espectros foram monitorados com um analisador de espectros óticos (*OSA, Anritsu MS9710B*), com resolução de 0,1 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 5 pm. Os espectros foram salvos em um disquete inserido no OSA.

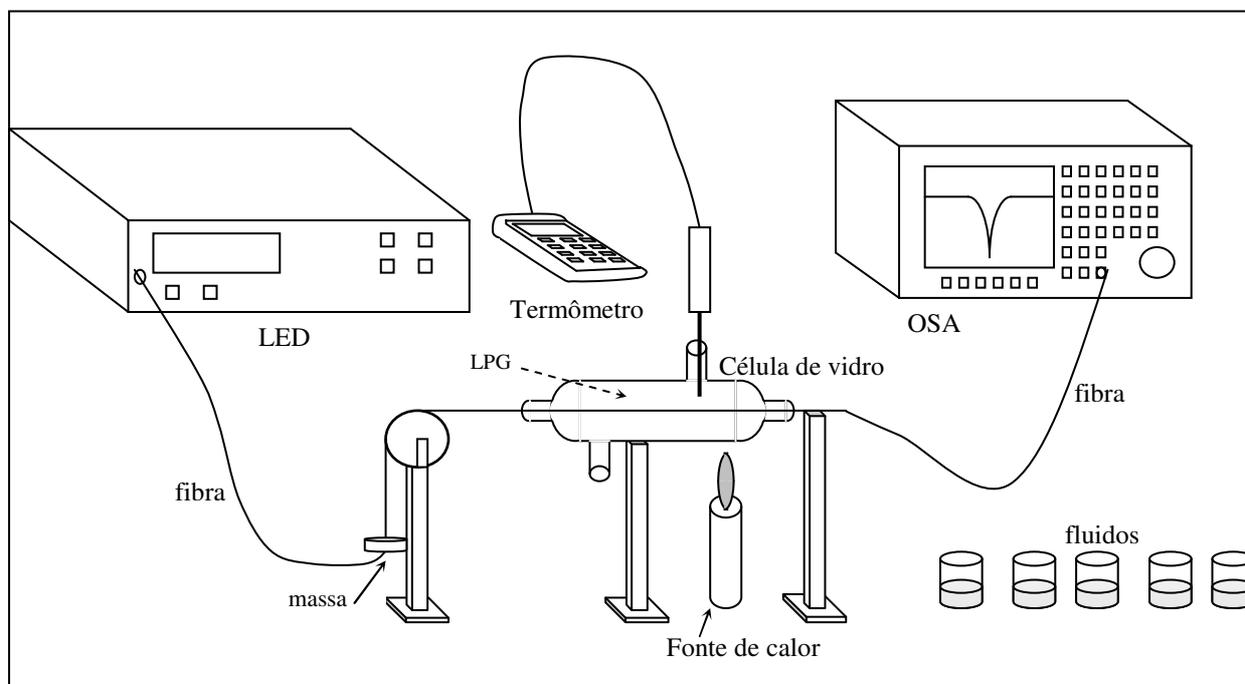


Figura 25: Esquema da montagem para a caracterização térmica da sensibilidade ao índice de refração do meio externo.

Foram feitas medidas com os fluidos ar, água destilada, álcool etanol, tiner, aguarrás e querosene (utilizados nessa ordem). Quando foram utilizados os hidrocarbonetos, sempre que um fluido era removido, a célula de vidro era preenchida com álcool etanol. O álcool etanol permanecia então por 30 minutos em repouso dentro da célula para que fosse efetuada a sua limpeza. Para assegurar a eficiência do processo de limpeza, o espectro de transmissão da LPG imersa no ar era salvo antes de dar-se início a uma nova caracterização.

Para a análise dos espectros de transmissão dessa rede, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.4 Caracterização quanto à Deformações

A Figura 26 apresenta o esquema de montagem para caracterizar a LPG9 quanto à deformações longitudinais. A LPG9 permaneceu inserida no interior da célula de vidro da montagem utilizada na caracterização térmica. A fonte ótica LED e o analisador de espectros óticos (operando com resolução de 0,2 nm) também foram os mesmos. A única mudança foi a substituição da roldana por um suporte fixo no qual a extremidade da fibra foi colada com éster de cianoacrilato. A idéia seria submeter a LPG9 a deformações longitudinais no interior de diferentes fluidos.

A deformação é dada na unidade $\mu\epsilon$ (*microstrain*). Cada $1 \mu\epsilon = 1 \mu\text{m}/\text{m}$. Como o dispositivo tracionador apresentava uma escala giratória dividida em 50 partes, correspondentes a 0,5 mm de tracionamento, duas voltas corresponderiam a 1 mm de tracionamento. Com essa informação e com a medida do comprimento da fibra situado entre os suportes fixos (40 cm), foi possível calcular a deformação produzida na rede para cada avanço de uma unidade na escala do dispositivo tracionador. Descobriu-se que a cada avanço de uma unidade a deformação aplicada seria de $25 \mu\epsilon$.

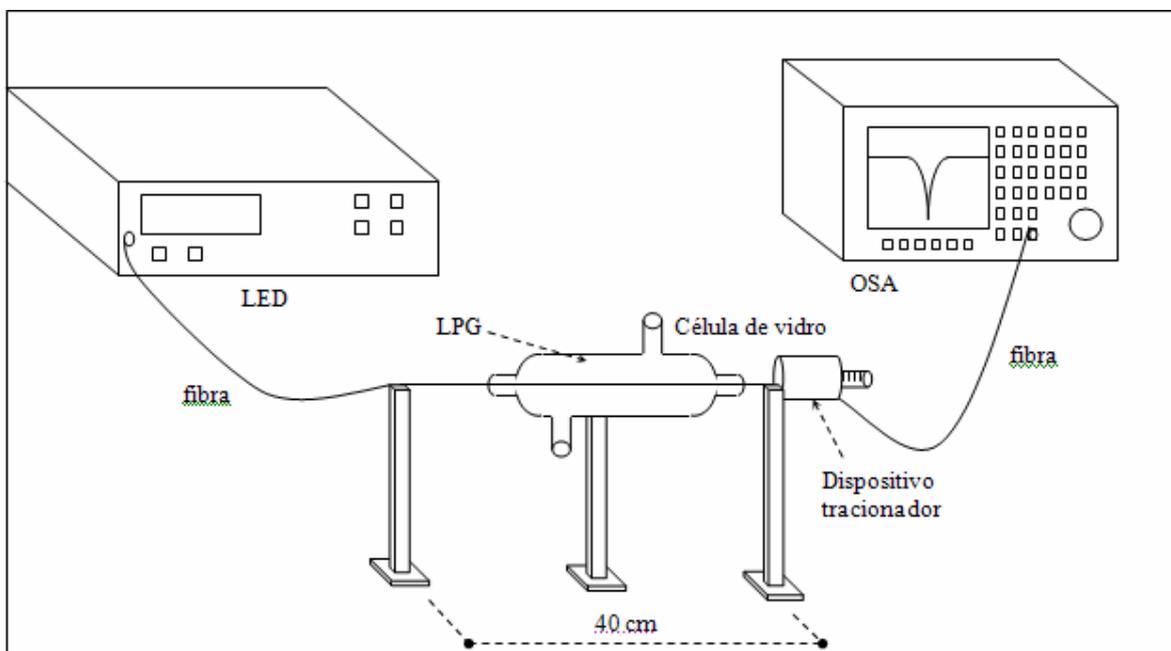


Figura 26: Esquema de montagem para a caracterização da LPG9 quanto à deformações.

O experimento iniciou com a rede imersa no ar. Um espectro foi salvo inicialmente com nenhuma deformação aplicada sobre a LPG9. Como não era possível saber se a rede já começaria a

ser tracionada nos primeiros avanços do dispositivo tracionador, salvaram-se, num primeiro momento, espectros somente para seis estágios, correspondentes ao avanço de seis unidades do dispositivo tracionador. Em seguida foi feita a análise desses espectros para determinar o vale central de atenuação correspondente a cada estágio de tração. Para a análise dos espectros de transmissão dessa rede, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base. Também foi traçado um gráfico, dos comprimentos de onda determinados em função do número de estágios de tração, para verificar o comportamento espectral. Pelo gráfico obtido, aparentemente os pontos correspondentes aos três últimos estágios demonstravam que a rede começava a ser tracionada. Então se deu prosseguimento às medidas.

Num segundo momento, aumentaram-se as deformações, que foram contadas do quarto até o nono estágio de tração e os espectros foram salvos novamente. Supondo que no quarto estágio a deformação ainda era nula, aplicaram-se à LPG9 deformações de $25 \mu\epsilon$, $50 \mu\epsilon$, $75 \mu\epsilon$, $100 \mu\epsilon$ e $125 \mu\epsilon$. Em seguida foi feita a análise desses espectros para determinar o vale central de atenuação correspondente a cada estágio de tração. Novamente foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas nos espectros de transmissão após ser traçada uma linha de base. Depois foi traçado um gráfico, dos comprimentos de onda determinados em função dos estágios de tração.

Na continuidade das deformações a LPG9 atingiu a ruptura. Por isso ela não foi submetida ao mesmo ensaio imersa em outros fluidos.

3.3.5 Caracterização da LPG3 no Forno Jung de 25°C a 1200°C

A Figura 27 ilustra o arranjo experimental utilizado para recozer a LPG3 a altas temperaturas no forno Jung (*Modelo LT0112, 110V/50V, Monofásico C/J200*). A LPG3 foi instalada no interior desse forno de laboratório. Para evitar deslocamentos indesejados da rede as extremidades da mesma foram fixadas com fita adesiva. Um dos extremos da fibra que continha a rede foi conectado ao LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), usado como fonte de luz. O outro extremo da fibra foi conectado a um cabo ótico que estava ligado a um analisador de espectros óticos (*OSA Agilent 8614*), com resolução de 1 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 2 pm, em outro laboratório. Pelo programa *X-Win 32* foi possível obter os sinais dos espectros desse OSA em um computador próximo ao forno. Os espectros foram salvos, através de comandos apropriados nesse computador, em um disquete inserido no OSA que estava no outro laboratório.

O forno foi programado para aquecimento a partir da temperatura inicial de 25°C. Dos 25°C o forno foi aquecido diretamente para 140°C, permanecendo 10 minutos nesse patamar de temperatura. Dos 140°C aos 240°C, o forno foi gradativamente aquecendo em degraus de 20°C e mantinha-se nesses patamares por intervalos de tempo de 10 min. Dos 240°C aos 1200°C, os degraus de aquecimento continuaram sendo de 20°C, mas o tempo de permanência em cada patamar de temperatura passou a ser de 5 min. Os espectros da LPG3 foram salvos na temperatura inicial de 25°C e durante o tempo de permanência nos patamares de temperatura que aconteceram entre 240°C e 1200°C.

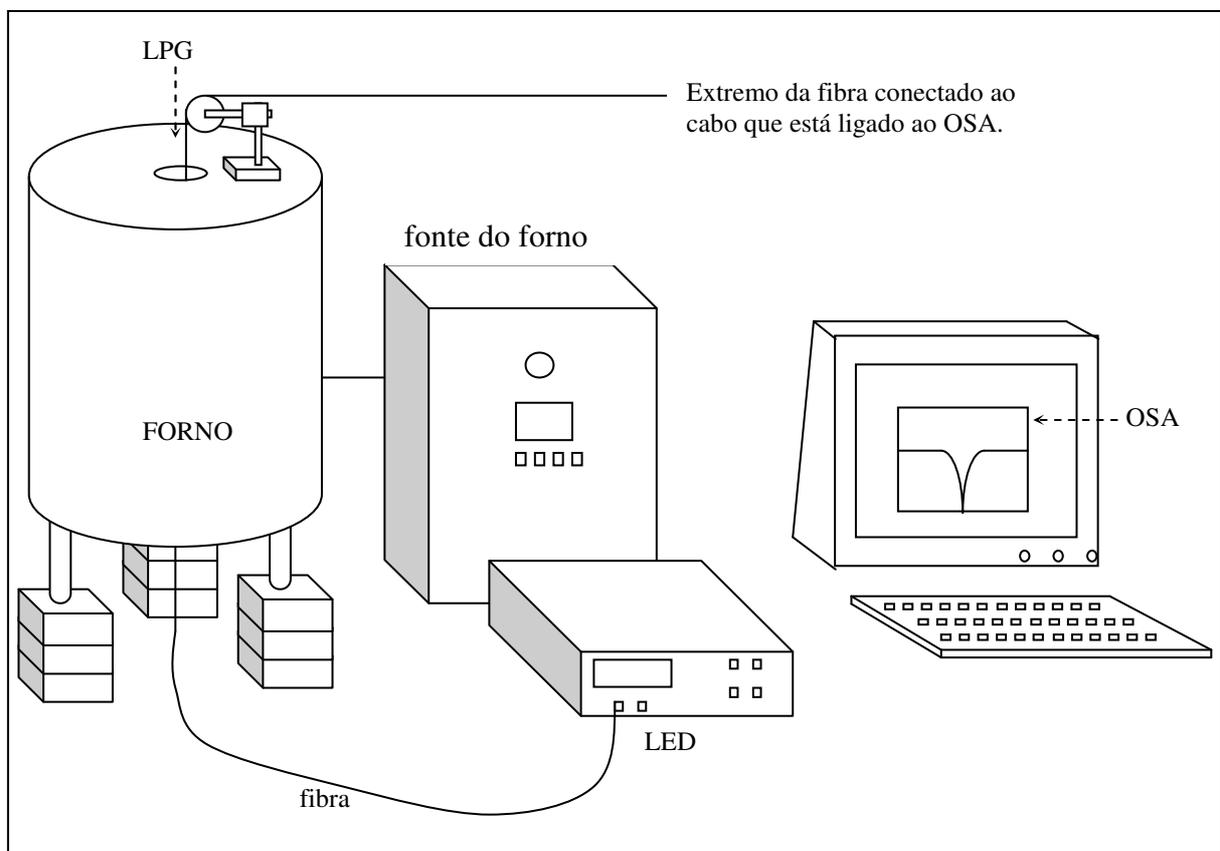


Figura 27: Arranjo experimental para o aquecimento das redes num forno de laboratório.

Após o aquecimento, a LPG3 foi deixada no interior do forno para que resfriasse naturalmente. Não foi registrado o intervalo de tempo decorrido até a rede atingir a temperatura ambiente. Quatro dias depois, encontrando-se a LPG3 ainda no interior do forno, salvou-se o seu espectro a uma temperatura de 24,7°C.

Para a análise dos espectros de transmissão dessa rede, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.6 Os Ciclos de “*Annealing*” da LPG8

Com o mesmo arranjo experimental que está esquematizado na Figura 27, a LPG8 foi submetida a três ciclos de aquecimento com posterior resfriamento natural no interior do forno. Foi feita a fixação das extremidades da fibra com fita adesiva para evitar deslocamentos indesejados da rede. Cada ciclo de aquecimento aconteceu de acordo com o gráfico apresentado na Figura 28.

Os espectros de transmissão da LPG8, para cada patamar de temperatura, foram salvos após a rede ter permanecido 30 minutos em cada patamar. Após cada ciclo de aquecimento, o forno desligava-se automaticamente e passava por um processo de resfriamento natural.

Ao longo do processo de resfriamento natural, salvavam-se os espectros de transmissão da LPG8 exatamente no momento em que ela atingia as temperaturas dos patamares. O espectro relativo à temperatura inicial de 25°C sempre era salvo apenas no dia seguinte, porque após passar pelo último patamar o resfriamento era bem lento.

As mesmas medidas foram tomadas no 2º e 3º ciclos de aquecimento e resfriamento natural. Cada ciclo de aquecimento e resfriamento foi feito em um dia diferente. Os três ciclos aconteceram em três dias consecutivos. A LPG8 permaneceu sempre no interior do forno ao longo desses dias.

Para a análise dos espectros de transmissão dessa rede, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.7 Os Ciclos de “*Quenching*” da LPG5 e da LPG6

Com o mesmo arranjo experimental que está esquematizado na Figura 27, a LPG5 e a LPG6 foram submetidas a dois ciclos de aquecimento, mantendo-se as redes sempre fixadas com fita adesiva para evitarem-se deslocamentos indesejados. Ao final de cada ciclo, as redes foram retiradas rapidamente para fora do forno mantendo-se ainda conectadas ao LED e ao OSA. Cada ciclo de aquecimento da LPG6 aconteceu de acordo com o gráfico apresentado na Figura 28. Já os ciclos de aquecimento da LPG5 diferiram da programação apresentada na Figura 28 apenas pelo tempo de duração dos patamares de temperatura, que foi de 30 minutos.

Os espectros de transmissão da LPG5 e da LPG6, para cada patamar de temperatura, foram salvos após as mesmas terem permanecido por 25 e 30 minutos, respectivamente, em cada patamar. Após cada ciclo de aquecimento, o forno desligava-se automaticamente e as redes eram rapidamente retiradas para fora do mesmo para que fosse salvo o seu espectro de transmissão.

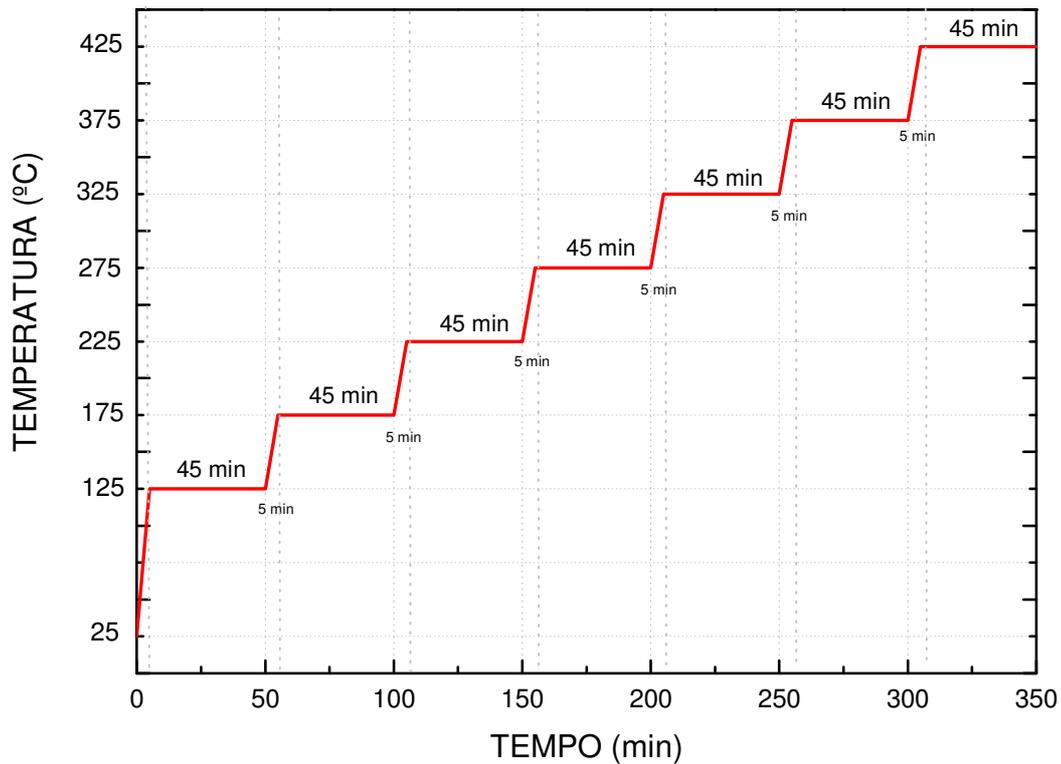


Figura 28: Gráfico ilustrativo da programação de aquecimento do forno para os ciclos de “*quenching*”, da LPG5 e LPG6, e de “*annealing*”, da LPG8.

No dia seguinte a cada procedimento de “*quenching*”, foram salvos os espectros das redes na temperatura ambiente. Cada ciclo de “*quenching*” aconteceu em um dia diferente. Os dois ciclos de “*quenching*” aconteceram em dois dias consecutivos, tanto para a LPG5 quanto para a LPG6.

Para a análise dos espectros de transmissão dessas redes, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.8 Caracterização de 25°C a 300°C e Investigação da Estabilidade Térmica em 350°C da LPG5

Depois que a LPG5 foi submetida a dois processos de “*quenching*”, de acordo com os procedimentos apresentados na seção 3.3.7, a mesma foi novamente instalada no interior do forno, como indica o arranjo experimental que está esquematizado na Figura 27. A extremidade da fibra

que foi introduzida através da abertura superior do forno foi fixada a uma haste metálica, com fita adesiva isolante, e a extremidade que saía através da abertura inferior foi fixada na mesa, com fita adesiva, apenas para manter a fibra que continha a LPG5 esticada, porém não tracionada. A LPG5 passou então pelo processo de aquecimento e resfriamento programado que está apresentado na Figura 29. Ao longo do aquecimento, a partir da temperatura ambiente até 300°C, os espectros de transmissão da LPG5 foram salvos com resolução de 0,06 nm uma vez a cada patamar após a mesma ter permanecido por 1 minuto em cada temperatura. Já durante o processo de resfriamento, como o forno levava intervalos de tempo maiores do que os programados para reduzir a temperatura, os espectros da LPG5 foram salvos na medida em que a temperatura ia atingindo valores próximos dos programados.

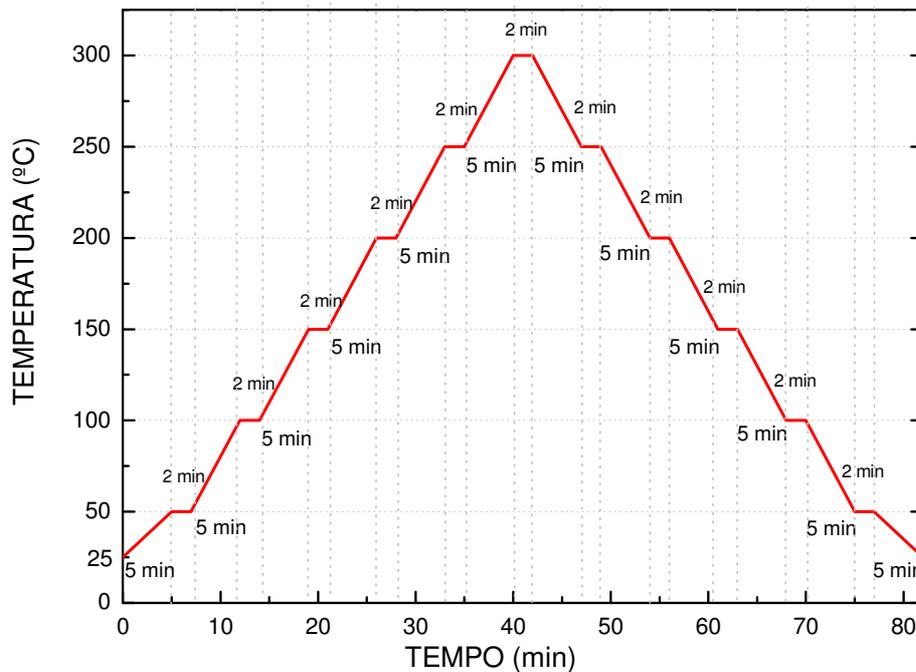


Figura 29: Gráfico ilustrativo da programação de aquecimento e resfriamento do forno para a caracterização térmica da LPG5.

A fim de investigar a estabilidade da LPG5 em altas temperaturas, após a mesma passar pelo processo de aquecimento e resfriamento esquematizado na Figura 29, o forno foi programado para manter por uma semana a temperatura de 350°C, de acordo com o gráfico ilustrativo da Figura 30. Escolheu-se o valor de 100°C para a temperatura inicial da programação. Essa temperatura foi

estipulada arbitrariamente, uma vez que o forno, ao ser ligado, foi aquecido automaticamente até esse valor inicial para então seguir o programa e atingir os 350°C que foram mantidos por uma semana. Para proceder a este tratamento térmico a fixação da fibra não foi alterada. Tanto os espectros de transmissão da LPG5 quanto os da fonte ótica LED eram registrados diariamente.

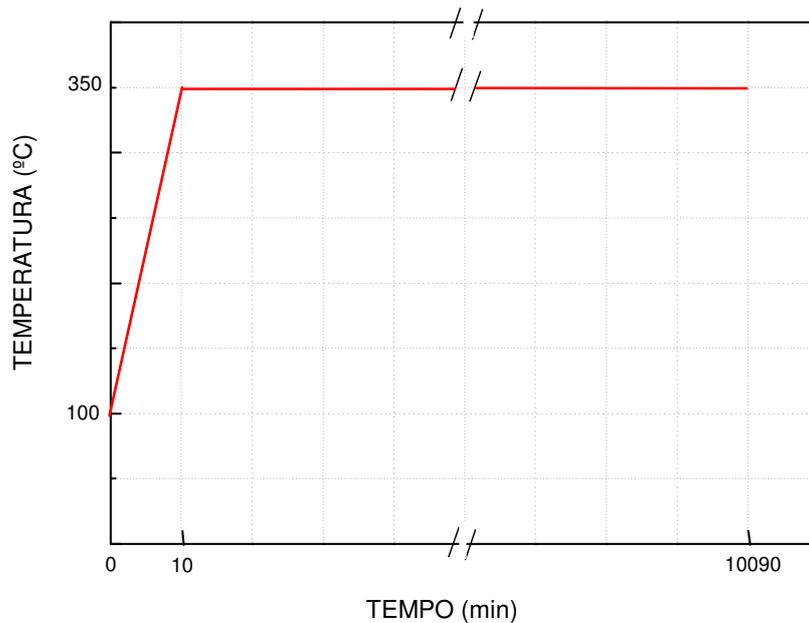


Figura 30: Gráfico ilustrativo da programação do forno para a manutenção da LPG5 na temperatura de 350°C por uma semana (10080 minutos).

Depois de ter sido mantida por uma semana em 350°C, a LPG5 permaneceu no interior do forno durante um processo de aquecimento de FBGs, que fazem parte de outro trabalho, a fim de não alterar o seu posicionamento e fixação. A programação foi a mesma da Figura 29, na qual o forno foi aquecido até 300°C e então resfriado. Durante esse processo os espectros da LPG5 não foram coletados.

No dia seguinte, já em temperatura ambiente e sem alteração alguma da fixação da LPG5, o programa ilustrado na Figura 30 foi novamente acionado para a que a rede permanecesse por mais uma semana em 350°C. Mais uma vez, tanto os espectros de transmissão da LPG5 quanto os da fonte ótica LED, foram registrados diariamente.

Após a segunda semana de tratamento térmico em 350°C a LPG5 foi novamente submetida ao processo de aquecimento gradativo até 300°C seguido de resfriamento, cuja programação está apresentada na Figura 29. A fim de obter dados mais representativos a respeito da sensibilidade

térmica da LPG5, foram registrados vários espectros de transmissão dessa rede tanto ao longo do processo de aquecimento quanto de resfriamento. A fixação da rede também não foi alterada neste experimento.

No último experimento realizado com a LPG5 a fita adesiva que fixava um de seus extremos na mesa foi propositalmente retirada. A intenção era a de obter a certificação de que aquele ponto de fixação não estava tracionando a rede e induzindo os comportamentos observados nos aquecimentos anteriores, já que a sensibilidade térmica dessa rede não havia se demonstrado linear. Então a rede passou por mais um processo de aquecimento até 300°C seguido de resfriamento, seguindo-se a programação apresentada na Figura 29.

Para a análise dos espectros de transmissão dessa rede, foi feito o ajuste com múltiplas gaussianas após ser traçada uma linha de base.

3.3.9 Ensaios de Curvatura em Diferentes Planos

Para serem desenvolvidos ensaios de curvatura com as LPGs gravadas através da técnica ponto-a-ponto foi preciso identificar o plano de gravação dessas redes. Essa identificação foi importante porque a exposição à radiação UV pode provocar uma assimetria no perfil do índice de refração do núcleo da fibra ótica, fazendo com que as modulações do índice no lado da fibra que é exposto à radiação sejam mais intensas do que no lado oposto. Interpreta-se com isso que a radiação é atenuada ao longo do núcleo. Quando a fibra é hidrogenada, como a absorvidade ao UV aumenta, esse efeito é acentuado provocando uma assimetria ainda maior no perfil de modulação do índice de refração (VENGSARKAR, ZHONG, INNIS *et al*, 1994). Essa assimetria pode provocar alterações na resposta da LPG à curvaturas quando se modifica o plano ou a direção na qual a curvatura acontece. Para testar essa hipótese com as LPGs gravadas com UV ponto-a-ponto no Laboratório de Laser, o plano de gravação de algumas redes foi demarcado com setas de papel sulfite coladas com uma gota de éster de cianoacrilato. A colagem das setas indicadoras foi feita antes da gravação e inclusive antes de emendar a fibra aos cabos que a conectariam ao LED e ao OSA, para se evitarem torções indesejadas. Para colar as setas indicadoras, a fibra era esticada e disposta horizontalmente sobre as setas alinhadas e, a seguir, era depositada uma gota de éster de cianoacrilato sobre os pontos da fibra em contato com as setas. Após a secagem do éster de cianoacrilato, para proteger os pontos de colagem, era colocado um pedacinho de fita adesiva durex sobre os mesmos. A fotografia apresentada na Figura 31 mostra como as fibras, com as setas

indicadoras já coladas, eram posicionadas no suporte de gravação. Com esse mesmo posicionamento demarcado foram gravadas as redes LPG12, LPG13, LPG14, LPG15, LPG16, LPG17, LPG19 e LPG20, para que uma delas pudesse ser utilizada em ensaios de curvatura em diferentes planos.

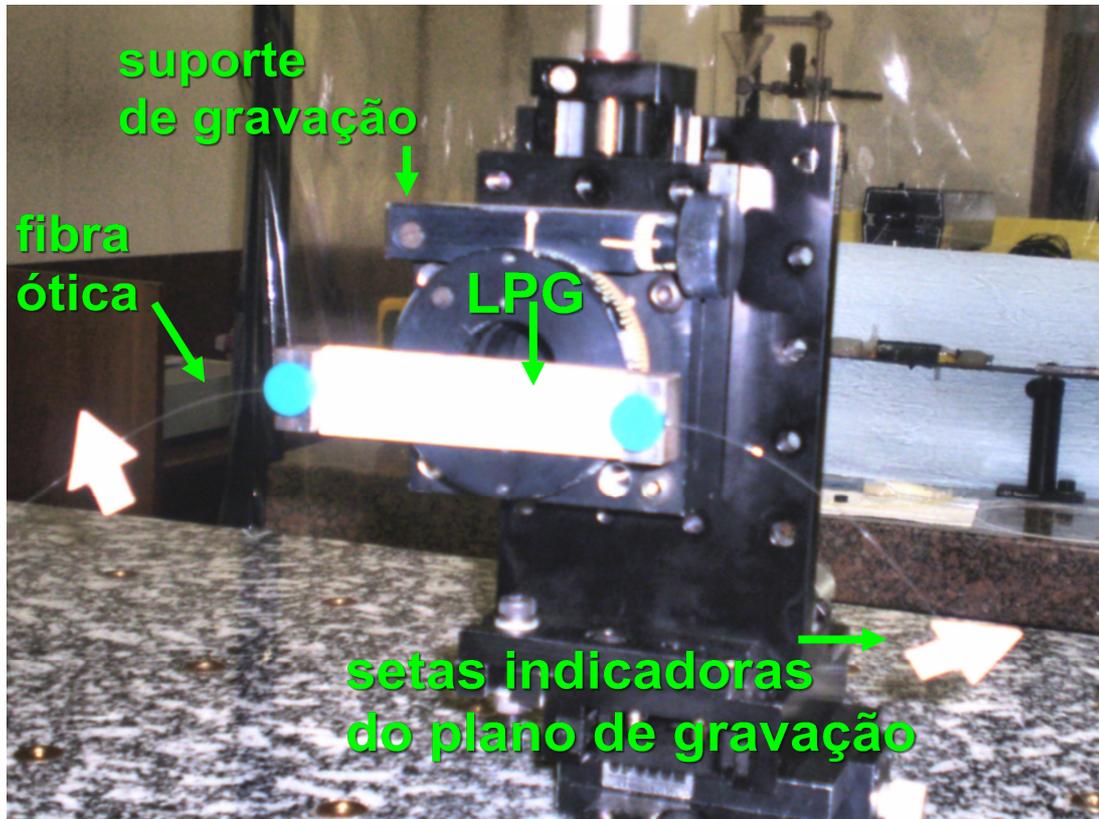


Figura 31: Fotografia mostrando a demarcação com setas, do plano de irradiação da fibra óptica, para gravação de LPG.

A primeira rede utilizada nos experimentos foi a LPG12. A LPG12 era a única rede gravada na fibra “*Centaurus*” que tinha a demarcação do seu plano de gravação. Inicialmente pensou-se em trabalhar com luz polarizada. Por isso foram realizados alguns testes preliminares com a montagem ilustrada na Figura 32. A LPG12 ficava totalmente imobilizada, sendo bem fixada com fita isolante em um suporte de vidro rígido. Os cabos e toda a extensão da fibra também eram totalmente imobilizados com fita isolante, para não haver nenhum tipo de interferência que pudesse provocar mudanças no estado de polarização; a não ser o próprio polarizador. Foram produzidas quatro diferentes mudanças do estado de polarização da luz, proveniente do LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), com o auxílio de um polarizador de controle manual. Para cada diferente estado de polarização foram feitas cinco medidas do espectro de transmissão da LPG12 com o

auxílio do analisador de espectros óticos (OSA), operando com resolução de 0,2 nm e estabilidade em comprimento de onda de ± 5 pm.

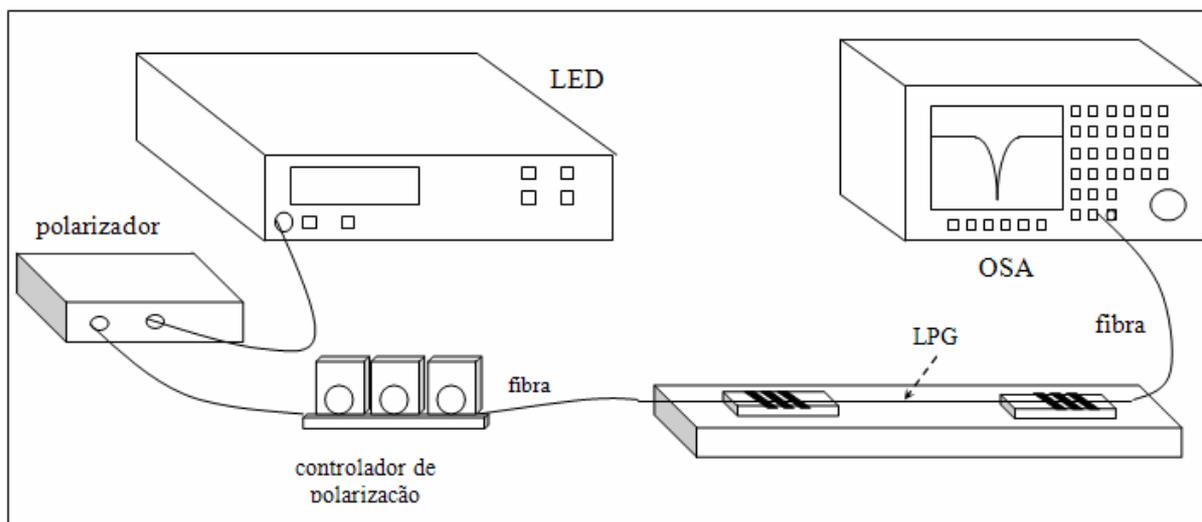


Figura 32: Arranjo experimental para testar a sensibilidade da LPG12 à mudanças no estado de polarização da luz por ela transmitida.

Depois foram realizados alguns experimentos com a montagem ilustrada na Figura 33, na qual era utilizada uma FBG Hi-Bi para identificar o estado de polarização da luz que seria direcionado para a LPG. Através da observação do espectro da FBG Hi-Bi eram selecionados três diferentes estados de polarização com o auxílio do controlador de polarização. Os estados eram (i) estado 1 (luz polarizada na direção y observando no OSA apenas o pico λ_{By}), (ii) estado 2 (luz polarizada na direção x observando no OSA apenas o pico λ_{Bx}) e (iii) estado 3 (luz polarizada a 45° com os eixos x e y observando no OSA os dois picos λ_{Bx} e λ_{By} com igual amplitude). Adotou-se que esses mesmos três estados de polarização seriam transmitidos na LPG, desligando-se a conexão que saía da porta 2 do acoplador para o OSA e ligando-se a extremidade livre da LPG ao OSA, conforme o esquema da Figura 33. Foram repetidas várias medidas procurando-se utilizar os mesmos três estados de polarização, que eram identificados pelo espectro da FBG Hi-Bi, a fim de investigar se a posição espectral da LPG seria mantida em cada um dos três estados. Trabalhou-se com resolução de 0,1 e 0,2 nm no OSA.

Foram feitos alguns testes iniciais de curvatura adotando uma montagem provisória que não permitia a mudança da direção das curvaturas. Quando a LPG12 foi instalada naquela montagem suspeitou-se que ela havia ficado levemente torcida e, na tentativa de melhorar a sua instalação, buscaram-se fazer alguns ajustes que acabaram provocando acidentalmente a quebra daquela rede.

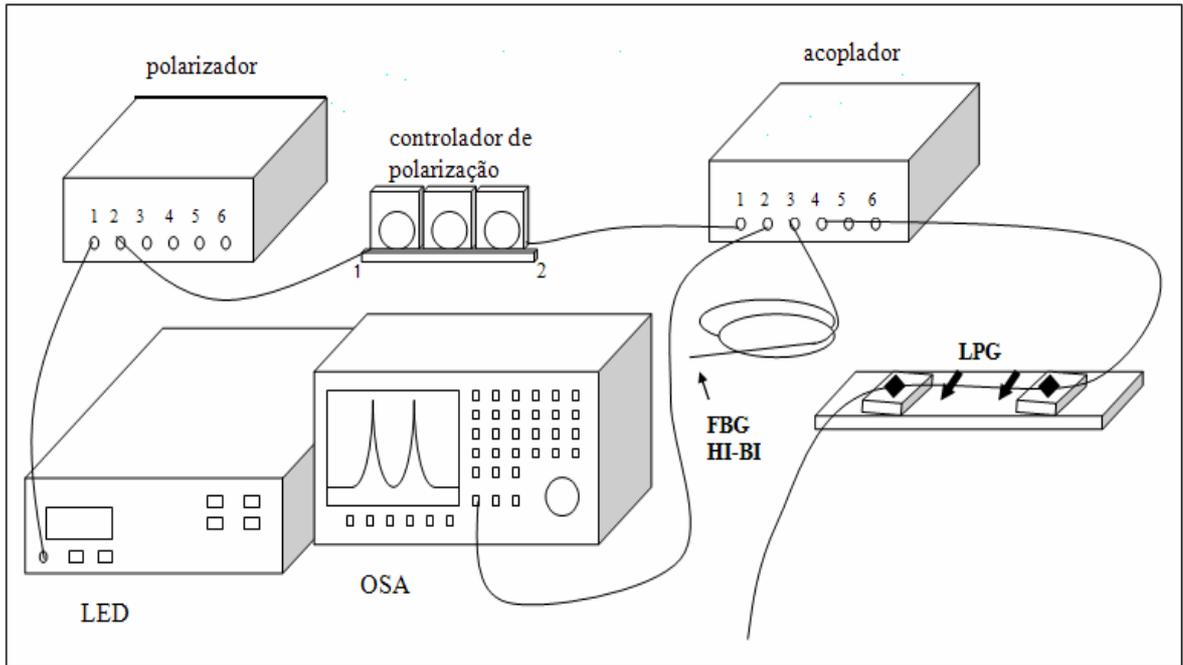


Figura 33: Montagem experimental que buscava gerar três estados diferentes de polarização da luz que seria transmitida na LPG12.

Um novo sistema foi projetado para possibilitar as curvaturas da LPG em diferentes direções. A Figura 34 ilustra esse aparato experimental no qual foi instalada a LPG20. A LPG20 foi eleita dentre as demais LPGs restantes, que continham a demarcação do plano de gravação, por ser a rede que apresentou a maior eficiência ao término da fotoinscrição. De acordo com os dados apresentados na Tabela 9, a LPG20, das redes gravadas na fibra “*Nufern*”, foi a que teve o maior coeficiente de acoplamento ($1,03 \pm 0,01 \text{ rad.cm}^{-1}$) e, em consequência, a maior modulação do seu índice de refração.

Um segmento de 18,7 cm da fibra que continha a LPG20 foi fixado, sem torções, entre as extremidades A e B do aparato experimental ilustrado na Figura 34. A fixação foi feita inicialmente com fita adesiva para haver a certificação de que a rede estava posicionada exatamente no centro do segmento. Uma vez conferido o alinhamento da LPG, bem como a disposição das duas setas indicadoras segundo o plano yz , depositou-se éster de cianoacrilato sobre os pontos de fixação da fibra. Nesse posicionamento inicial o ângulo θ , indicado na Figura 34, era igual a zero. De acordo com o sistema de coordenadas adotado, na gravação da LPG20 o feixe de UV havia incidido no sentido $-x$.

Os espectros da LPG20 foram coletados empregando-se luz polarizada e também não polarizada, utilizando a resolução de 0,1 nm no OSA. Como não havia garantias de que o estado de

polarização da luz refletida por essa rede seria o mesmo do transmitido na LPG20, a FBG Hi-Bi foi dispensada na montagem indicada na Figura 34. Dessa maneira, quando foi empregada luz polarizada, as ligações da LPG20 se assemelharam às da Figura 32, apenas substituindo a placa de vidro pelo novo sistema apresentado na Figura 34. Sem o emprego da luz polarizada retiravam-se o polarizador e o controlador de polarização da montagem, ligando-se o LED diretamente na LPG20.

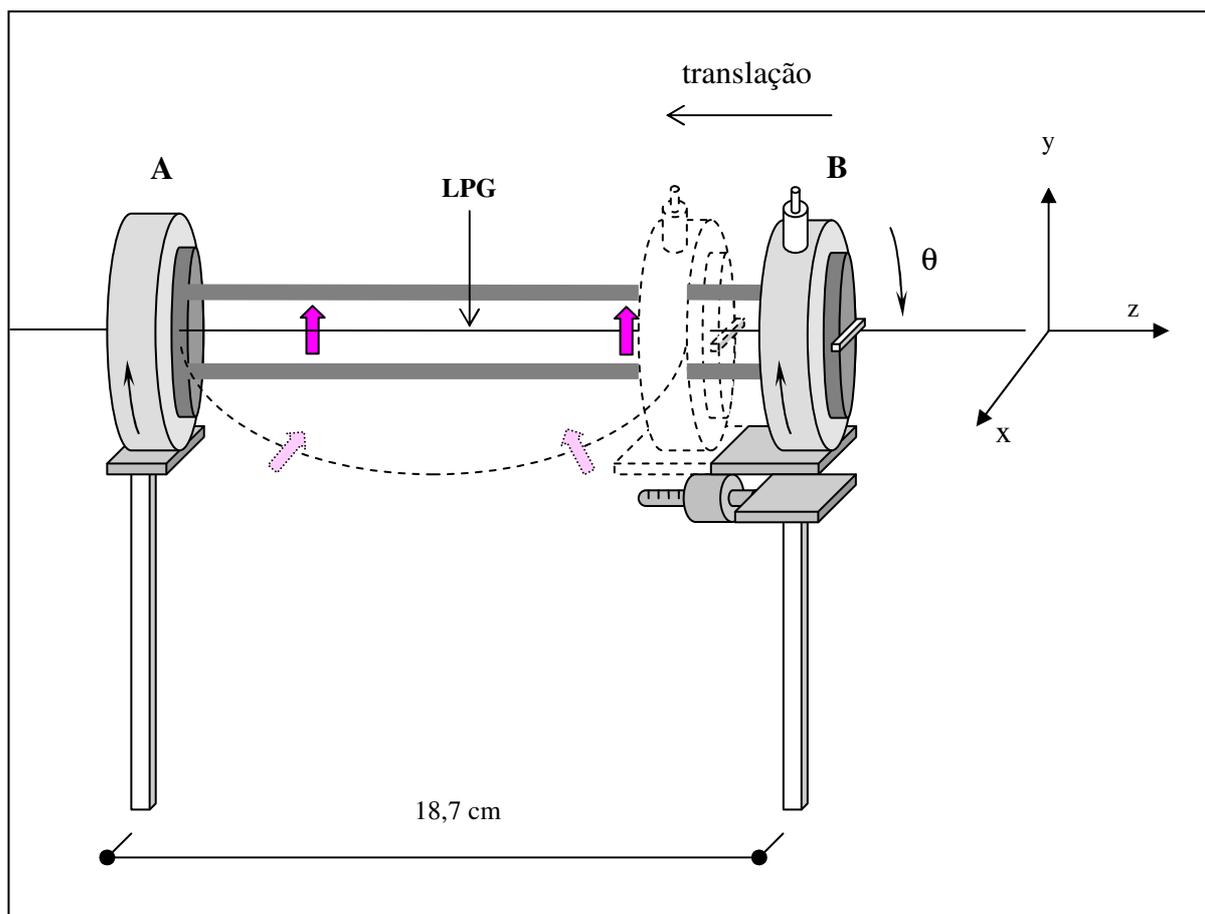


Figura 34: Dispositivo projetado para promover curvaturas em LPGs em diferentes direções.

Foi realizado um ensaio empregando luz polarizada para tentar aumentar a eficiência do espectro da LPG20, de acordo com o procedimento sugerido no trabalho de Allsop e seu grupo (ALLSOP, KALLI, ZHOU *et al*, 2008). Com o auxílio do controlador de polarização, foram promovidas diversas alterações no estado de polarização da luz transmitida na rede na expectativa de registrar possíveis mudanças espectrais no OSA.

Tanto nos experimentos que empregavam luz polarizada quanto não polarizada a sequência de procedimentos para as medidas foram as mesmas. Quando a luz polarizada foi utilizada tomou-

se a precaução de imobilizar todos os cabos. E tal imobilização foi mantida até mesmo nas medidas que dispensaram o polarizador. Ao empregar-se luz polarizada procurou-se coletar também o espectro da fonte ótica LED, supostamente com o mesmo estado de polarização que aquele que seria propagado na LPG20.

A temperatura ambiente era controlada com um termômetro químico de mercúrio (*Incoterm 169351/03*), com resolução de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. O termômetro era disposto verticalmente no interior de uma proveta que ficava ao lado do aparato experimental. Não foi notificada nenhuma alteração de temperatura nos dias nos quais as medidas foram realizadas.

Os procedimentos experimentais com a LPG20 instalada no sistema apresentado na Figura 34 foram os seguintes:

(i) Primeiramente foi posicionada uma régua milimetrada de acrílico, fixada com fita isolante a um bloco de metal que a mantinha disposta verticalmente, exatamente na metade do segmento da fibra ótica que foi fixado entre os pontos A e B da Figura 34. Desta maneira foi possível acompanhar os deslocamentos verticais da fibra, quando ela era curvada, tomando-se como referência o seu posicionamento quando esticada.

(ii) O OSA foi ajustado para trabalhar com resolução de 0,1 nm.

(iii) As medidas iniciais foram realizadas com a fibra esticada. O primeiro espectro de transmissão da LPG foi registrado quando as setas indicadoras estavam paralelas ao plano yz e indicando o sentido $+y$, ou seja, $\theta = 0$. A partir daí o sistema era rotacionado no sentido indicado na Figura 34, e de 15° em 15° os espectros eram registrados, até chegar em $\theta = 180^{\circ}$ que era a posição limite do sistema na qual as setas indicadoras voltavam a ficar paralelas ao plano yz , porém indicando o sentido $-y$.

(iv) Após as medidas com a fibra esticada, foram realizadas medidas com a LPG20 curvada. A rede era curvada através da translação do estágio B, de acordo com a indicação da Figura 34. Imediatamente após o deslocamento do estágio B, era registrado o deslocamento vertical do ponto médio da fibra, onde estava localizada a LPG20, tomando-se sempre como referência o posicionamento da fibra quando esticada. O primeiro espectro de transmissão da LPG20, na primeira e menor das curvaturas medidas, foi registrado quando as setas indicadoras estavam paralelas ao plano yz e indicando o sentido $-y$, ou seja, $\theta = 180^{\circ}$. A partir desse ponto o sistema foi rotacionado, no sentido contrário ao indicado na Figura 34, de 15° em 15° . A cada ângulo θ os espectros foram registrados e o deslocamento vertical do ponto médio da fibra aferido, até chegar em $\theta = 0$ e as setas indicadoras voltarem a ficar paralelas ao plano yz e indicando o sentido $+y$. Depois foram estabelecidas novas curvaturas à LPG20 adotando-se os mesmos procedimentos

experimentais e, para não rotacionar demasiadamente o sistema, partindo-se sempre do ângulo θ correspondente a posição rotacional final da curvatura anterior. Foram realizadas medidas com cinco curvaturas diferentes nas mesmas posições angulares θ , sendo $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 150^\circ, 165^\circ$ e 180° . Na Figura 35, observa-se a secção transversal da LPG20 orientada segundo todos esses ângulos marcando a posição na qual as setas indicadoras estavam coladas. Observa-se também na Figura 35 que a região do núcleo na qual a radiação UV incidiu está representada por uma coloração mais escura do que a região do núcleo da qual essa radiação emergiu.

(v) Um cuidado que foi tomado foi o de observar para que a curvatura da LPG20 sempre acontecesse no plano yz , independentemente da rotação imposta à fibra. Inicialmente o sistema foi projetado com duas placas de acrílico, uma de cada lado da fibra, próximas o suficiente para que pudessem manter as curvaturas contidas apenas no plano yz . Mas depois se percebeu que essas placas eram totalmente dispensáveis, já que as curvaturas aconteciam naturalmente apenas no plano yz .

(vi) Com o auxílio de uma régua milimetrada de acrílico foi realizada a medição do comprimento efetivo da fibra no qual ocorreram as curvaturas, L_0 . A distância encontrada foi de 18,7 cm e está registrada na cota da Figura 34.

(vii) O cálculo das curvaturas sofridas pela LPG20 foi feito através da Equação 53 (DU, TAM, LIU *et al*, 1998; FALATE, 2006). Nessa equação, a curvatura é representada por C e $1/C$ é o raio de curvatura. O deslocamento vertical da fibra a partir da sua posição esticada é h e L_0 é a distância de 18,7 cm que está especificada na cota na Figura 34.

$$C = \frac{2h}{h^2 + (L_0/2)^2} \quad (53)$$

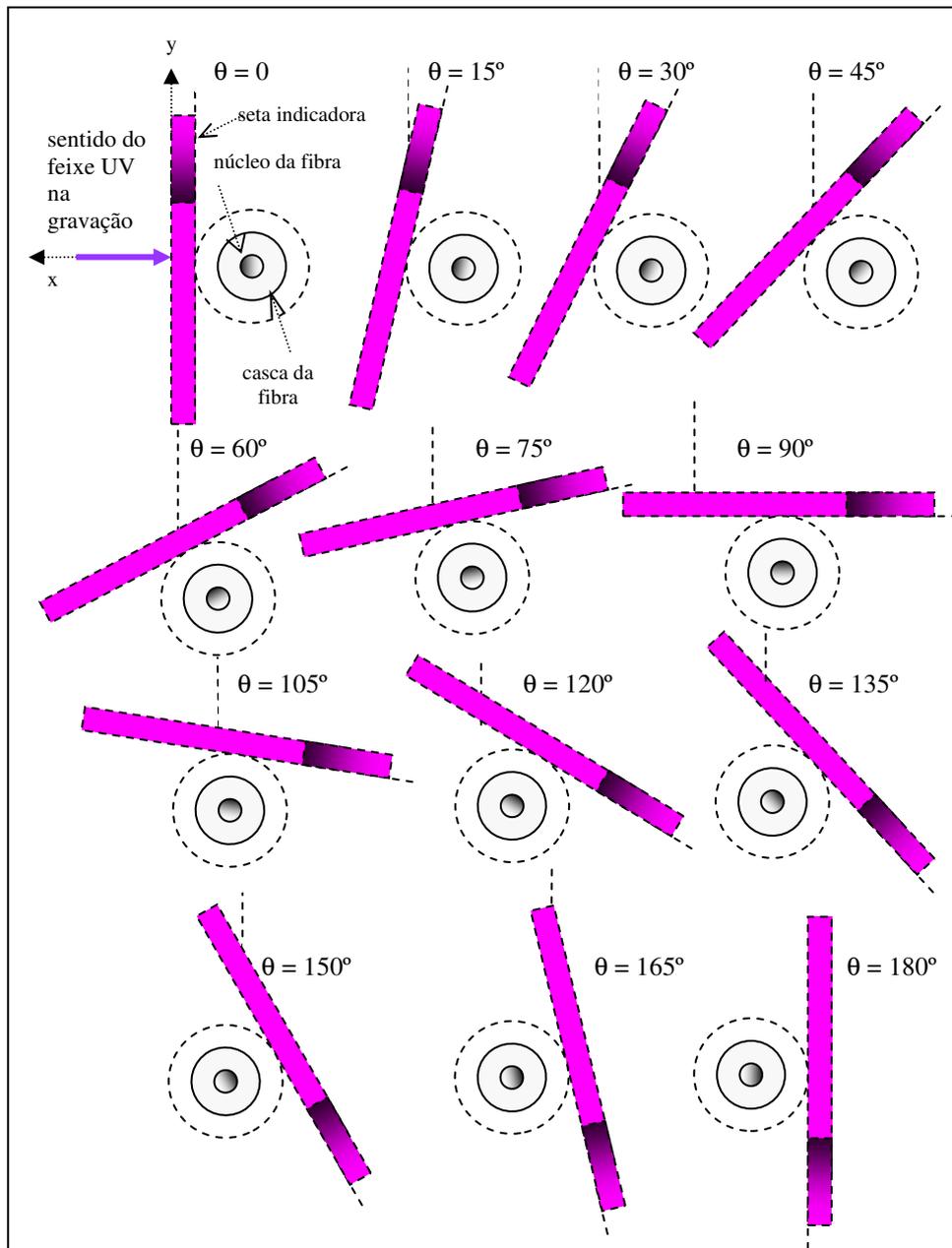


Figura 35: Ilustração fora de escala da secção transversal da LPG20, segundo o plano xy indicado na Figura 34, sendo rotacionada de 0 a 180°.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo consta uma descrição detalhada das características espectrais das redes de período longo produzidas óticamente, em fibras óticas hidrogenadas, através da técnica ponto-a-ponto com o emprego de um laser YAG, operando em 266 nm, no Laboratório de Laser da UTFPR. São discutidos os mecanismos que geram as alterações da modulação do índice de refração, durante e após a escrita dessas redes, e a instabilidade desses dispositivos que é resolvida por meio de tratamentos térmicos. Um dos focos principais das discussões apresentadas são os resultados dos processos de estabilização térmica que foram investigados para que esses transdutores possam operar em temperaturas que cheguem a 300°C. Também são apresentados, na seção 4.3, os resultados das diversas caracterizações as quais esses dispositivos foram submetidos.

4.1 AS REDES DE PERÍODO LONGO GRAVADAS OTICAMENTE

Foram escritas vinte redes de período longo através do sistema de gravação e leitura apresentado na seção 3.1.1. Foram utilizados dois tipos de fibras óticas, sendo uma identificada por fibra “*Centaurus*” e outra por “*Nufern*”. As Figuras 36 e 37 apresentam os espectros de duas das redes que foram gravadas. Os espectros das dezoito demais estão apresentados no Anexo 1. Nas figuras 36 e 37 os espectros representam a razão espectral entre os sinais transmitidos pelas LPGs e o sinal emitido pela fonte ótica LED utilizada. É apresentada a evolução espectral, bem como a transmitância do vale de maior atenuação, a cada cinco pontos gravados nas redes. Como a fonte ótica da luz que era transmitida através da fibra era um LED, que operava na faixa de 1445 nm a 1645 nm, observa-se que fora dessa faixa destaca-se apenas ruído.

Na maioria das redes obtidas observou-se que dois vales foram se pronunciando durante a gravação. Na LPG4, por exemplo, o vale de menor atenuação só surgiu uma hora depois do encerramento das iluminações de escrita quando se deslocou para a região espectral do LED. Isso se deve ao fato dos espectros deslocarem-se inicialmente para maiores comprimentos de onda nas primeiras horas depois que a gravação termina, por causa da rápida difusão de hidrogênio tanto da casca quanto das regiões do núcleo não expostas para as regiões do núcleo expostas à radiação UV (BHATIA, 1996; JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999; GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Essa difusão de

hidrogênio molecular aumenta a modulação do índice da LPG e diminui o índice de refração médio efetivo da casca e, de acordo com a Equação 37 que estabelece a condição de casamento de fase, isso resulta em maiores valores de comprimento de onda que justificam a migração do espectro nesse sentido.

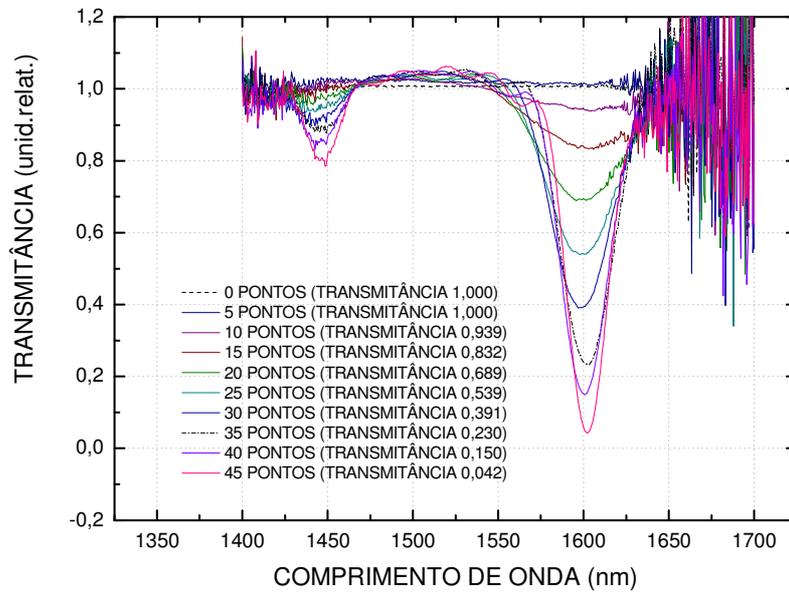


Figura 36: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG1 (fibra “Centaurus”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.

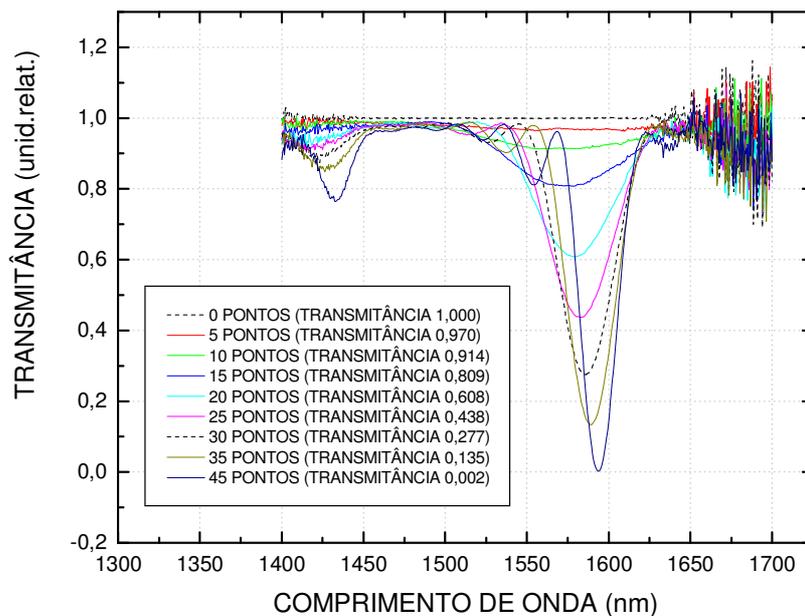


Figura 37: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG10 (fibra “Centaurus”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.

Outra observação foi a formação de bandas laterais, ou lóbulos laterais, de comprimentos de onda menores e, em alguns casos, maiores do que o do pico de ressonância das redes. Tipicamente, de acordo com Vikran Bhatia, uma rede de período longo pode ter duas ou três bandas laterais em um dos lados do vale principal, com atenuações variando de 0,5 dB a 4 dB (BHATIA, 1996). Essas redes com bandas, ou lóbulos, laterais em somente um lado do comprimento de onda que satisfaz a condição de casamento de fase, dada pela Equação 37, são denominadas de redes apodizadas. A apodização, apresentada na seção 2.4, tipicamente resulta da variação da modulação do índice de refração (Δn) e/ou do índice de refração efetivo n_{eff} do modo guiado ao longo do comprimento da rede. Para redes fabricadas com laser em fibras hidrogenadas, grandes faltas de uniformidade na modulação do índice de refração (Δn) são esperadas, pois na medida em que cada ponto vai sendo gravado acontecem alterações na concentração de moléculas de hidrogênio. Nas regiões do núcleo expostas à radiação UV, as moléculas de hidrogênio são dissociadas para serem produzidas outras ligações. Consequentemente surgem diferenças entre a quantidade de hidrogênio molecular das regiões expostas e das não expostas do núcleo. Isso também produz concentrações desiguais entre o núcleo e a casca. Tais diferenças de concentração provocam a difusão de hidrogênio molecular para as regiões do núcleo que foram expostas à radiação UV. A difusão de moléculas de H_2 para as regiões expostas do núcleo aumenta a modulação do seu índice de refração ainda mais (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999). De acordo com o que foi apresentado no subitem 2.3.1.1 do capítulo 2, isso acontece porque as moléculas de H_2 dissociam-se para formar ligações de GeH quando entram nas regiões que foram expostas à radiação UV e aproximam-se de centros GeE', resultantes da fotoexcitação dos centros GODC, que ainda não tenham reagido com outros íons H^+ (KASHYAP, 1999). Além disso, de acordo com a Equação 32, a modulação do índice de refração é expressa como uma soma de contribuições, devidas à concentração de centros de defeitos e outras estruturas fotoinduzidas, e a contribuição do centro GeH para a mudança de índice, de $4,5 \cdot 10^{-6}$ (OTHONOS e KALLI, 1999), faz a modulação de índice continuar aumentando.

Além da migração do hidrogênio molecular das regiões não expostas à radiação UV para as regiões expostas, durante o longo tempo de gravação das LPGs (cerca de 3 horas com a fibra “*Centaurus*” e de 4 horas com a fibra “*Nufern*”) há redução no próprio carregamento de H_2 da fibra, porque com o passar do tempo acontece a difusão das moléculas de hidrogênio para fora do guia de onda. Isso pode gerar reduções de sensibilidade à radiação UV e consequentemente uma diminuição na modulação do índice de refração do núcleo. Outra hipótese para as diferenças na modulação de índice, a cada ponto de gravação, são as flutuações de $\pm 11\%$ na fluência do laser que foram apresentadas na seção 3.1.2 do capítulo 3. Levando-se em conta esses fatores pode-se

justificar porque os espectros com apodização das LPGs, que foram gravadas ponto-a-ponto em fibras hidrogenadas, não exibem lóbulos laterais simétricos como os esperados no caso de uma distribuição gaussiana na saída de UV (que é obtida com o uso da técnica de gravação com máscara de amplitude). O perfil do índice de refração fotoinduzido não apresenta uma distribuição gaussiana ao longo do comprimento da rede com o uso da técnica ponto-a-ponto, mas certamente outro perfil de modulação de índice de configuração mais complexa é formado para legitimar a apodização que é observada através dos lóbulos laterais não simétricos ao vale principal.

Foi feito um levantamento do comprimento de onda central, da largura de banda e da transmitância do vale de maior atenuação das LPGs, durante o processo de escrita. Também foi feito o mesmo levantamento para o vale de menor atenuação das LPGs, referente aos números de pontos gravados nos quais houve uma boa definição desses vales. Os resultados desses levantamentos estão apresentados no Anexo 2.

Observou-se que, durante a fabricação das redes, o maior vale de atenuação deslocou-se para maiores comprimentos de onda na maioria dos casos (conforme mostram os espectros das LPGs apresentados no Anexo 1 e o levantamento de dados das tabelas do Anexo 2). Mas em quatro das redes gravadas os espectros não se deslocaram sempre para maiores comprimentos de onda durante a gravação. As Figuras 38, 39, 40 e 41 representam as posições espectrais, em comprimento de onda, do vale de maior atenuação das redes LPG1, LPG4, LPG6 e LPG12, respectivamente à medida que os pontos iam sendo gravados.

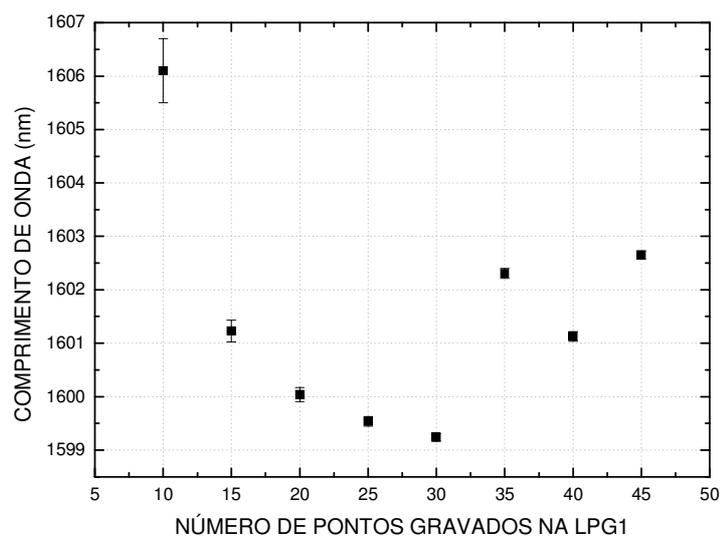


Figura 38: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG1 (gravada com fluência de $278,65 \pm 30,65 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.

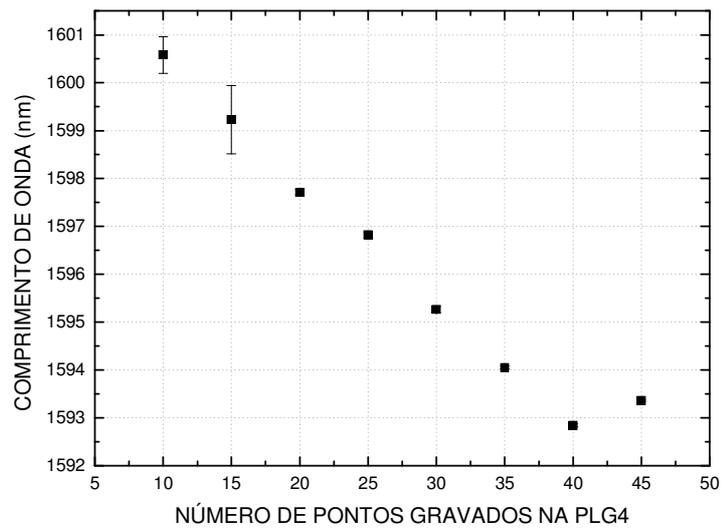


Figura 39: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG4 (gravada com fluência de $185,68 \pm 20,42 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.

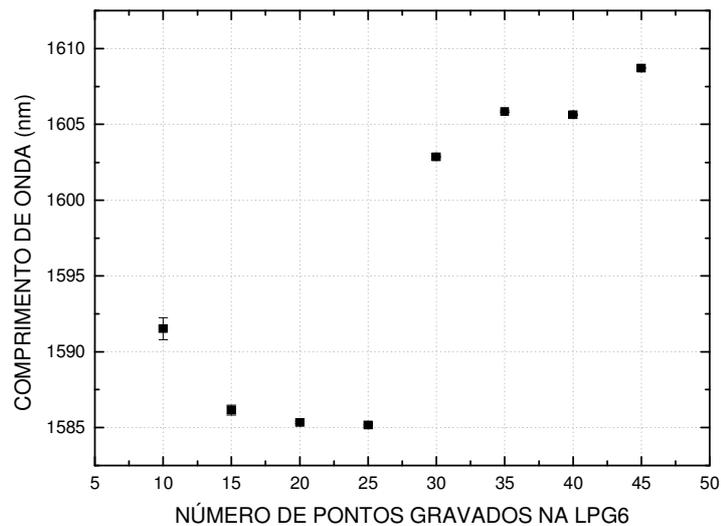


Figura 40: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG6 (gravada com fluência de $233,95 \pm 25,73 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.

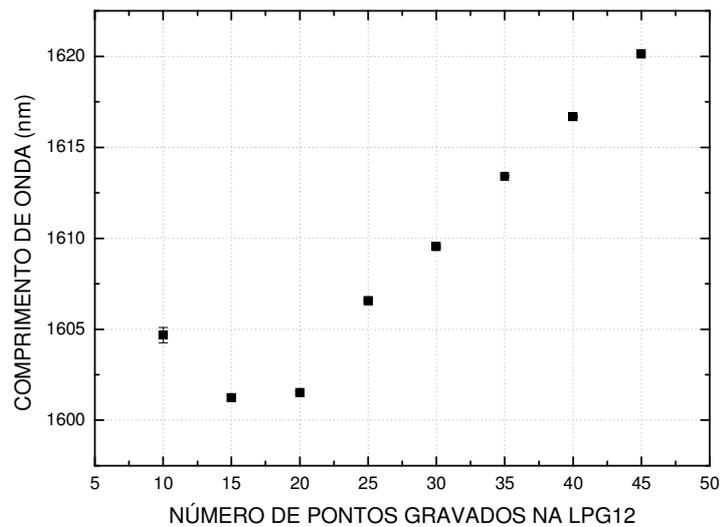


Figura 41: Evolução da posição do vale de maior atenuação da LPG12 (gravada com fluência de $207,96 \pm 22,88 \text{ mJ/cm}^2$) à medida que os pontos iam sendo gravados nessa rede.

Na LPG1, houve um deslocamento para menores comprimentos de onda até 30 pontos de gravação e depois oscilou entre maiores e menores valores até ser completada a gravação. Na LPG4, pelo menos até 40 pontos de escrita, houve um deslocamento para menores comprimentos de onda. Já na LPG6, pelo menos até 25 pontos de escrita, houve um deslocamento para menores comprimentos de onda, dos 25 aos 35 pontos para maiores comprimentos de onda, dos 35 aos 40 pontos tendeu para menores valores e voltou a aumentar nos últimos cinco pontos que foram escritos. Na LPG12, já a partir de 15 pontos escritos é que o pico de atenuação deslocou-se para maiores comprimentos de onda.

Durante os processos de escrita, as redes podem apresentar os deslocamentos das bandas de atenuação tanto para maiores quanto para menores comprimentos de onda. Para explicar isso, Vikran Bhatia demonstrou que uma LPG pode estar operando em duas diferentes regiões, denominadas de normal e anômala. Essa notação é derivada de duas regiões de operação, para as quais é definida uma diferença de índices de refração de grupo, δn_g , entre o modo guiado, ou fundamental de núcleo, e um particular modo de casca ($n_{g,nu} - n_{g,ca}$). δn_g pode ser positivo ou negativo, dependendo da ordem do modo de casca e do comprimento de onda de operação. A parte do espectro na qual δn_g é positivo é chamada de região normal de operação, enquanto que a parte do espectro na qual δn_g é negativo é chamada de região anômala de operação. O comprimento de onda para o qual a diferença dos índices de grupo é nula (δn_g ($n_{g,nu} = n_{g,ca} = n_o$)) é denominado de

comprimento de onda de equalização λ_0 . Para esse valor de comprimento de onda, o modo guiado e o modo de casca acoplado estariam se propagando com a mesma velocidade de grupo $v_g = c/n_0$, onde c é a velocidade da luz no vácuo. Durante o processo de escrita a banda de ressonância na região normal de operação se moverá para comprimentos de onda maiores enquanto que na região anômala se moverá para menores comprimentos de onda. Redes que induzem acoplamentos para modos de casca na região normal mostrarão um comprimento de onda de acoplamento mudando para altos valores, à medida que o índice de refração é elevado durante o processo de escrita. Para uma dada fibra, o coeficiente de acoplamento da mesma depende da potência do laser de UV sobre a fibra (BHATIA, 1996), para o caso da inscrição ponto-a-ponto. Sabe-se que o coeficiente de acoplamento é diretamente proporcional à modulação do índice de refração de uma rede (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Nas LPGs gravadas com o mesmo período e em um mesmo tipo de fibra as diferenças nos parâmetros de gravação, que podem ter provocado diferenças na modulação do índice de refração de diferentes redes, foram o número de pontos, a fluência do laser, o tempo de permanência da fibra fora da câmara de hidrogênio antes da rede começar a ser gravada ou intervalos mais ou menos prolongados entre as gravações de diferentes pontos.

Já a largura de banda foi se tornando cada vez mais estreita ao longo das gravações de todas as redes, conforme mostram os gráficos apresentados no Anexo 1 e os levantamentos de dados das tabelas do Anexo 2. As larguras de banda mais estreitas foram as da LPG14 ($13,24 \pm 0,24$ nm) e da LPG20 ($13,41 \pm 0,12$ nm), ambas gravadas em fibra “*Nufern*”. A maior largura de banda, no valor de $41,44 \pm 0,10$ nm, foi obtida na LPG2, gravada em fibra “*Centaurus*”. A largura de banda mais estreita da LPG14 e da LPG20, que é vantajosa para um sensor dessa natureza, já era esperada, uma vez que essa grandeza é diretamente proporcional a raiz quadrada do coeficiente de acoplamento e inversamente proporcional a raiz quadrada do comprimento da rede, de acordo com a Equação 39. A LPG20, gravada em fibra “*Nufern*”, que apresentou uma das menores larguras de banda, por exemplo, ficou com comprimento de $2,44$ cm, que é maior do que o de todas as redes gravadas com a fibra “*Centaurus*”, e coeficiente de acoplamento de $1,03 \pm 0,01$ nm, que é menor do que o de todas as redes gravadas na fibra “*Centaurus*”. Comparadas com as primeiras LPGs gravadas no Laboratório de Laser pela técnica do arco elétrico, a maioria das produzidas óticamente com o laser Nd:YAG, operando em 266 nm, apresentou menor largura de banda. Duas das primeiras redes gravadas com arco elétrico neste laboratório, que foram apresentadas em publicação (FALATE, FUGIHARA, MULLER, 2002; FALATE, 2000), tinham atenuações máximas de -4 dB e $-3,3$ dB e larguras de banda de 60 nm e 32 nm, respectivamente. Outras redes produzidas com arco elétrico mais recentemente, no mesmo local, chegaram a apresentar atenuação de $-11,9$ dB e largura de

banda de 21,6 nm (KAMIKAWACHI, POSSETTI, FALATE, 2007) e atenuações de -31,7 dB, com largura de banda de 20,6 nm, e de -19,7 dB, com largura de banda de 16,6 nm (KAMIKAWACHI, 2007). Mas, larguras de banda inferiores às da LPG14 e da LPG20, só foram conseguidas no Laboratório de Laser com redes acopladas em série.

A transmitância obtida para essas redes, imediatamente após a gravação ser concluída, variou desde 0,0021 (LPG10) até o valor máximo de 0,77 (LPG13), que corresponde à atenuações que variaram de -26,1 dB a -1,12 dB. Pode ser observada também uma diminuição de transmitância, ou aumento de eficiência, ao longo do processo de inscrição das redes, com exceção da LPG7, apresentada na Figura 42, que mostrou um aumento de transmitância, ou perda de eficiência de 7,96 dB, entre os 40 e os 45 pontos de inscrição. Esses comportamentos estão de acordo com as simulações teóricas realizadas por Jang e seus colaboradores (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999). Conforme esses pesquisadores, o acoplamento inicia e aumenta até um máximo e depois diminui até 0 dB novamente.

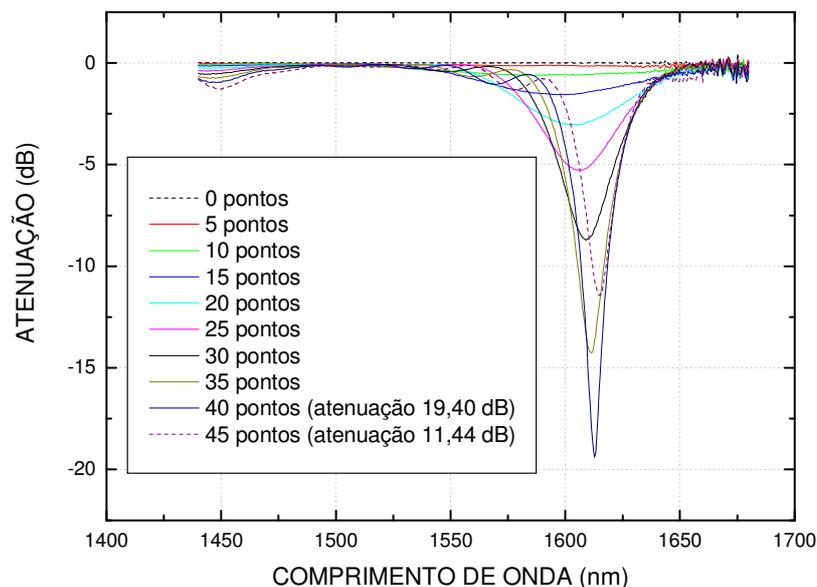


Figura 42: Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG7, durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.

Entende-se que a eficiência de uma rede aumenta com o aumento do seu comprimento até atingir a sua máxima eficiência, em conformidade com a Equação 38. Uma vez que a máxima eficiência é atingida, se mais pontos forem gravados, aumentando ainda mais o comprimento da

rede, a sua eficiência diminuiu devido ao re-acoplamento de potência ótica para o núcleo. No caso da LPG7, a atenuação atingiu o seu valor máximo aos 40 pontos e depois passou a diminuir nos últimos cinco pontos de gravação. Isso aconteceu porque a LPG7, de todas as redes que foram escritas no dia em que as fibras saíram da hidrogenação, foi a gravada com a maior fluência ($274,80 \pm 30,23 \text{ mJ/cm}^2$), de acordo com a Tabela 2. Consequentemente a LPG7 foi a rede que apresentou o maior coeficiente de acoplamento e a maior modulação de índice de refração. Observa-se também pela tabela de levantamento de parâmetros dessa rede, que está apresentada no Anexo 2, que os deslocamentos dos vales referentes aos dois modos de casca, para os quais a potência ótica foi acoplada, ocorreram para maiores comprimentos de onda.

Pelas tabelas contidas no Anexo 2 e pela Tabela 8 percebe-se que o comprimento de onda central do vale de atenuação, ou pico de perdas de transmitância, de cada rede assumiu uma posição espectral distinta para cada rede. As localizações das bandas de ressonância são funções do período da rede e da diferença entre os índices de refração efetivos do modo fundamental de núcleo e dos *n-ésimos* modos de casca, de acordo com a Equação 37. Algumas mudanças nas condições de escrita tais como oscilações da fluência do laser ou interrupções mais ou menos prolongadas na irradiação de diferentes pontos, podem alterar os resultados do primeiro fator da Equação 37, ou seja, podem alterar a diferença entre os índices de refração efetivos. A magnitude das mudanças espectrais também é dependente desses mesmos parâmetros. Até mesmo para as redes gravadas com o mesmo período e no mesmo tipo de fibra as condições de escrita foram diferentes, já que foram utilizadas diferentes fluências médias do laser e cada fibra permaneceu por tempos diferentes fora da câmara de hidrogênio antes de ser gravada. Também o tempo total de gravação de cada rede, em média entre 3 e 4 horas, não foi exatamente sempre o mesmo. Breves intervalos não programados aconteceram ao longo dessas gravações e isso fez com que a concentração de hidrogênio na fibra sofresse diferentes alterações ao longo de cada escrita. Jang e seus colaboradores fizeram um estudo aprofundado a respeito dos efeitos provocados pela difusão das moléculas de hidrogênio nas fibras, após diferentes tempos de manutenção das mesmas fora da câmara de hidrogênio, antes da gravação. Eles descobriram que quanto mais tempo uma fibra hidrogenada permanece fora da hidrogenação antes de ser gravada, maior é a posição espectral do pico de atenuação da rede gerada (o que valeu para um tempo de até 30 horas depois da retirada da hidrogenação), mantendo-se constantes os demais parâmetros de gravação. Já nas redes sendo gravadas em fibras hidrogenadas, guardadas fora do hidrogênio por mais de 30 horas, os pesquisadores perceberam que a posição espectral do pico de atenuação tendia para valores cada vez menores (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999).

Em dezoito das vinte redes gravadas há registro da posição do vale de atenuação logo após o térmico da gravação. Porém não foi possível observar algum tipo de relação entre a fluência média do laser empregada e as localizações espectrais das bandas de ressonância das redes gravadas na fibra “*Centaurus*”, conforme o gráfico apresentado na Figura 43 e a Tabela 8 que contém dados relativos a esse gráfico. Esse fato pode ser explicado pela dificuldade de manter-se a fluência do laser estável, conforme ficou comprovado através das duas aquisições temporais de fluência que estão apresentadas nas Figuras 19 e 20. O controle da fluência, que era realizado com o auxílio do fotodetector e do osciloscópio, também não podia ser feito no preciso momento em que a radiação UV incidia sobre a fibra ótica, porque o feixe seria bloqueado pelo fotodetector. Como o controle da fluência era feito somente nos intervalos de gravação entre distintos pontos, os valores registrados para esse parâmetro possivelmente não refletem as medidas que poderiam ser feitas em tempo real. Nas medidas que foram realizadas nos intervalos de gravação entre distintos pontos, algumas vezes constatou-se que o laser mantinha um valor médio de fluência aproximadamente estabilizado e outras vezes não. Mas comparando as redes gravadas na fibra “*Nufern*”, como a fluência empregada na gravação da LPG19 e da LPG20 foi em média maior do que a das outras redes observa-se que as posições espectrais dos vales de atenuação dessas duas também são maiores.

Nos experimentos houve dificuldade para se obter uma boa estabilidade do laser para alguns valores de tensão pico a pico estabelecidos, que eram registrados no osciloscópio conectado ao fotodetector posicionado diante do feixe de UV. Para fluências muito altas, havia uma tendência de saltos para grandes valores, fora do controle. Tentava-se ajustar uma determinada fluência média, mas não há garantias de que ela permaneceria estável ao longo dos 200 segundos de incidência em cada ponto das redes. De acordo com as duas aquisições temporais de 300 s da fluência do laser, feitas com o arranjo experimental ilustrado na Figura 18, cujos dados estão apresentados nas Figuras 19 e 20, há um desvio de $\pm 11 \%$ nos valores medidos com o auxílio do fotodetector. Acredita-se então que a modulação do índice de refração em cada ponto não foi uniforme ao longo de todos os pontos da rede. Esse é um indício para a falta de relação entre as posições espectrais das bandas de ressonância e a fluência média do laser empregada nas gravações.

Tabela 8: Especificações a respeito das LPGs para a análise do gráfico da Figura 43.

rede	fibra	nº de pontos	gravadas no mesmo dia em que foram retiradas do H ₂	fluência do laser estimada sobre a rede (mJ/cm ²)	posição do vale logo após o térmico da gravação (nm)
LPG1	“Centaurus”	45		278,65 ± 30,65	1602,65 ± 0,08
LPG2	“Centaurus”	45	x	243,71 ± 26,81	1681,90 ± 0,04
LPG3	“Centaurus”	45	x	209,82 ± 23,08	1636,11 ± 0,05
LPG4	“Centaurus”	45	x	185,68 ± 20,42	1593,36 ± 0,02
LPG5	“Centaurus”	45		137,40 ± 15,11	1616,31 ± 0,04
LPG6	“Centaurus”	45	x	233,95 ± 25,73	1608,71 ± 0,04
LPG7	“Centaurus”	45	x	274,80 ± 30,23	1615,07 ± 0,02
LPG8	“Centaurus”	45	x	252,49 ± 27,77	1618,83 ± 0,04
LPG9	“Centaurus”	45	x	234,42 ± 25,79	1630,70 ± 0,04
LPG10	“Centaurus”	45	x	207,03 ± 22,77	1594,03 ± 0,04
LPG11	“Centaurus”	35	x	185,68 ± 20,42	1596,22 ± 0,04
LPG12	“Centaurus”	45	x	207,96 ± 22,88	1620,13 ± 0,04
LPG13	“Nufern”	36	x	285,07 ± 31,36	1558,70 ± 0,04
LPG14	“Nufern”	58	x	291,90 ± 32,11	1551,61 ± 0,08
LPG15	“Nufern”	60	x	301,03 ± 33,11	1572,70 ± 0,02
LPG16	“Nufern”	60	x	296,47 ± 32,61	1579,98 ± 0,10
LPG17	“Nufern”	56	x	319,27 ± 35,12	Sem registro
LPG18	“Centaurus”	40	x	376,29 ± 41,39	Sem registro
LPG19	“Nufern”	60	x	410,50 ± 45,16	1610,53 ± 0,10
LPG20	“Nufern”	60	x	410,50 ± 45,16	1602,58 ± 0,03

Como pode ser observado pela Figura 43, nenhuma rede foi reproduzida exatamente com as mesmas características, mesmo tentando-se manter os valores médios de fluência próximos. A LPG4 e a LPG11, gravadas com a mesma fluência média, apresentaram posições espectrais bem próximas, mas, embora tivessem o mesmo período, tinham diferentes números de pontos, conforme mostram os dados da Tabela 8. A explicação para esse fato pode ser dada devido à existência de diferentes concentrações de hidrogênio molecular nas fibras nas quais foram gravadas essas redes, já que não houve um controle do tempo decorrido desde a retirada das fibras da câmara de hidrogenação até o início da gravação. A LPG2 foi a que apresentou a maior posição espectral para o vale de atenuação, embora a sua fluência média tenha sido mantida próxima da de outras redes, conforme pode ser observado sobrepondo-se as barras de erros das fluências na Figura 43. Apesar da fibra utilizada na gravação da LPG2 ter sido retirada do hidrogênio no mesmo dia da gravação, não houve um controle do número de horas que se passaram até o início da gravação dessa rede. O número de horas de espera, desde a retirada da hidrogenação até o início da gravação,

possivelmente alterou a posição espectral da LPG2. Como esse tempo de espera com certeza foi inferior a 30 horas, em conformidade com o trabalho de Jang e seus colaboradores (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999), já citado anteriormente, a maior posição espectral da LPG2 em relação às demais redes pode ser explicada pelo fato dela ter permanecido mais tempo fora da câmara de hidrogenação antes de ser iniciada a sua gravação. Já a LPG5, retirada na véspera da gravação da câmara de hidrogenação (tempo de espera para a gravação superior a 30 horas), foi a rede gravada com a menor fluência média cuja barra de erros não apresentou sobreposição com a das demais redes, conforme pode ser visto na Figura 43.

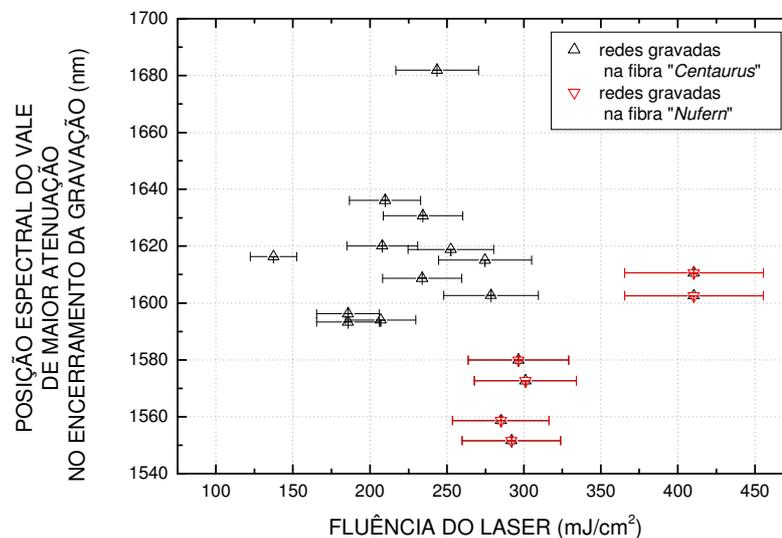


Figura 43: Posição espectral do vale de maior atenuação das LPGs gravadas em função das fluências médias empregadas.

Conforme já foi dito anteriormente, utilizando fluências médias mais baixas do que a mínima que foi utilizada para gravar a LPG5 não foi possível realizar gravações. A fluência média que se conseguiu obter mais próxima do mínimo valor que aparece na Tabela 8, com a qual se tentou gravar uma LPG sem sucesso, foi de 107,69 mJ/cm². Nas tentativas de gravar redes com fluências médias maiores do que a máxima que aparece na Tabela 8, ora o espectro ficava ruidoso sem definição de vales de atenuação ou ora a fibra acabava rompendo-se no próprio suporte de gravação. Com a fluência média de 278,52 mJ/cm² tentou-se gravar sem sucesso uma rede por cima da capa de uma fibra “Centaurus”.

No tocante à transmitância das LPGs escritas, sabe-se que esse parâmetro obedece a uma função cossenoidal (STARODUBOV, GRUBSKY e FEINBERG, 1998), dada pela Equação 38. Foram traçados gráficos da transmitância ao longo do processo de gravação de algumas das redes em função do aumento dos seus comprimentos, à medida que os pontos foram gravados. Depois foi utilizada a Equação 38 para fazer o ajuste desses pontos. O resultado desse ajuste no programa Origin forneceu o coeficiente de acoplamento para cada LPG. Algumas LPGs atingiram sua máxima eficiência antes de ser encerrado o processo de gravação. À medida que a gravação continuava, após o momento de saturação, a transmitância aumentava e a rede começava a perder um pouco da sua eficiência até o final da gravação. Esse comportamento obedeceu à variação cossenoidal da transmitância que é explicada pela Equação 38. Isso aconteceu com a LPG3 e com a LPG7, que atingiram a sua eficiência máxima antes de serem completados os 45 pontos de inscrição. Os ajustes dos pontos experimentais com a Equação 38 apresentaram uma determinação de aproximadamente 99% e estão apresentados no Anexo 3. A partir desses ajustes se encontrou o coeficiente de acoplamento para os correspondentes modos de casca. Esses coeficientes estão apresentados na Tabela 9.

Na Figura 44 observa-se o gráfico dos coeficientes de acoplamento em função das fluências médias empregadas. O coeficiente de acoplamento é diretamente proporcional à modulação do índice de refração da rede (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Já se comentou que a modulação de índice nas redes gravadas teve um perfil não uniforme, tanto devido à questão da dificuldade com o controle da fluência média do laser quanto devido às diferenças na quantidade de hidrogênio que se difundiu para fora da fibra. Pela Equação 38, observa-se que conforme o comprimento da rede aumenta, a intensidade da luz propagante no núcleo da fibra varia periodicamente. Para comprimentos $L = \pi/\kappa, 3\pi/\kappa, 5\pi/\kappa$, etc., as LPGs acoplam quase 100% da luz do núcleo para a casca (ou da casca para o núcleo), indicando uma alta qualidade de acoplamento de modos nas LPGs (STARODUBOV, GRUBSKY e FEINBERG, 1998). Algumas redes demonstraram uma maior eficiência nesse acoplamento, já que apresentaram transmitância bem próxima de zero ao final da gravação. A rede de maior eficiência que foi gravada foi a LPG10, já que a mesma atingiu uma transmitância de somente 0,0020841 ao ser concluído o seu último ponto de inscrição. O espectro dessa rede aparece na Figura 45.

Tabela 9: Coeficientes de acoplamento determinados para as LPGs.

rede	fibra	nº de pontos	comprimento da rede (cm)	fluência do laser estimada sobre a rede (mJ/cm^2)	coeficiente de acoplamento ($\text{rad}\cdot\text{cm}^{-1}$)
LPG1	"Centaurus"	45	1,83	$278,65 \pm 30,65$	$1,47 \pm 0,01$
LPG2	"Centaurus"	45	1,83	$243,71 \pm 26,81$	$1,56 \pm 0,03$
LPG3	"Centaurus"	45	1,83	$209,82 \pm 23,08$	$1,74 \pm 0,06$
LPG4	"Centaurus"	45	1,83	$185,68 \pm 20,42$	$1,49 \pm 0,03$
LPG5	"Centaurus"	45	1,83	$137,40 \pm 15,11$	$1,48 \pm 0,01$
LPG6	"Centaurus"	45	1,83	$233,95 \pm 25,73$	$1,36 \pm 0,03$
LPG7	"Centaurus"	45	1,83	$274,80 \pm 30,23$	$1,95 \pm 0,02$
LPG8	"Centaurus"	45	1,83	$252,49 \pm 27,77$	$1,23 \pm 0,02$
LPG9	"Centaurus"	45	1,83	$234,42 \pm 25,79$	$1,76 \pm 0,03$
LPG10	"Centaurus"	45	1,83	$207,03 \pm 22,77$	$1,65 \pm 0,02$
LPG11	"Centaurus"	35	1,42	$185,68 \pm 20,42$	$1,73 \pm 0,02$
LPG12	"Centaurus"	45	1,83	$207,96 \pm 22,88$	$1,73 \pm 0,02$
LPG13	"Nufern"	36	1,44	$285,07 \pm 31,36$	$0,69 \pm 0,01$
LPG15	"Nufern"	60	2,44	$301,03 \pm 33,11$	$0,72 \pm 0,01$
LPG17	"Nufern"	56	2,28	$319,27 \pm 35,12$	$0,80 \pm 0,01$
LPG19	"Nufern"	60	2,44	$410,50 \pm 45,16$	$0,98 \pm 0,01$
LPG20	"Nufern"	60	2,44	$410,50 \pm 45,16$	$1,03 \pm 0,01$

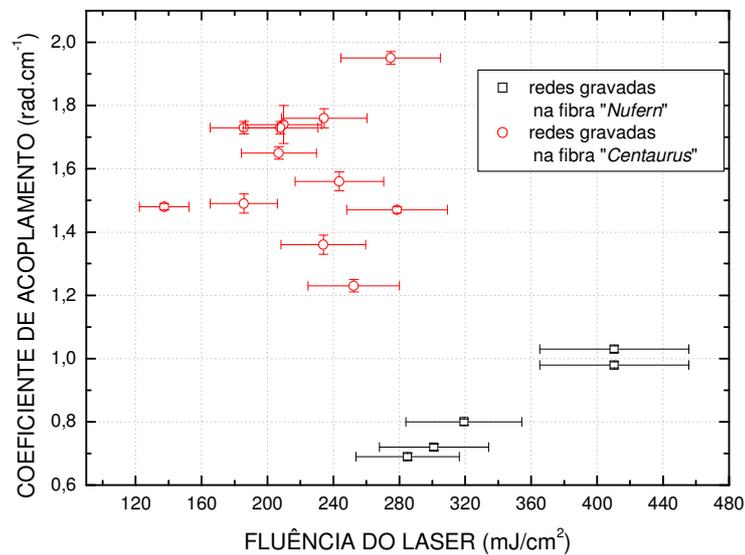


Figura 44: Coeficiente de acoplamento em função das fluências médias empregadas.

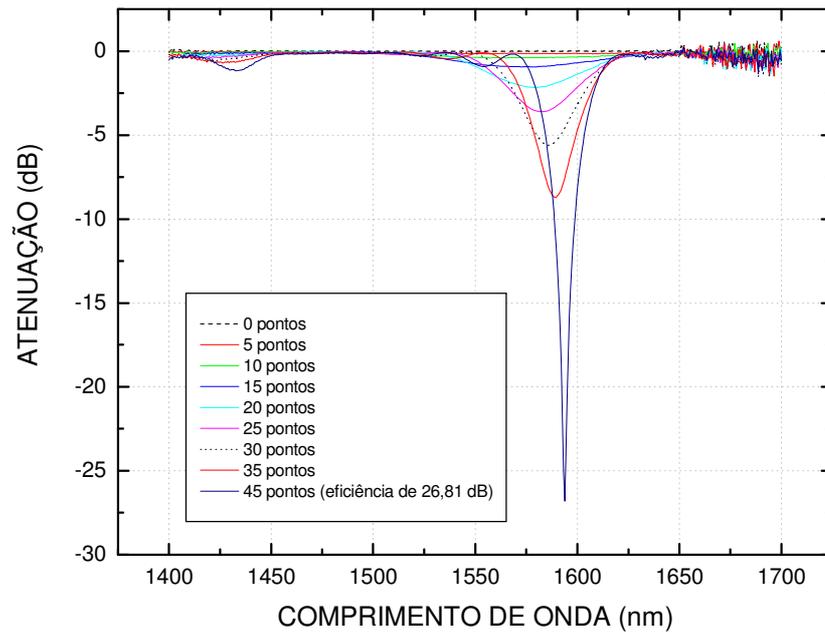


Figura 45: Espectros da LPG10 (gravada em fibra “*Centaurus*”) em dB.

Dentre as redes gravadas na fibra “*Centaurus*” no dia da retirada da câmara de hidrogenação, a LPG7 foi a irradiada com a maior fluência e foi a que apresentou o maior valor para o coeficiente de acoplamento, de acordo com os dados apresentados na Tabela 9 e na Figura 44. Já a fluência utilizada na inscrição da LPG1 não diferiu muito da fluência da LPG7, mas o coeficiente de acoplamento foi menor do que o dessa última porque a LPG1 havia sido retirada da câmara de hidrogenação na véspera e por isso perdeu um pouco de fotossensibilidade. A LPG3, a LPG10 e a LPG12 foram gravadas com fluências médias muito próximas, mas somente os coeficientes de acoplamento da LPG3 e da LPG12 ficaram com uma diferença compreendida dentro das incertezas dos seus valores. Considerando-se as incertezas dos coeficientes de acoplamento da LPG3 e da LPG10, percebe-se que há uma diferença de apenas $0,01 \text{ rad.cm}^{-1}$ nos seus coeficientes, considerando-se as incertezas de cada medida. Nas redes gravadas com a fibra “*Nufern*”, nas quais foi possível empregar-se o ajuste da Equação 38, pelo fato de um número suficiente dos seus espectros apresentar-se bem definido para ser registrado, encontrou-se uma proporcionalidade entre a fluência média do laser e o coeficiente de acoplamento, ou seja, quanto maior foi a fluência do laser, maior foi o coeficiente de acoplamento. Observa-se também que as fluências empregadas nas fibras “*Nufern*” foram sempre maiores do que as utilizadas nas gravações com fibras “*Centaurus*”, embora os coeficientes de acoplamento destas fossem sempre em média

maiores do que o daquelas. Isso comprova que a fotossensibilidade, bem como a modulação de índice de refração, difere de um tipo para outro de fibra. Nas demais redes não há uma correspondência direta entre os valores das fluências médias empregadas na gravação e os valores dos coeficientes de acoplamento que foram obtidos. Isso pode ser explicado por basicamente três motivos: (i) as incertezas grandes das fluências médias que foram de $\pm 11\%$, aliadas ao fato da dificuldade para controlar com exatidão esse parâmetro nos intervalos entre os diferentes pontos que eram gravados, (ii) os diferentes intervalos de tempo que se passaram desde a retirada das fibras da hidrogenação até o início das gravações, além de algumas interrupções esporádicas que devem ter acontecido durante as horas de gravação de cada rede (esses fatos podem ter provocado variação na fotossensibilidade das fibras por causa da difusão de hidrogênio) e (iii) erros aleatórios na focalização do feixe UV sobre a fibra através da observação visual de uma figura de difração. Na Figura 46 aparece uma foto mostrando em detalhe a figura de iluminação resultante da difração que é gerada quando o feixe de UV atinge a fibra para a gravação com a técnica ponto-a-ponto. A centralização do feixe sobre a fibra era feita visualmente, mas utilizando-se fluências baixas, que apresentavam intensidade luminosa mais fraca, o controle da centralização do feixe pode não ter sido muito preciso.

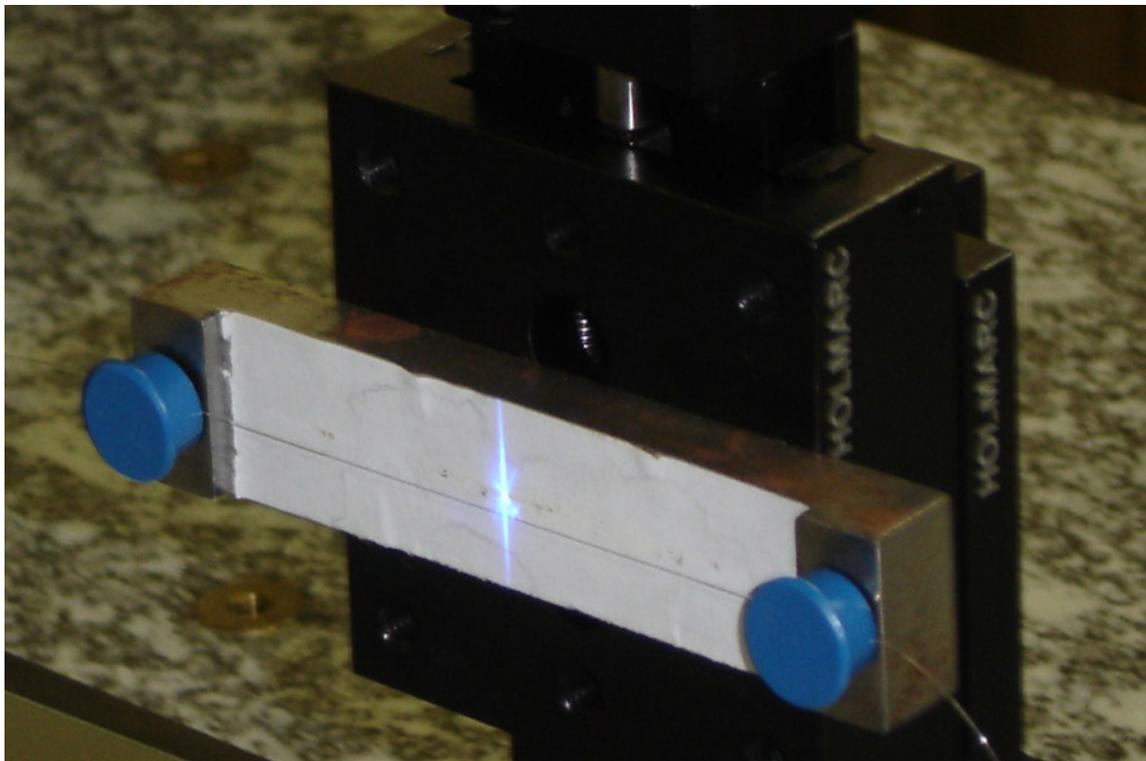


Figura 46: Foto do suporte de gravação das LPGs, observando-se a figura de iluminação resultante da difração formada pela incidência do feixe UV sobre a fibra ótica desencapada.

4.2 A CINÉTICA DOS ESPECTROS NAS HORAS SEGUINTE À INSCRIÇÃO

Observou-se em algumas LPGs, que nas horas seguintes ao término da gravação, o espectro de transmissão sofria algumas alterações tais como: deslocamentos em comprimentos de onda das bandas de ressonância, alterações na transmitância das redes bem como nas larguras de banda. As Figuras 47, 48, 49, 50 e 51 mostram algumas alterações que foram observadas nos espectros da LPG4, LPG7, LPG13, LPG14 e LPG15, respectivamente. Já as Figuras 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59 e 60 apresentam os resultados de acompanhamentos mais contínuos e detalhados que foram realizados com a LPG9, LPG10 e LPG11.

Na Figura 47 observa-se que a LPG4, que havia exibido um comportamento anômalo durante a sua inscrição, com deslocamentos das bandas de atenuação para menores comprimentos de onda, continuou a crescer após a sua inscrição. Depois de uma hora do encerramento da gravação, houve um aumento de atenuação de 4,44 dB e, após retirar a rede do suporte de gravação, mais um aumento de 0,95 dB. Percebe-se que os deslocamentos espectrais ocorreram no sentido de maiores comprimentos de onda depois que a gravação foi concluída.

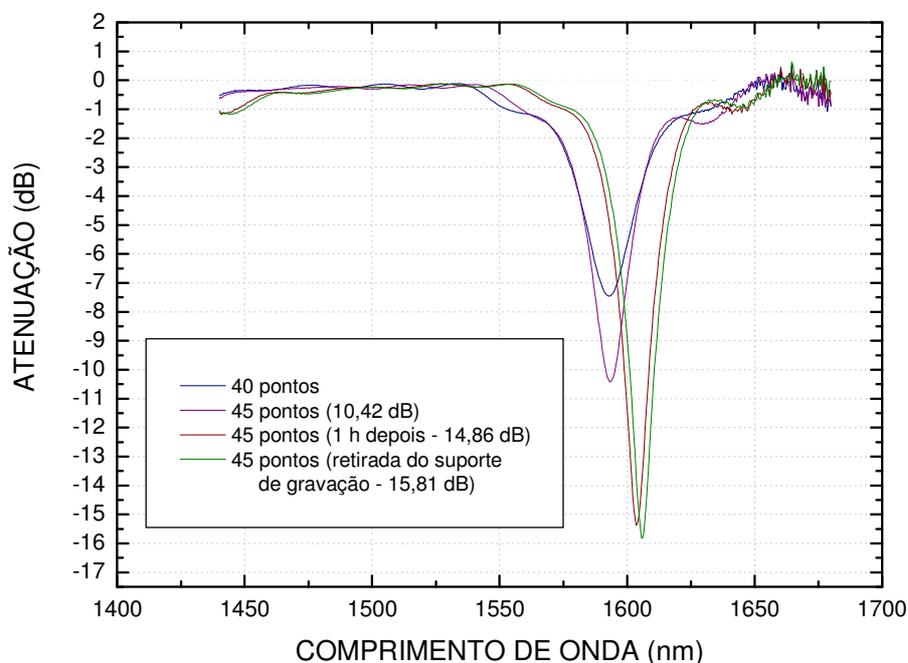


Figura 47: Evolução espectral da LPG4 (gravada em fibra “*Centaurus*”) uma hora depois da gravação.

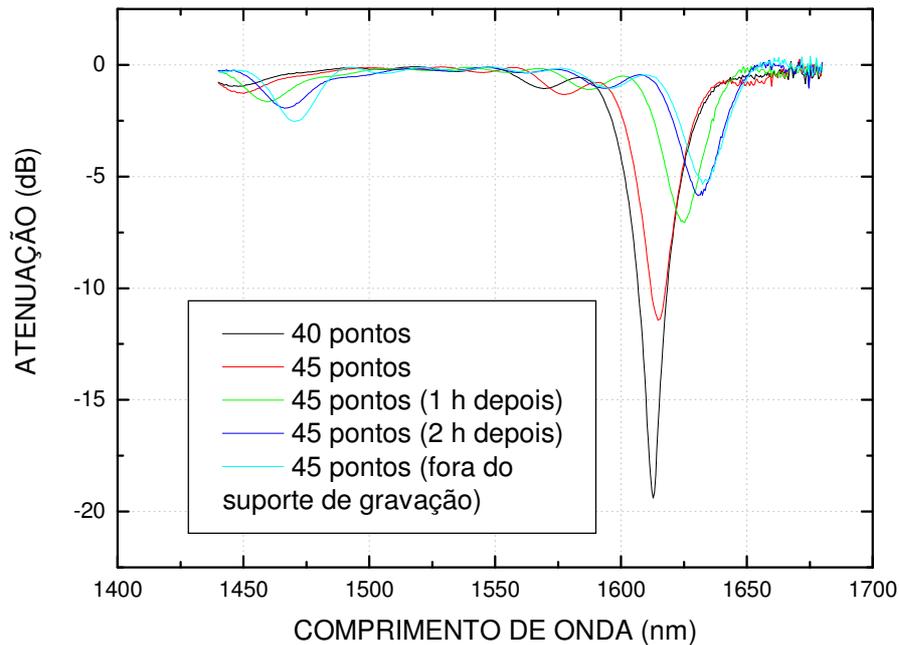


Figura 48: Evolução espectral da LPG7 (gravada em fibra “*Centaurus*”) duas horas depois da gravação.

Já na Figura 48, nota-se que a LPG7 havia atingido a sua eficiência máxima com cerca de 40 pontos nela inscritos. Na continuidade do processo de escrita, a rede passou a perder eficiência até ficar pronta com 45 pontos. Depois de uma e duas horas do encerramento da gravação, o espectro da LPG7 continuou a perder eficiência migrando para regiões de maiores comprimentos de onda. Até mesmo depois de a rede ter sido retirada do suporte de gravação, percebe-se que o processo teria uma continuidade embora não tenham sido mais salvos espectros dessa rede.

Na Figura 49 mostra-se a evolução espectral da LPG13 nas horas que procedem a sua gravação. A primeira gravação em fibra “*Nufern*” que obteve êxito foi a da LPG13. Essa rede mostrou atenuação de somente 1,12 dB no encerramento da fotoinscrição, apesar de ela ter sido gravada com uma fluência de $285,07 \pm 31,36 \text{ mJ/cm}^2$, que é superior a todas as que foram empregadas nas gravações em fibra “*Centaurus*”. A partir da gravação da LPG13 foram empregadas fluências cada vez mais elevadas nas gravações de LPG em fibra “*Nufern*”, conforme os dados apresentados nas Tabelas 2 e 8.

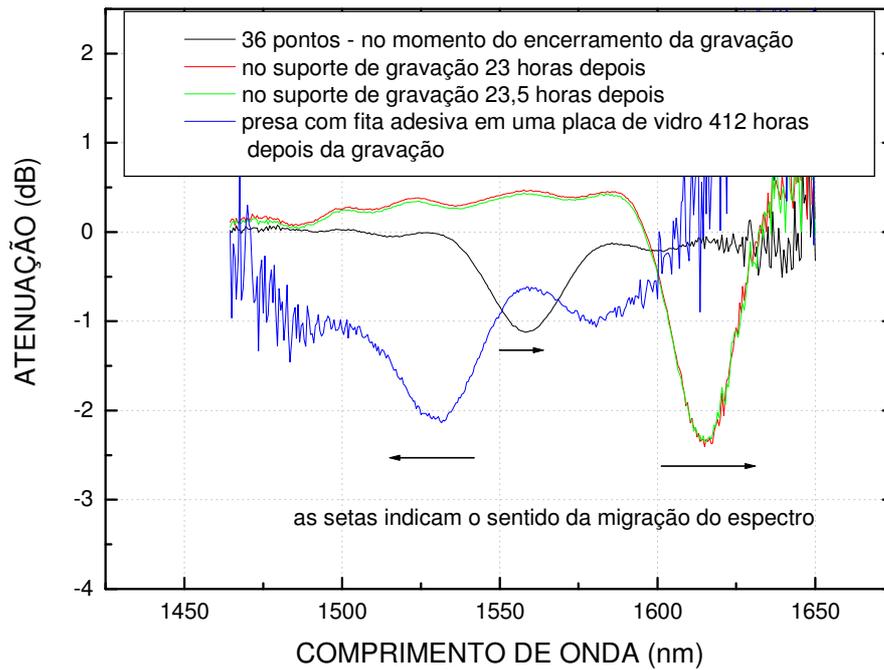


Figura 49: Evolução espectral da LPG13 (gravada em fibra “Nuferr”) depois da gravação.

O espectro da LPG13 foi acompanhado nos horários especificados na Figura 49. Essa rede ficou com 36 pontos, centrada em $1558,70 \pm 0,04$ nm e com largura de banda de $28,67 \pm 0,03$ nm ao final da gravação, posição essa que foi inferior a das demais redes gravadas anteriormente porque o seu período foi de 400 μ m. Vinte e três horas após o término da gravação, a sua atenuação aumentou 110% e a largura de banda diminuiu 22%, apresentando um deslocamento, contado a partir do seu posicionamento ao final da gravação, de cerca de 57 nm no sentido de maiores comprimentos de onda. Após quatrocentas e doze horas percebe-se um deslocamento de cerca de 28 nm no sentido de menores comprimentos de onda, contado a partir do seu posicionamento ao final da gravação, e a sua atenuação estabilizando em 2,10 dB.

Na Figura 50 apresenta-se a evolução espectral da LPG14 nas horas seguintes a sua gravação. No encerramento da fotoinscrição da LPG14, que foi gravada com período de 400 μ m e fluência de $291,90 \pm 32,11$ mJ/cm², foi registrada uma atenuação de 7,30 dB. A LPG14 ficou com 58 pontos e centrada em $1551,61 \pm 0,08$ nm. Após três horas, já fora do suporte de gravação, foi detectado um aumento de 105% na sua atenuação bem como um deslocamento de 24,89 nm do vale de atenuação no sentido de maiores comprimentos de onda.

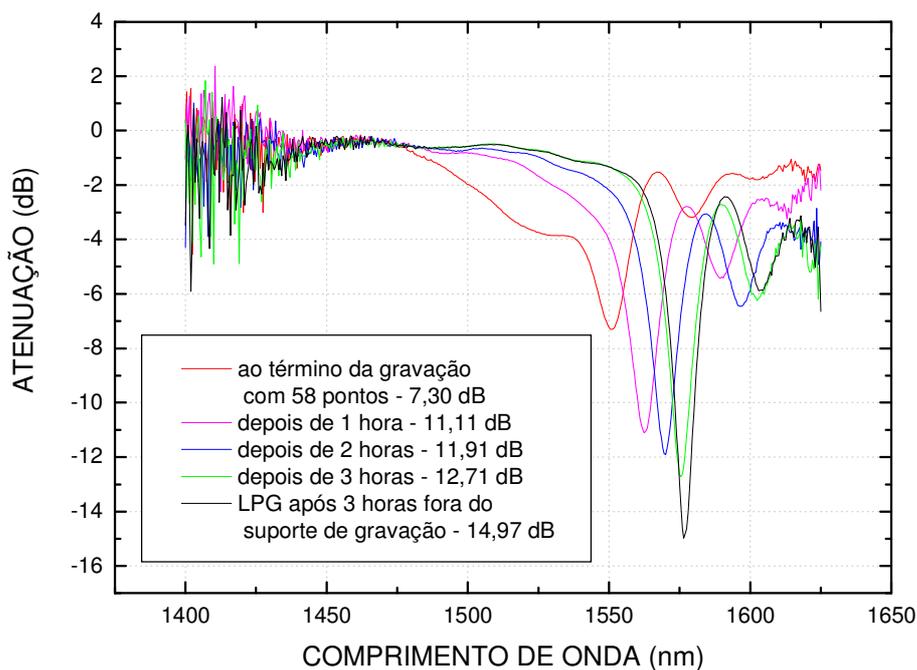


Figura 50: Evolução espectral da LPG14 (gravada em fibra "Nufern") depois da gravação.

Na Figura 51 apresenta-se a evolução espectral da LPG15 uma hora e vinte minutos após o encerramento da gravação. No encerramento da fotoinscrição dessa rede, que foi gravada com período de $407 \mu\text{m}$ e fluência de $301,03 \pm 33,11 \text{ mJ/cm}^2$, foi registrada uma atenuação de 4,40 dB.

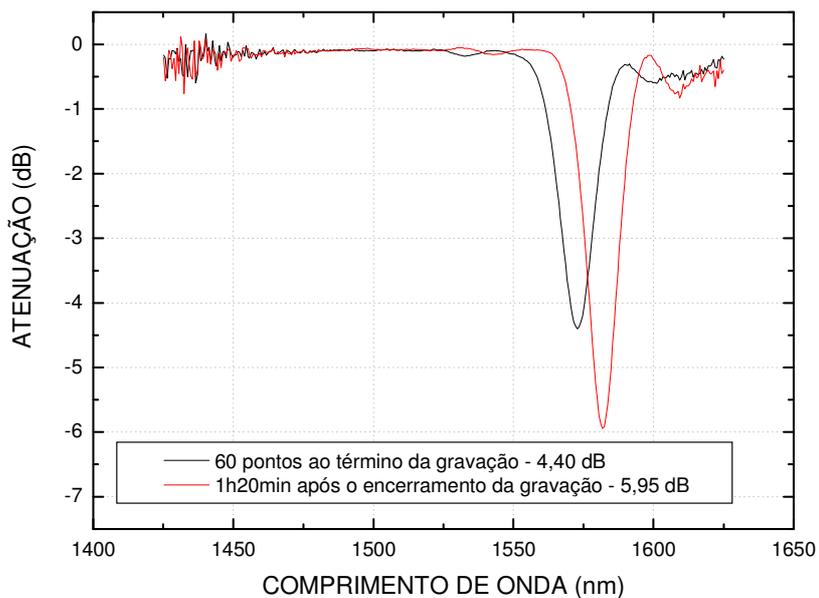


Figura 51: Evolução espectral da LPG15 (gravada em fibra "Nufern") depois da gravação.

A LPG15 ficou com 60 pontos e centrada em $1572,70 \pm 0,02$ nm. Uma hora e vinte minutos depois da coleta do espectro correspondente ao último ponto gravado houve um deslocamento de 9,10 nm no sentido de maiores comprimentos de onda bem como um aumento de 1,55 dB na atenuação.

A explicação para esses acontecimentos já havia sido dada por Guan e seus colaboradores em 2000 ao observarem o crescimento de LPGs em fibras hidrogenadas depois da inscrição com um laser de ArF, operando a 193 nm. A explicação dos pesquisadores para esse fenômeno é a difusão de hidrogênio no núcleo e na casca da fibra. Em uma LPG gravada oticamente, há claramente regiões que são expostas à radiação UV e regiões que não são expostas à radiação UV durante a inscrição da rede. A concentração de hidrogênio na região exposta do núcleo é muito menor que a concentração na região não exposta, porque parte do hidrogênio foi usado na reação que provoca a modulação do índice de refração. Além disso, a forte absorção de radiação UV pelo núcleo é capaz de elevar a sua temperatura acima dos 200°C, provocando uma rápida difusão de hidrogênio para dentro da região exposta do núcleo. O hidrogênio que difunde para a região exposta do núcleo é proveniente tanto da casca da fibra quanto das regiões do núcleo que não foram expostas à radiação UV. Pode-se ignorar o efeito da luz UV na região exposta da casca da fibra, porque a radiação transmitida através da sílica fundida da casca é tipicamente maior do que 99,9 %. Além disso, a concentração de hidrogênio na região não exposta do núcleo e na casca permanece aproximadamente constante depois de acabar a gravação. Para haver uma restituição de equilíbrio na concentração de hidrogênio, as moléculas desse gás são difundidas tanto das regiões do núcleo que não foram expostas, quanto da casca para as regiões expostas do núcleo, bem como para o meio ambiente. Enquanto estiver acontecendo essa migração de hidrogênio para a região do núcleo exposta à radiação UV, a modulação do índice de refração continua a acontecer e a eficiência da rede pode crescer ou decrescer. O processo de modulação de índice continua até que a concentração de hidrogênio nas regiões do núcleo expostas e não expostas seja igual. Esse processo levou cerca de 20 horas, no trabalho de Guan, enquanto o espectro migrou para maiores comprimentos de onda (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Essa migração para maiores comprimentos de onda está de acordo com a Equação 37, já que o índice de refração médio efetivo da casca diminui nas primeiras horas que sucedem a gravação, devido ao processo de difusão de H₂. De acordo com o trabalho de Guan, nas 420 horas que sucederam a estabilização da concentração do H₂ no núcleo, o hidrogênio molecular remanescente lentamente foi difundido para fora da fibra. O processo de modulação de índice parou de acontecer, bem como as alterações de eficiência da rede, mas os picos de ressonância da rede deslocaram-se para menores comprimentos de onda (GUAN, TAM, HO *et al*,

2000). Esse deslocamento para menores comprimentos de onda está de acordo com a Equação 37, já que o índice de refração médio efetivo do núcleo diminui devido à difusão do H_2 remanescente do mesmo.

As Figuras 52, 53 e 54, são relativas ao acompanhamento da banda de menor atenuação da LPG9 (gravada em fibra “*Centaurus*”) ao longo de algumas horas após a sua gravação.

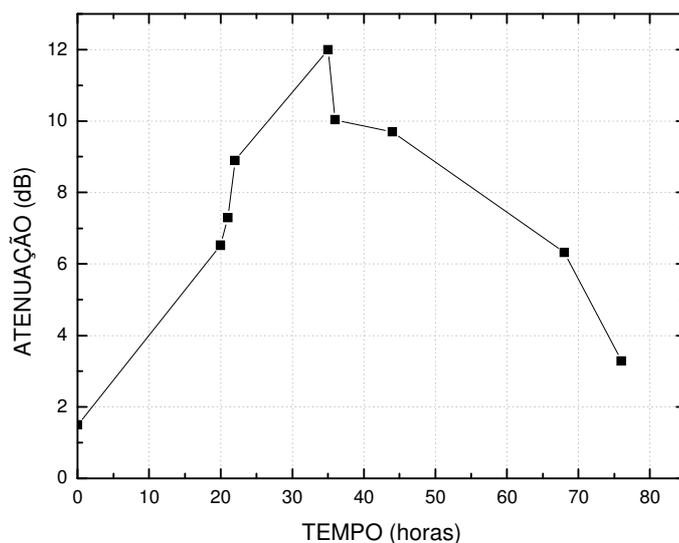


Figura 52: Acompanhamento da atenuação da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.

Percebe-se na Figura 52, aproximadamente até 35 horas depois da rede ter sido gravada um aumento da eficiência dessa banda. Pela Figura 53 percebe-se que a largura de banda diminui exatamente nas horas nas quais a eficiência aumenta. Na Figura 54 vemos que houve um deslocamento espectral para maiores comprimentos de onda nas primeiras 35 horas que seguem a gravação. Depois de 35 horas, a eficiência da rede começou a diminuir, havendo o re-acoplamento da potência ótica da casca para o núcleo e o deslocamento espectral foi direcionado para regiões de menores comprimentos de onda. Isso já é devido à lenta difusão de hidrogênio para o meio externo. Essas observações estão de acordo com o trabalho de Guan e seus colaboradores (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000).

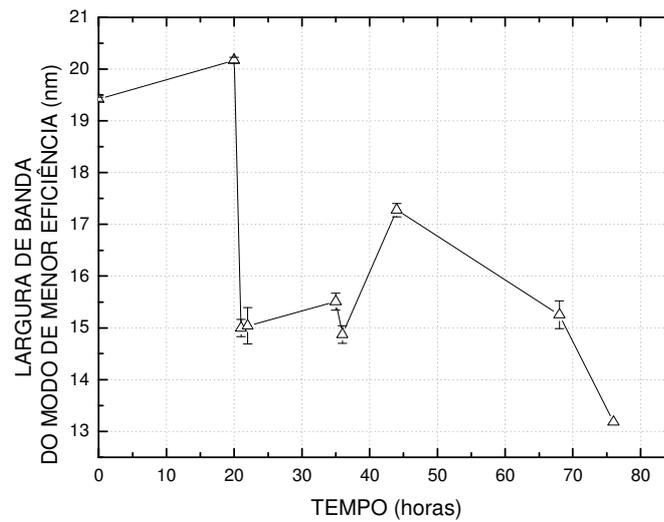


Figura 53: Acompanhamento da largura de banda da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.

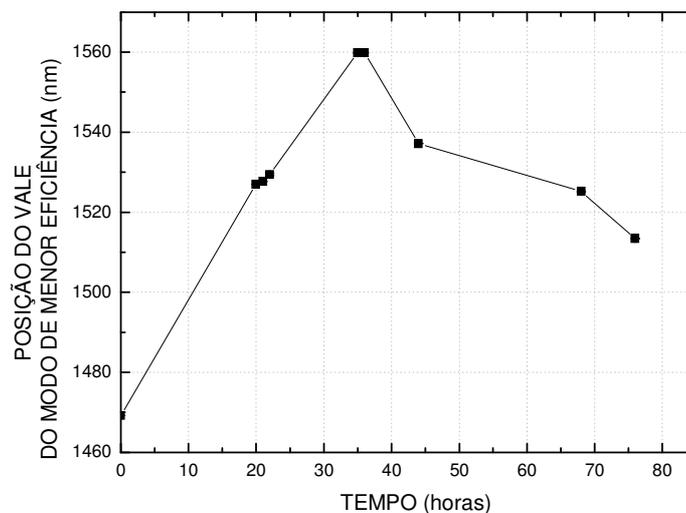


Figura 54: Acompanhamento da posição do vale da banda de menor eficiência da LPG9 após a gravação.

Nas Figuras 55, 56 e 57 aparece a evolução espectral da LPG10 (gravada em fibra “*Centaurus*”) ao longo de 595 horas. O acompanhamento da LPG10 foi contínuo durante 26 horas, enquanto o seu espectro se manteve dentro da região do LED. Entre a 26^a e a 70^a hora o espectro não foi visível porque havia migrado para a região espectral de ruído. Somente depois de 70 horas é que o espectro pode ser detectado novamente e assim deu-se continuidade ao acompanhamento.

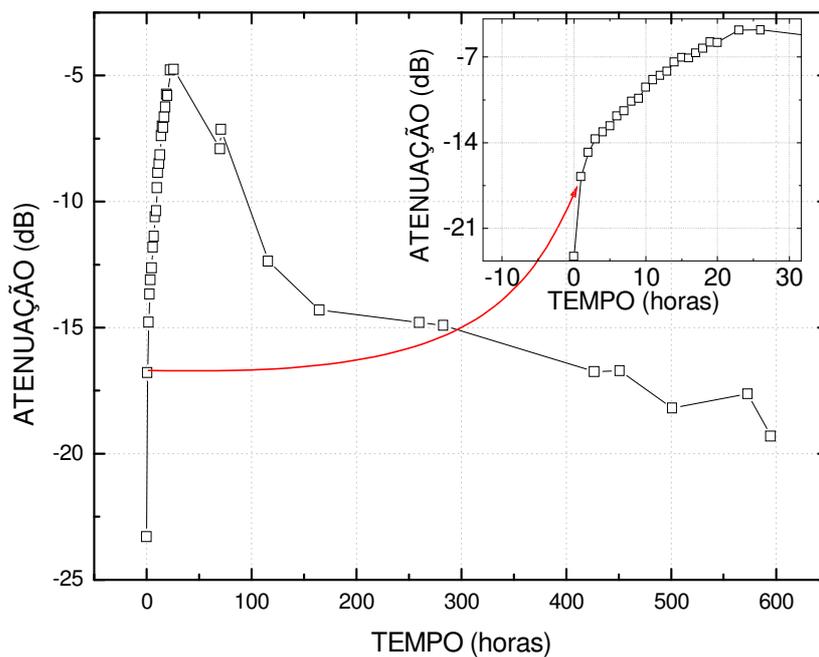


Figura 55: Acompanhamento da evolução da atenuação do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 26 horas.

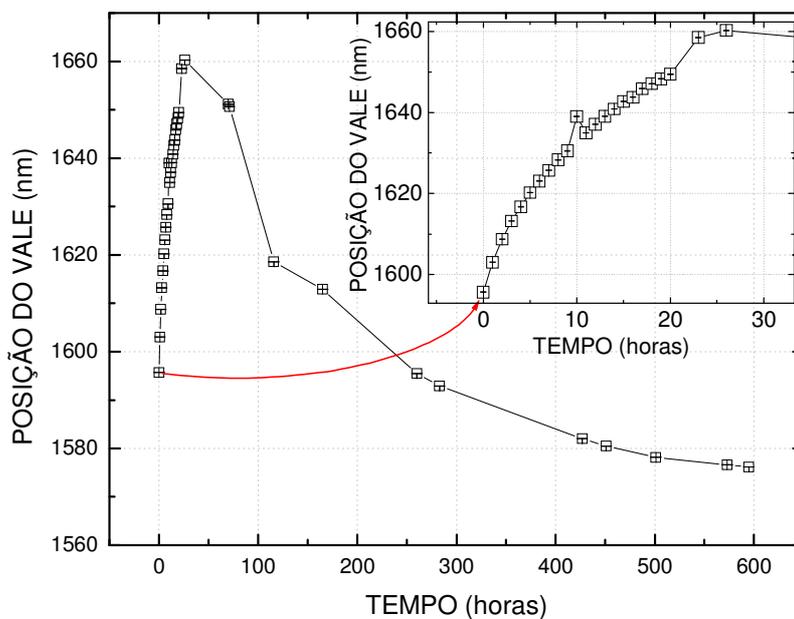


Figura 56: Acompanhamento da evolução da posição do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 26 horas.

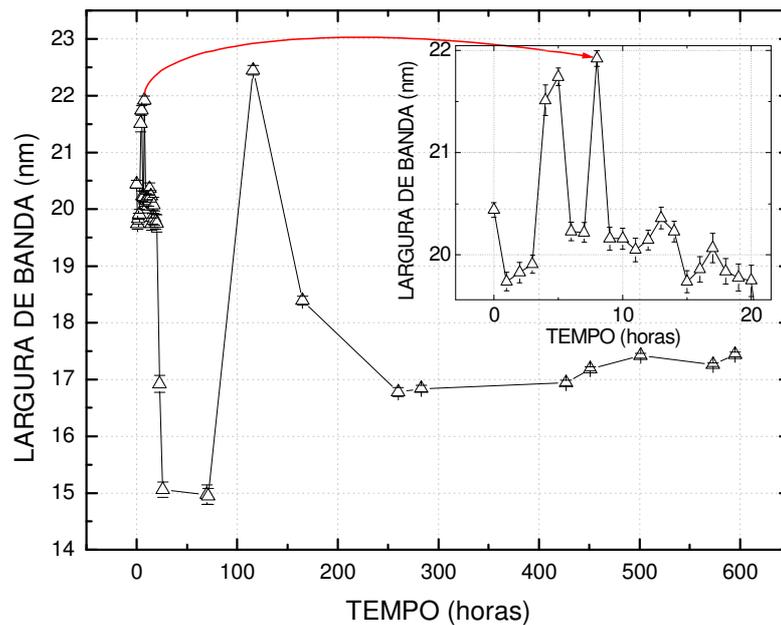


Figura 57: Acompanhamento da evolução da largura à meia altura do vale de ressonância da LPG10. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 20 horas

Pela Figura 55 observa-se um decaimento na atenuação da LPG10 nas primeiras 26 horas após a gravação. Esse decaimento é explicado pela difusão de hidrogênio molecular que provoca alterações na modulação do índice de refração. Esse processo de difusão inicialmente é rápido e ocorre tanto da região não exposta do núcleo, quanto da casca, para a região exposta do núcleo, provocando o re-acoplamento da potência ótica da casca para o núcleo (LEMAIRE, VENGSARKAR, REED, *et al*, 1995; VENGSARKAR, LEMAIER, JUDKINS, 1996). Essa queda da atenuação, ou aumento da transmitância, também está de acordo com a Equação 38, que apresenta um comportamento cossenoidal para essa grandeza física (STARODUBOV, GRUBSKY e FEINBERG, 1998). A rápida difusão de H_2 nas primeiras horas diminui o índice de refração médio efetivo da casca e, de acordo com a Equação 37, isso provoca um deslocamento espectral para maiores comprimentos de onda, conforme se pode observar na Figura 56. Quando a concentração de hidrogênio entre as regiões expostas e as não expostas do núcleo atinge o equilíbrio, acontece uma lenta difusão de hidrogênio dessas duas regiões para a casca, mas essa difusão é bem mais lenta porque o volume do núcleo é bem menor do que o da casca. Durante esse período a taxa de difusão de hidrogênio tanto da região exposta quanto da não exposta do núcleo é

igual e não provoca mudanças rápidas na modulação do índice de refração, mas apenas o deslocamento do espectro no sentido de menores comprimentos de onda (GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Após a 70ª hora de acompanhamento da LPG10 o comprimento de onda deslocou-se no sentido de menores valores, conforme o H₂ difundiu do núcleo para a casca, reduzindo o índice de refração médio efetivo do núcleo, em conformidade com a Equação 37. A eficiência lentamente aumentou, porque o acoplamento da potência ótica voltou a acontecer do núcleo para a casca, e a taxa desse aumento de eficiência está relacionada com o lento processo de difusão do H₂ remanescente no núcleo. O comportamento complexo para a largura de banda, apresentado na Figura 57, resultou dos efeitos de difusão de hidrogênio molecular das regiões não expostas para as expostas do núcleo bem como da difusão da concentração de H₂ da casca.

Os espectros da LPG11 (gravada em fibra “*Centaurus*”) aparecem nas Figuras 58, 59 e 60. A LPG11 foi gravada com 35 pontos propositalmente. A intenção era a de não atingir a eficiência máxima da rede durante a gravação, permitindo que ela fosse atingida depois do encerramento da exposição com UV. O acompanhamento dos espectros durante um tempo de 500 horas possibilitou uma ilustração detalhada da posição do pico de ressonância, largura de banda e posição espectral da LPG11. O acompanhamento da LPG11 foi contínuo durante 17 horas, enquanto o seu espectro se manteve dentro da região do LED. Entre a 17ª e a 43ª hora o espectro não foi visível porque havia migrado para a região espectral de ruído. Somente depois de 43 horas é que o espectro pode ser detectado novamente e assim deu-se continuidade ao acompanhamento.

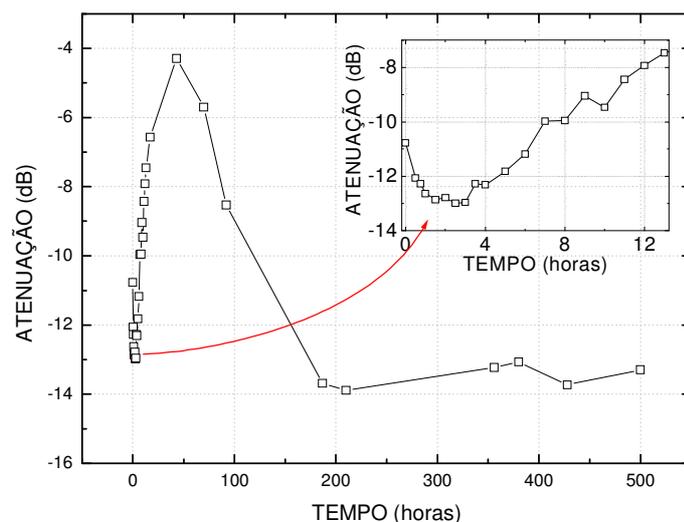


Figura 58: Acompanhamento da evolução da atenuação do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 13 horas.

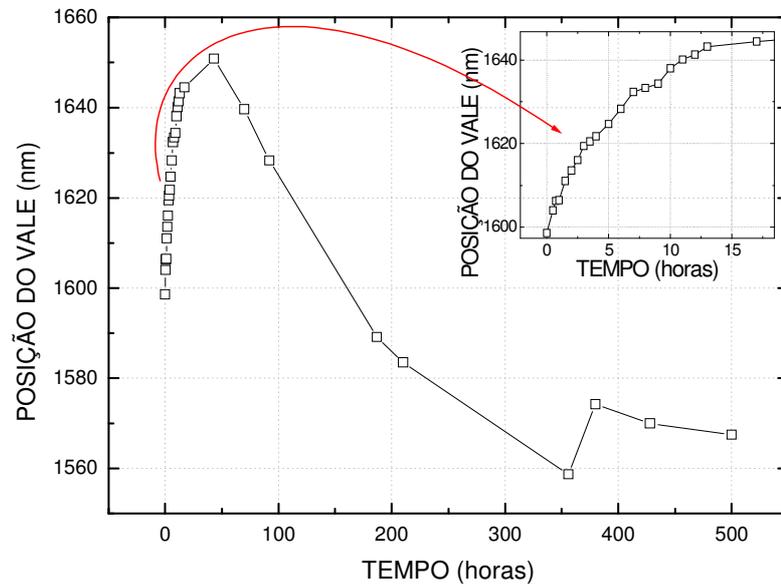


Figura 59: Acompanhamento da evolução da posição do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 17 horas.

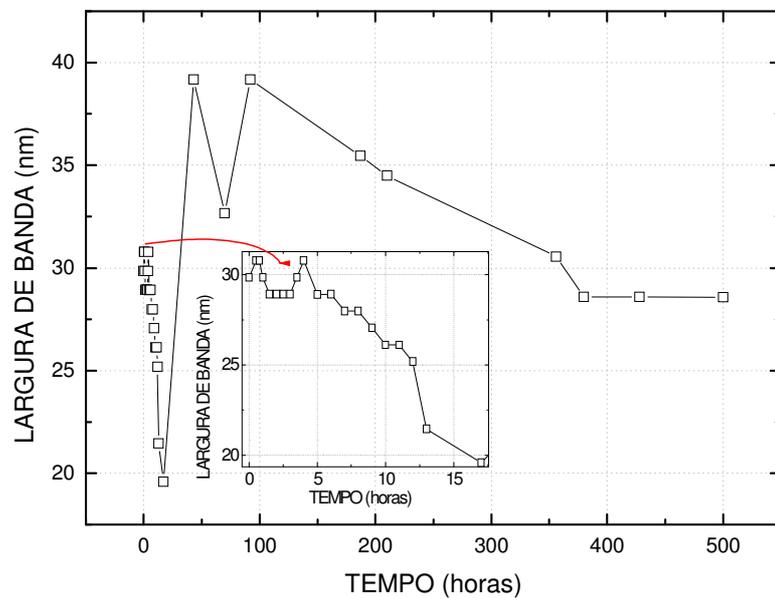


Figura 60: Acompanhamento da evolução da largura à meia altura do vale de ressonância da LPG11. No detalhe aparecem os pontos experimentais relativos às primeiras 17 horas.

Pela Figura 58 observa-se que a atenuação da LPG11 continuou a aumentar nas primeiras duas horas e trinta minutos após a gravação. Nesse período a atenuação da rede cresceu 2,19 dB. Esse crescimento rápido da atenuação, como no caso da LPG10, é explicado pela difusão de H_2 tanto da região não exposta do núcleo, quanto da casca, para a região exposta do núcleo, que aumenta o índice de refração, só que provocando o acoplamento da potência ótica do núcleo para a casca nas primeiras duas horas e trinta minutos. O deslocamento do vale principal de atenuação, de acordo com os dados apresentados na Figura 59, ocorreu no sentido de maiores comprimentos de onda durante as primeiras dezessete horas de acompanhamento, em conformidade com a Equação 37, devido à redução do índice de refração médio efetivo da casca provocada pela difusão de H_2 . Essa migração do espectro, juntamente com um aumento inicial da atenuação da rede ao término da gravação, seguida de uma queda nesse parâmetro depois de duas horas e trinta minutos, mostrou que a difusão do hidrogênio molecular, das regiões do núcleo não expostas, bem como da casca, para as regiões do núcleo expostas à radiação UV, continuou a provocar a modulação do índice de refração, conforme já era esperado (JANG, KIM, SHIN *et al*, 1999; GUAN, TAM, HO *et al*, 2000). Quando a atenuação da LPG11 passou a diminuir ocorreu o re-acoplamento da potência ótica para o núcleo, conforme foi previsto por Starodubov e colaboradores (STARODUBOV, GRUBSKY, FEINBERG, 1998). O comportamento complexo para a largura de banda, apresentado na Figura 60, como no caso da LPG10, resultou dos efeitos de difusão de hidrogênio molecular das regiões não expostas para as expostas do núcleo bem como da difusão da concentração de H_2 da casca. Depois de 43 horas, analisando a Figura 59, o deslocamento do espectro no sentido de menores comprimentos de onda, de acordo com a Equação 37, foi devido à redução do índice de refração médio efetivo do núcleo. Conforme já foi comentado anteriormente, quando a concentração de H_2 atinge o equilíbrio entre as regiões expostas e as não expostas do núcleo a difusão do H_2 dá-se do núcleo para a casca e isso reduz o índice médio efetivo do núcleo. Ainda para intervalos de tempo maiores do que 43 horas pode-se observar o aumento da atenuação da rede bem como a diminuição da largura de banda espectral, de acordo com as Figuras 58 e 60.

De acordo com Bhatia, as bandas de ressonância podem migrar algumas centenas de nanômetros no sentido de maiores comprimentos de onda, dependendo da sua concentração residual de hidrogênio e da ordem do modo de casca envolvido no acoplamento. O processo de difusão do hidrogênio para o meio externo é lento em temperatura ambiente e requer centenas de horas para ser finalizado (BHATIA, 1996), conforme se pode comprovar pelas Figuras 55, 56, 57, 58, 59 e 60. Após todo o processo de difusão de hidrogênio molecular estar completo, os coeficientes de acoplamento da LPG10 e da LPG11 foram determinados com os resultados das

Figuras 56, 57, 59 e 60 e o auxílio da Equação 39. Constatou-se que houve uma redução de 89% e 76% no coeficiente de acoplamento da LPG10 e LPG11, respectivamente (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009).

Nas redes LPG10 e LPG11 fez-se a monitoração do vale de maior atenuação enquanto ele não passou para fora da região espectral do LED. Como a rede foi mantida em temperatura ambiente, pequenas alterações nos valores seriam justificadas também pelas oscilações de temperatura apresentadas nas Tabelas 5 e 6.

Bhatia, em sua tese de doutoramento, havia feito o acompanhamento da posição espectral de redes gravadas em fibras hidrogenadas. Ele fez um acompanhamento por 500 horas, em intervalos descontínuos de tempo. Em suas observações, as bandas de ressonância deslocaram-se cerca de 50 a 100 nm no sentido de menores comprimentos de onda, em relação a sua posição correspondente no término da gravação. As redes só estabilizavam-se após algumas semanas. Segundo esse pesquisador, o hidrogênio deve ser removido da fibra através de “*annealing*” a altas temperaturas (em média 150°C) para acelerar a estabilização da LPG (BHATIA, 1996).

O lento processo de estabilização de redes de período longo escritas com radiação UV em fibras hidrogenadas, que ficou evidenciado através do acompanhamento da evolução espectral de algumas redes gravadas tanto em fibras “*Centaurus*” quanto em fibras “*Nufern*”, é prejudicial para a aplicação desses dispositivos no monitoramento de parâmetros físico-químicos. Nas seções 4.3.6, 4.3.7 e 4.3.8 são apresentados os processos de estabilização que foram empregados para solucionar esse problema.

4.3 RESULTADOS DAS CARACTERIZAÇÕES DAS REDES

4.3.1 Resultados da Caracterização quanto ao Índice de Refração

Nas redes gravadas que apresentaram dois vales de atenuação, correspondentes a distintos modos de casca (BHATIA, 1996), procuraram-se monitorar somente os vales de maior atenuação na caracterização quanto ao índice, porque os vales de menor atenuação deslocavam-se para a região do ruído quando os fluidos entravam em contato com as LPGs. No Anexo 4 encontram-se os gráficos relativos aos ajustes feitos com a Equação 47, de Chiang (CHIANG, LIU, NG *et al*, 2000), para a resposta de cada LPG a diferentes índices de refração do meio externo. Através da raiz de Bessel, u_{∞} , determinada no ajuste, foi possível encontrar o modo de casca linearmente polarizado

LP_{0n} para o qual a radiação estava sendo acoplada em cada rede (SPIEGEL, 1973). A raiz da função de Bessel J₀ mais próxima dos valores encontrados no ajuste, u_{∞} é 14,9309 e corresponde ao modo de casca de 5ª ordem (LP₀₅). A Tabela 10 apresenta esses resultados. Os parâmetros fixos nesse ajuste foram o período das redes ($\Lambda = 407\mu\text{m}$), o índice de refração do ar que foi o primeiro meio externo ($n_{ex} = 1,000$) e o raio da casca ($\rho = 62,5\mu\text{m}$). Os parâmetros variáveis foram a raiz da função de Bessel (u_{∞}), o comprimento de onda de ressonância inicial no ar (λ_0) e o índice de refração da casca (n_{ca}) que precisou ser ajustado para o infravermelho. O índice de refração médio da casca da fibra, calculado através dos ajustes apresentados no Anexo 4, foi de $1,4441 \pm 0,0012$.

Tabela 10: Modo de casca linearmente polarizado, LP₀₅, para o qual aconteceu o acoplamento em cada LPG.

rede	nº de pontos	fibra	fluência do laser estimada sobre a rede (mJ/cm ²)	raiz obtida nos ajustes com a Equação 47 (u_{∞})	modo de casca correspondente
LPG1	45	“Centaurus”	278,65 ± 30,65	16,36 ± 1,21	5°
LPG2	45	“Centaurus”	243,71 ± 26,81	15,58 ± 1,77	5°
LPG3	45	“Centaurus”	209,82 ± 23,08	15,87 ± 1,10	5°
LPG4	45	“Centaurus”	185,68 ± 20,42	13,94 ± 0,69	5°
LPG5	45	“Centaurus”	137,40 ± 15,11	16,33 ± 1,37	5°
LPG6	45	“Centaurus”	233,95 ± 25,73	15,67 ± 1,41	5°
LPG8	45	“Centaurus”	252,49 ± 27,77	15,57 ± 1,41	5°
LPG9	45	“Centaurus”	234,42 ± 25,79	15,74 ± 0,46	5°
LPG10	45	“Centaurus”	207,03 ± 22,77	15,52 ± 0,87	5°
LPG11	35	“Centaurus”	185,68 ± 20,42	16,24 ± 1,45	5°

As redes gravadas com arco elétrico, no Laboratório de Laser da UTFPR, apresentaram os acoplamentos do modo fundamental de núcleo para o 4º modo de casca, detectando-se uma variação de 8 nm com a modificação do índice de refração de 1,333 para 1,426 (FALATE, FUGIHARA, MULLER 2002). Isso representa uma sensibilidade ao índice de refração do meio externo menor do que a das redes gravadas óticamente ponto-a-ponto. Quanto maior é a ordem do modo de casca para o qual ocorre o acoplamento, mais próxima da interface casca-meio externo fica a distribuição radial do campo eletromagnético transversal à fibra. Isso significa que, na faixa espectral que foi estudada, as redes gravadas com UV apresentam uma interação maior com o meio externo do que as redes gravadas com arco elétrico e conseqüentemente uma maior sensibilidade à alteração desse meio.

A Tabela 11 apresenta os deslocamentos espectrais relativos à posição do vale de ressonância, em relação ao ar, de cada uma das redes de período longo, que foram caracterizadas quanto ao índice de refração, para cada amostra de fluidos. No Anexo 4 estão apresentados os valores das sensibilidades das LPGs ao índice de refração do meio ar ($n = 1,0000$) e do meio querosene ($n = 1,4315$), que foram os meios nos quais as redes apresentaram a menor e a maior sensibilidade ao índice de refração. Em todas as redes observa-se um aumento de sensibilidade ao índice à medida que o índice de refração do meio aumenta.

Tabela 11: Deslocamentos espectrais das LPGs, relativos ao ar, para diferentes amostras.

rede	deslocamentos (nm)				
	água n = 1,3213	etanol n = 1,3460	tíner n = 1,4145	aguarrás n = 1,4202	querosene n = 1,4315
LPG1	-2,60	-4,06	-11,09	-14,34	-20,46
LPG2	-3,11	-4,35	-11,10	-15,45	-20,37
LPG3	-3,23	-4,31	-11,15	-14,64	-20,78
LPG4	-2,69	-4,06	-9,38	-11,82	-18,00
LPG5	-3,11	-4,15	-11,12	-14,94	-20,91
LPG6	-3,55	-4,15	-11,21	-15,26	-21,20
LPG8	-3,44	-4,60	-11,57	-15,51	-20,83
LPG9	-3,31	-4,61	-12,32	-14,01	-20,15
LPG10	-3,31	-4,29	-11,08	-14,07	-19,74
LPG11	-3,25	-4,08	-10,70	-14,65	-20,53

4.3.2 Resultados da Caracterização com o Elemento *Peltier*

Nessa seção está apresentado o primeiro resultado de caracterização térmica que foi realizado com as LPGs gravadas. A caracterização foi realizada com o aquecimento e resfriamento das redes, em contato com um Elemento *Peltier*, e as mesmas não haviam passado por nenhum processo prévio de estabilização térmica. A máxima temperatura empregada nesse experimento foi de 61,1°C, de modo a promover a estabilização dos defeitos fotoinduzidos e termicamente instáveis até essa temperatura. As redes utilizadas nesse experimento foram a LPG9 e a LPG11, ambas escrita em fibras “*Centaurus*”. Essas duas redes foram submetidas a três ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento. O intervalo de temperatura para os ciclos da LPG9 estava compreendido entre 8,7° e 60,8°C. Para a LPG11, a mínima temperatura atingida nesses ciclos foi de -1,5°C e a máxima foi de 61,1°C.

Após a LPG9 passar pelos três ciclos de aquecimento e resfriamento ela foi instalada na montagem apresentada na seção 3.3.3 para a caracterização térmica da sua sensibilidade ao índice de refração do meio externo. Os resultados dos experimentos realizados com essa rede estão nas seções 4.3.3 e 4.3.4 deste capítulo.

Na presente seção, estão os resultados da caracterização térmica da LPG11 com o uso do elemento *Peltier*. No segundo ciclo de aquecimento dessa rede somente os espectros relativos às quatro primeiras temperaturas foram salvos, os demais foram perdidos por falha técnica no controle de medição. A Figura 61 apresenta a evolução do comprimento de onda em função da temperatura nos três ciclos de aquecimento e resfriamento.

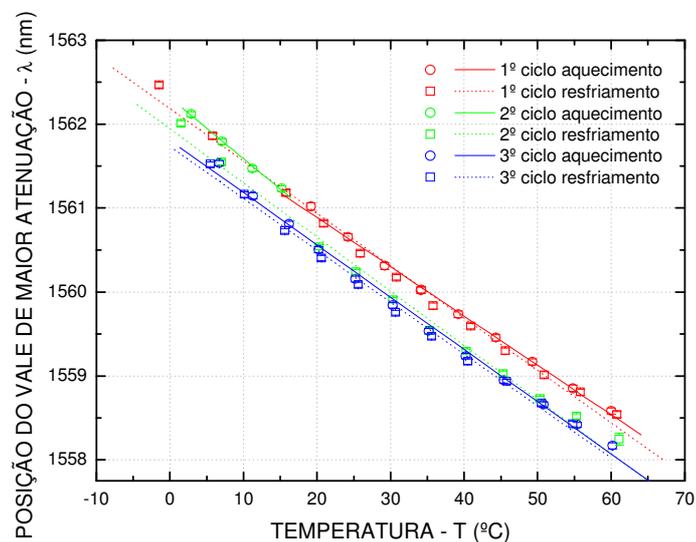


Figura 61: Caracterização da LPG11 com o elemento *Peltier* em três ciclos de aquecimento e resfriamento.

Foi realizado um ajuste linear, $\lambda = A + B \cdot T$, para os pontos experimentais dos três ciclos de aquecimento e de resfriamento. Os resultados desse ajuste estão apresentados na Tabela 12. Em todos os ciclos de aquecimento e resfriamento percebeu-se um desvio da posição espectral do vale de atenuação da rede, pelos coeficientes lineares. Esse desvio foi maior no segundo ciclo, surgindo um deslocamento para menores comprimentos de onda. Pelos coeficientes lineares vemos que o maior desvio, relativo ao 2º ciclo, foi de $-0,40$ nm. No último ciclo o coeficiente angular teve pouca variação (de $-62,30 \pm 1,39$ pm/°C para $-61,86 \pm 1,48$ pm/°C) do aquecimento para o resfriamento. Comparada à sensibilidade térmica de redes gravadas com arco elétrico, quando submetidas a

caracterizações na faixa de 21° a 63°C, a sensibilidade da LPG11 apresentou-se negativa e em média 1,47 e 1,36 vezes menor do que a de redes gravadas com esse método, nos processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente. As sensibilidades de redes gravadas com arco elétrico e períodos de 589 μm , 649 μm e 668 μm , foram positivas e iguais a 102 e 78 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, 98 e 81 $\text{pm}/^\circ\text{C}$ e 76 e 94 $\text{pm}/^\circ\text{C}$, nos processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente (FALATE, FUGIHARA, MULLER, 2002).

Tabela 12: Resultados de ajuste linear nos pontos experimentais dos três ciclos de aquecimento e resfriamento no elemento *Peltier*.

ciclo	Ajuste linear $\lambda = A + B*T$,	
	A (coeficiente linear) (nm)	B (coeficiente angular) ($\text{pm}/^\circ\text{C}$)
1ºaquecimento	1562,07 \pm 0,04	- 58,90 \pm 1,03
1ºresfriamento	1562,19 \pm 0,06	- 62,42 \pm 1,61
2ºaquecimento	1562,31 \pm 0,03	- 72,59 \pm 3,12
2ºresfriamento	1561,91 \pm 0,08	- 63,09 \pm 2,05
3ºaquecimento	1561,81 \pm 0,05	- 62,30 \pm 1,39
3ºresfriamento	1561,74 \pm 0,05	- 61,86 \pm 1,48

Para constatar se a LPG11 atingiu a estabilidade térmica ou não, foi feito um levantamento das eficiências dessa rede, em dB, antes e depois de cada ciclo de aquecimento e resfriamento. Os resultados desse levantamento estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13: Levantamento da eficiência da LPG11 antes e depois de cada ciclo de aquecimento e resfriamento no elemento *Peltier*.

ciclos	antes do aquecimento		após o resfriamento		perda de eficiência por ciclo (dB)
	eficiência (dB)	temperatura ($^\circ\text{C}$)	eficiência (dB)	temperatura ($^\circ\text{C}$)	
1º	12,66	19,2	11,82	-1,5	0,84
2º	11,80	2,9	11,63	1,5	0,17
3º	11,69	6,7	11,57	5,5	0,12

Na Figura 62 estão plotadas as eficiências a cada ciclo. Foi feito um ajuste exponencial desses pontos no qual se constatou, pelo comportamento da curva, que a amplitude da LPG11 já

estava atingindo a estabilidade. A equação utilizada no ajuste da Figura 62 é uma exponencial de 2ª ordem, pelo fato dessa equação ter se ajustado melhor aos pontos experimentais, denominada de Equação 54:

$$y = A_1 e^{\left(-\frac{x}{t_1}\right)} + A_2 e^{\left(-\frac{x}{t_2}\right)} + y_0 \quad (54)$$

na qual as variáveis y e x representam, respectivamente, a eficiência da rede e os ciclos de aquecimento e resfriamento. As constantes A_1 , A_2 , t_1 , t_2 e y_0 foram determinadas pelo ajuste e aparecem na Figura 62.

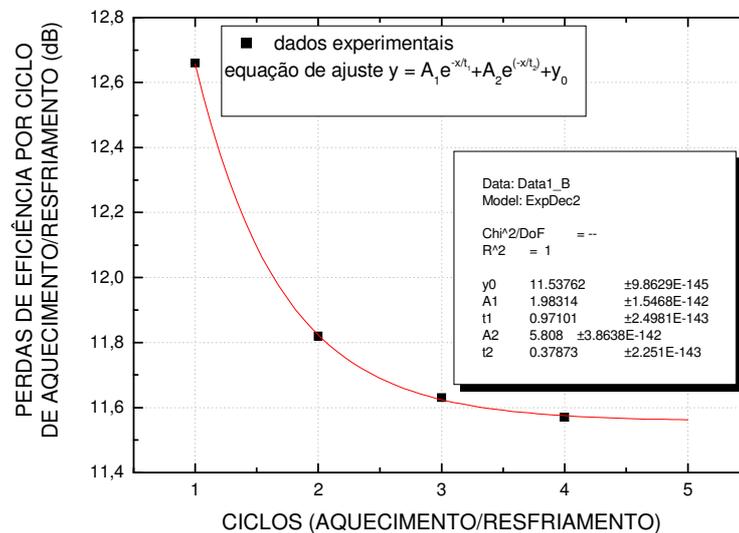


Figura 62: Ajuste exponencial da evolução das perdas de eficiência da LPG11 em função dos ciclos de aquecimento/resfriamento no elemento *Peltier*.

Bhatia estudou a sensibilidade térmica de LPGs induzidas com UV e gravadas com período de 280 μm com máscara de amplitude, em fibras “*Corning SMF-28*”, aquecendo-as até 160°C e posteriormente resfriando-as lentamente, por um período de 90 minutos, até a temperatura ambiente. Ele acompanhou quatro bandas de uma LPG, encontrando experimentalmente os valores de 0,093 nm/°C, 0,049 nm/°C, 0,042 nm/°C e 0,039 nm/°C, respectivamente, para a sensibilidade térmica de cada banda. A sensibilidade da banda de ordem mais elevada, 0,093 nm/°C, foi praticamente uma ordem de magnitude maior do que a da sensibilidade de FBGs. Uma pequena não linearidade foi observada nos deslocamentos em comprimento de onda das bandas. Esse efeito foi

atribuído à dependência do coeficiente termo-ótico do núcleo e da casca com a temperatura (BHATIA, 1996).

4.3.3 A Caracterização Térmica da LPG9 quanto ao Índice de Refração do Meio Externo

A LPG9 foi a rede instalada na montagem descrita na seção 3.3.3 do Capítulo 3. A Figura 63 (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007) mostra duas curvas. O eixo da esquerda contém as ordenadas relativas à curva de cor vermelha. Para essa curva ser ajustada aos pontos experimentais, relativos aos picos dos vales de atenuação dos espectros da LPG9 imersa nas seis amostras a 21°C, foi feito o uso da função de Chiang e colaboradores (CHIANG, LIU, NG *et al*, 2000), representada pela Equação 47. Os valores do índice de refração das seis substâncias utilizadas foram corrigidos para a faixa do espectro infravermelho. Os parâmetros fixos usados foram $\Lambda = 407 \mu\text{m}$, $n_{\text{ext}} = 1,000$ (ar), $\rho = 62,5 \mu\text{m}$; os parâmetros variáveis foram u_{∞} , λ_0 e n_{ct} . Encontrou-se a raiz da função de Bessel igual a $16,73 \pm 1,90$. Pelo erro do ajuste esse valor está situado entre a quinta e a sexta raiz de Bessel de ordem zero, cujos valores são 14,931 e 18,071. No limite inferior da raiz obtida ($16,73 - 1,90 = 14,83$) há uma aproximação maior do 5º modo de casca (LP₀₅), que coincide com o resultado da análise ao índice de refração dessa mesma rede apresentado na seção 4.3.1.

O eixo da direita da Figura 63 contém as ordenadas relativas à curva de cor preta. Essa curva representa a derivada da Equação 47, e é denominada de Equação 48, com respeito ao índice de refração do meio externo, na qual é determinada a sensibilidade ao índice de refração (RIS – *Refractive Index Sensitivity*) da LPG. A Tabela 14 apresenta a sensibilidade ao índice de refração (RIS) das seis amostras utilizadas. Um aumento de aproximadamente 163 vezes, nessa sensibilidade, é encontrado quando o índice de refração muda de 1,000 (ar) para 1,4315 (querosene).

A Figura 64 (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007) mostra as mudanças em comprimento de onda dos vales de atenuação, ou picos de perdas de transmitância, da LPG imersa nas seis amostras submetidas às variações de temperatura (lembrando que os espectros haviam sido gravados em intervalos de temperatura de 3 °C em 3 °C, desde 45 °C até 21 °C). Os pontos experimentais foram ajustados com a ajuda da Equação 49 (HE, SHI, CAI *et al*, 2002) na qual γ é a contribuição do efeito termo-ótico da amostra para o deslocamento total, representada pela Equação 50. Nesse ajuste foram utilizados como parâmetros variáveis os valores das grandezas β e

γ utilizando o modelo proposto por He e seus colaboradores (HE, SHI, CAI *et al*, 2002) com os parâmetros fixos $u_{\infty} = 16,73 \pm 1,90$, $\Lambda = 407 \pm 0,01769 \mu\text{m}$, $n_{nu} = 1.46$, $\rho = 62,5 \mu\text{m}$, $n_{ca} = 1,4475$ e $a = 4\mu\text{m}$.

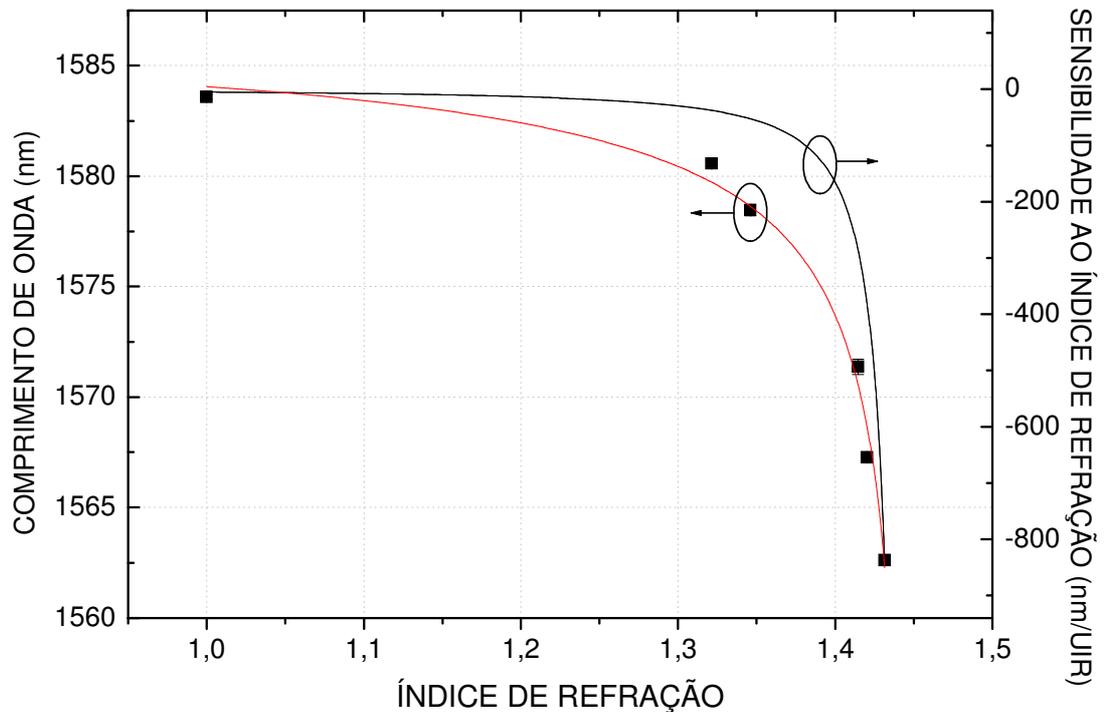


Figura 63: Curva em vermelho, resposta ao índice de refração. Curva em preto, sensibilidade ao índice de refração (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007).

Pode ser observado que a resposta térmica da LPG9 é fortemente dependente do índice de refração do meio externo, dependendo da substância. Para o ar ($n = 1,000$), água ($1,3213$) e etanol ($n = 1,3460$) as mudanças no comprimento de onda são negativas e lineares com os acréscimos de temperatura. Mas para o tiner ($n = 1,4145$), o comportamento não é linear e, com baixas variações de temperatura, os deslocamentos do comprimento de onda são positivos, mudando para deslocamentos negativos nas variações de temperatura superiores a $14,14^{\circ}\text{C}$. Mas os deslocamentos de comprimento de onda são sempre positivos e não lineares para todas as variações de temperatura no aguarrás ($n = 1,4202$) e no querosene ($n = 1,4315$). Os coeficientes termo-óticos de acoplamento, obtidos a partir dessa análise, estão na Tabela 14.

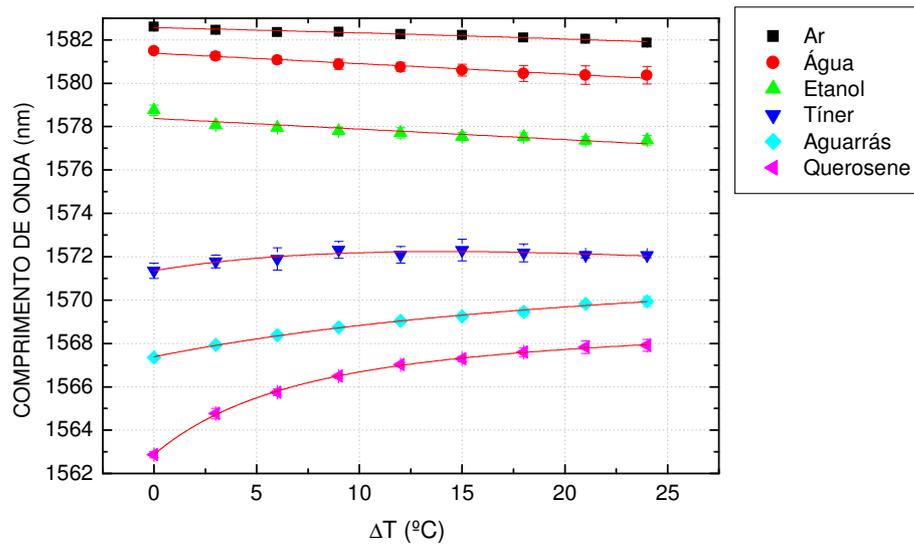


Figura 64: Resposta térmica da LPG9 na presença de diferentes ambientes com o ajuste fornecido pela Equação 49 (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007).

Tabela 14: Sensibilidade ao Índice de Refração e Coeficiente Termo-Óptico de Acoplamento da LPG9 .

amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)	coeficiente termo-óptico de acoplamento, β ($10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
ar (n = 1,0000)	- 5,13 \pm 0,01	- 2,50 \pm 0,47
água (n = 1,3213)	- 37,61 \pm 0,03	- 3,04 \pm 0,32
etanol (n = 1,3460)	- 52,45 \pm 0,11	- 3,08 \pm 0,28
tíner (n = 1,4145)	- 286,69 \pm 1,86	- 4,53 \pm 0,39
aguarrás (n = 1,4202)	- 381,88 \pm 3,02	- 0,72 \pm 0,31
querosene (n = 1,4315)	- 836,70 \pm 5,50	- 2,61 \pm 0,13

A Figura 65 (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007) apresenta o comportamento da sensibilidade térmica da LPG, imersa nas seis amostras utilizadas, em função das variações de temperatura (ΔT). Esses gráficos foram obtidos a partir da derivada numérica das curvas apresentadas na Figura 64.

Através dos gráficos apresentados na Figura 65, no intervalo de variações de temperatura analisado, percebe-se uma sensibilidade térmica negativa e constante para a LPG imersa no ar (1,000), na água (1,3213) e no álcool etanol (1,3460). Através desse gráfico obtiveram-se valores da sensibilidade térmica iguais a $-0,025 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ (ar), $-0,045 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ (água) e $-0,046 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ (etanol). Comparando-se essas três substâncias, notifica-se um aumento (em módulo) da sensibilidade térmica com relação ao aumento do índice de refração. Esse aumento nos valores

absolutos é coerente com o aumento (em módulo) do coeficiente termo-óptico de acoplamento, β , (analisando o caso do ar, água e etanol na Tabela 14 e tomando por base a Equação 49). Essas três amostras estão em uma região de baixa sensibilidade ao índice de refração (RIS) e os deslocamentos de comprimento de onda causados pela contribuição do efeito termo-óptico γ são menos significantes.

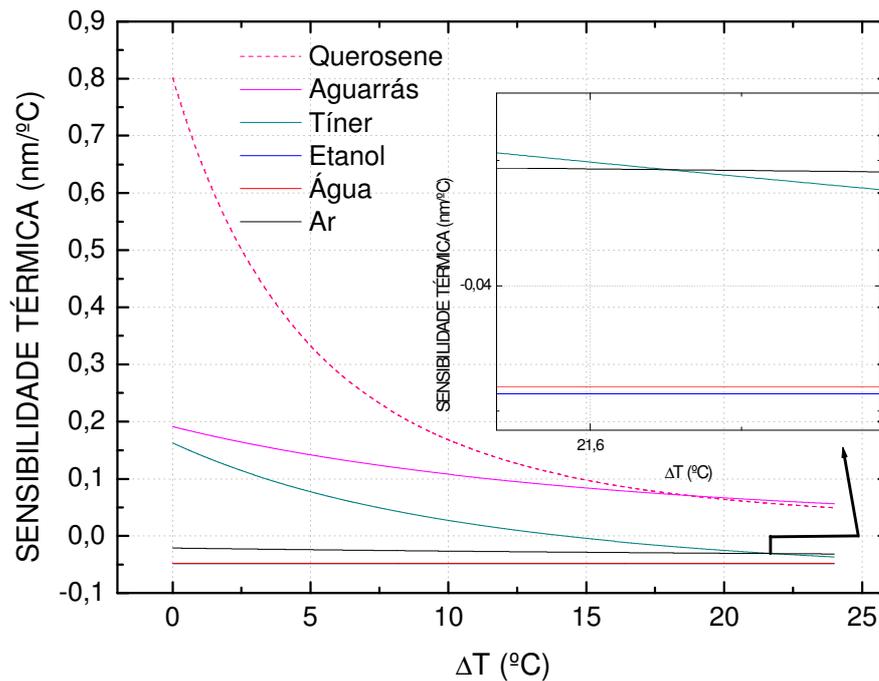


Figura 65: Sensibilidade térmica da LPG9 imersa em diferentes amostras (COSTA, KAMIKAWACHI, POSSETI *et al*, 2007).

Já as amostras de tíner (1,4145), aguarrás (1,4202) e querosene (1,4315), cujos índices de refração aproximaram-se do valor do índice determinado para a casca da fibra ($1,4441 \pm 0,0012$), apresentaram uma sensibilidade térmica positiva, decrescente e não linear para os intervalos de temperatura de até 14,14 °C. Além disso, para esses intervalos de temperatura, um aumento na sensibilidade térmica é encontrado à medida que o índice de refração aumenta. Contudo esse comportamento apresenta algumas alterações para variações de temperatura maiores do que 14,14 °C. Esse comportamento complexo da sensibilidade térmica resulta da combinação de efeitos que dependem principalmente da sensibilidade ao índice de refração da LPG (RIS). Para essas substâncias, a contribuição do efeito termo-óptico γ tem um importante papel porque elas estão em

uma região de alta sensibilidade ao índice de refração (RIS); ligeiras reduções no índice de refração dessas amostras provocam grandes deslocamentos da banda de ressonância da LPG para maiores comprimentos de onda (observando-se a Figura 63).

Nos hidrocarbonetos o deslocamento do vale de atenuação da LPG, para maiores valores de comprimento de onda, devido à diminuição do índice de refração provocada pelos aumentos de temperatura, supera o deslocamento negativo intrínseco devido ao aumento na temperatura (efeito termo-ótico). Mas, com a diminuição do índice de refração, a RIS também diminui e a sua contribuição passa a ser menor na resposta térmica da LPG. Isso explica o comportamento não linear observado para a sensibilidade térmica da LPG imersa nos hidrocarbonetos. A combinação desses fatores também explica a mudança da sensibilidade térmica da LPG imersa no tiner, de positiva para negativa, acima de variações de 14,14°C e a inversão entre a sensibilidade térmica da aguarrás e do querosene acima de variações de 18,71°C.

4.3.4 Resultados da Caracterização quanto à Deformações Longitudinais

A Figura 66 apresenta o resultado da análise preliminar da sensibilidade da LPG9 às deformações. Esse ensaio está descrito na seção 3.3.4 do Capítulo 3. Foi feito um ajuste linear nos pontos experimentais correspondentes a uma medida de cada deformação longitudinal que variou de 0 a 125 $\mu\epsilon$. As barras de erros dos pontos experimentais da Figura 66 representam os erros do ajuste de múltiplas gaussianas. Na continuidade do processo de deformação a LPG9 atingiu a ruptura ainda imersa no ar, provando que era frágil a esses ensaios, mas não foi registrado o valor da deformação à qual essa rede foi submetida no ponto de ruptura.

Pelo ajuste linear feito nos pontos experimentais, a sensibilidade foi negativa, encontrando-se o valor de $(-0,19 \pm 0,15)$ pm/ $\mu\epsilon$. O valor do erro foi grande, pois representou cerca de 78,95 % da sensibilidade. Esse resultado é um indício de baixa sensibilidade às deformações longitudinais. Redes gravadas com laser de CO₂ usando fibra padrão de telecomunicações apresentaram sensibilidade de -0,45 nm/m ϵ , que é cerca de 2,4 vezes maior (RAO, WANG, RAN *et al*, 2003). Redes de período longo gravadas com arco elétrico e fase deslocada apresentaram sensibilidades de -0,141 pm/ $\mu\epsilon$ e -0,139 pm/ $\mu\epsilon$, para os vales de atenuação, e de -0,170 pm/ $\mu\epsilon$ para o pico situado entre as duas bandas de atenuação laterais, quando submetida a deformações longitudinais de 0 a 1400 $\mu\epsilon$ (FALATE, FRAZÃO, REGO, 2005). Uma LPG escrita com arco elétrico, 59 pontos e período de 595 μm apresentou sensibilidade ao “*strain*” de $-0,29 \pm 0,02$ pm/ $\mu\epsilon$ quando submetida a

deformações longitudinais de 0 a 250 $\mu\epsilon$ (KAMIKAWACHI, POSSETTI, FALATE *et al.*,2007), ou seja, uma sensibilidade 1,53 vezes maior do que a da rede gravada com UV ponto-a-ponto.

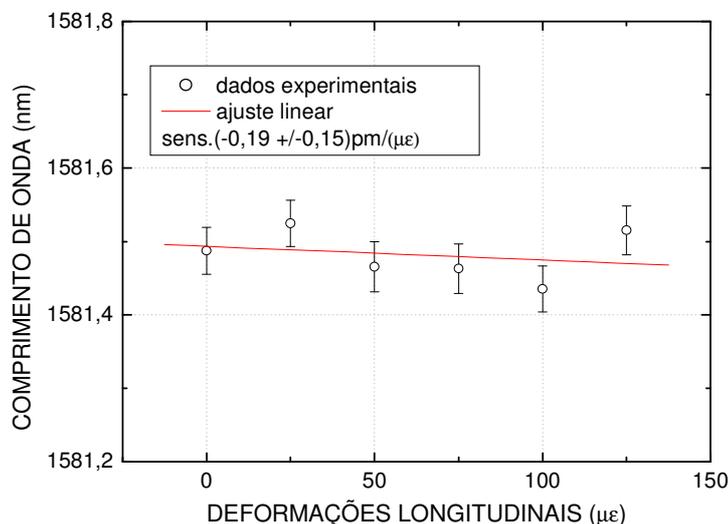


Figura 66: Sensibilidade da LPG9 à deformações longitudinais.

De acordo com os pesquisadores James e Tatam, as escolhas apropriadas do período da rede e da composição da fibra permitem a geração de bandas de atenuação com sensibilidade à deformações longitudinais positiva, negativa ou nula. LPGs com período maior do que 100 μm apresentam desvios para menores comprimentos de onda que são justificados pela dominância da contribuição negativa do material, relativa ao efeito fotoelástico (primeiro termo da Equação 46), em relação à contribuição do guia de onda que é positiva (JAMES e TATAM, 2003). No caso da LPG9 constatou-se realmente uma sensibilidade negativa, apesar do erro grande que foi calculado, demonstrando uma tendência de baixa sensibilidade a esse parâmetro.

A possibilidade de definir o desempenho de uma LPG em virtude da sua periodicidade, fabricando LPGs insensíveis à deformações longitudinais (com período maior do que 100 μm) ou insensíveis à temperatura (com período menor do que 100 μm), é vantajosa quando se pretende isolar a resposta do sensor a um ou a outro parâmetro. Mas para o bom desempenho do dispositivo no qual a sensibilidade cruzada entre deformações longitudinais e temperatura deve ser eliminada, é preciso uma escolha adequada do período da LPG para que ela possa mostrar (i) alta sensibilidade térmica ou (ii) alta sensibilidade às deformações longitudinais (JAMES e TATAM, 2003).

Como o período utilizado na gravação das LPGs, na fibra denominada “*Centaurus*”, foi de 407 μm e esse valor é maior do que 100 μm , de acordo com o trabalho dos pesquisadores James e Tatam (2003) redes com esse período podem ser insensíveis às deformações longitudinais.

4.3.5 Comportamento da LPG3 de 25°C a 1200°C

De acordo com o experimento descrito na seção 3.3.5 do Capítulo 3, a LPG3, gravada em fibra “*Centaurus*”, foi aquecida no forno Jung até 1200°C, mantendo-a esticada através de fixação com fita adesiva. No final desse processo a fibra já estava sem a capa de acrilato. A Figura 67 (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009) apresenta o deslocamento do vale de ressonância dessa rede em função da temperatura e a Figura 68 (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009) a influência da temperatura na atenuação da rede.

A LPG3 mostrou alterações na sua resposta espectral ao longo de todo o processo de aquecimento, de acordo com os dados apresentados na Figura 67. O comportamento observado apresentou algumas similaridades com o de redes de período longo gravadas com arco elétrico e aquecidas até 1200°C (REGO, OKHOTNIKOV, DIANOV *et al*, 2001; HUMBERT e MALKI, 2002b) e resultou de uma complexa relação de vários fatores, quais sejam as características do guia de onda e o processo de escrita da rede. Pela análise dos pontos experimentais, podem ser identificadas quatro regiões com distintas sensibilidades térmicas negativas, quais sejam (i) entre 25°C e 360°C, com coeficiente angular estimado em -0,013 nm/°C, (ii) entre 360°C e 580°C, com um aumento do coeficiente angular para -0,090 nm/°C, (iii) entre 650°C e 880°C, com sensibilidade de -0,080 nm/°C e (iv) entre 880°C e 980°C, com sensibilidade de -0,050 nm/°C.

Para aquecimentos até 360°C, o principal efeito que produz deslocamentos do vale de atenuação da rede para menores valores, na medida em que a temperatura aumenta, resulta do coeficiente termo-ótico de acoplamento, que é dado pela Equação 43. Dos 360°C aos 580°C inicia-se um processo de degradação da rede que foi induzida por radiação UV. Portanto, o aumento observado na sensibilidade térmica, de -0,013 nm/°C para -0,090 nm/°C, está associado ao fato adicional de que alguns centros de defeitos, produzidos durante a escrita, são destruídos por ativação térmica, diminuindo a modulação do índice de refração da rede e alterando posição do vale de atenuação para menores valores. Uma redução de 0,5 dB na eficiência da rede, para esse intervalo de temperaturas, pode ser observada na Figura 68.

No intervalo entre 580°C e 650°C foi observada uma abrupta redução de aproximadamente 4 dB na atenuação, correspondendo a uma queda de 23% da eficiência da rede. Nesse intervalo foi constatado também um deslocamento para menores comprimentos de onda. Sob essas temperaturas a energia térmica é a responsável pela destruição de todos os centros de defeitos fotoinduzidos pela radiação UV.

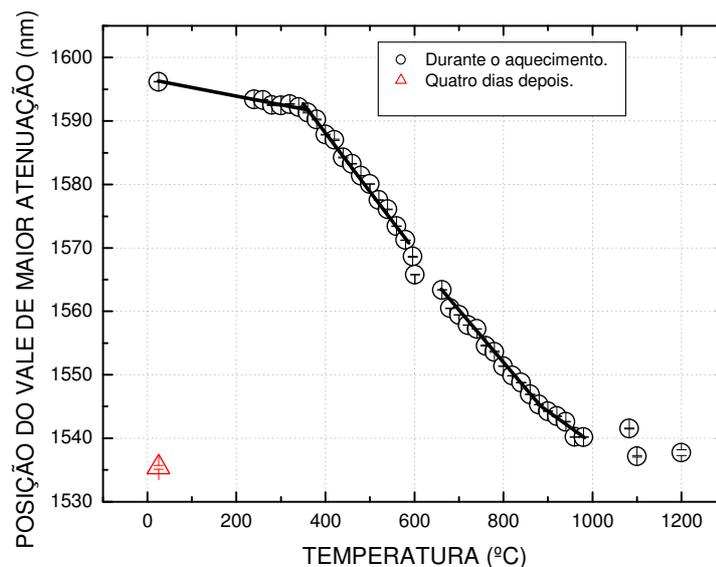


Figura 67: Deslocamento do vale de atenuação da LPG3 em altas temperaturas (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009).

Quando a temperatura foi elevada dos 650°C aos 880°C a eficiência da rede ainda diminuiu cerca de 5,6 dB, detectando-se também uma redução da sensibilidade térmica para $-0,080 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. Esses dois efeitos resultam do recozimento das densificações fotoinduzidas, que são produzidas nas regiões expostas à radiação UV durante a gravação, levando a uma redução do índice de refração bem como a deslocamentos espectrais no sentido de menores comprimentos de onda.

Entre 880°C e 980°C a expansão térmica da rede torna-se considerável, adicionando-se uma nova componente ao efeito descrito anteriormente, que produz aumentos no comprimento de onda de ressonância devido ao aumento da periodicidade da rede, conforme a Equação 37, reduzindo a resposta térmica da rede para $-0,055 \text{ nm}/^\circ\text{C}$.

Acima dos 980°C a resposta térmica da LPG3 apresentou-se complexa e não foi possível observar um comportamento bem definido. Os rearranjos da estrutura da sílica que ocorrem quando

a temperatura aproxima-se do seu ponto de fusão podem ser os responsáveis por esse comportamento (HUMBERT e MALKI, 2002b).

Quando a LPG3 atingiu 1200°C notificou-se uma redução de 67,6 % na sua atenuação juntamente com um desvio em comprimento de onda de -58,6 nm do seu vale principal, sendo as duas alterações relativas aos valores registrados em temperatura ambiente de 25°C e antes do processo de aquecimento ser iniciado.

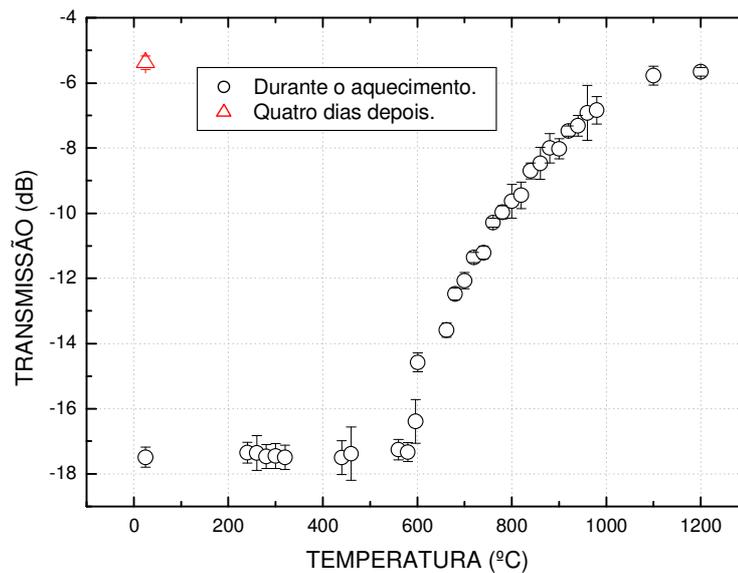


Figura 68: Medidas da atenuação da LPG3 nas temperaturas de 25°C a 1200°C e quatro dias depois do aquecimento a 24,7°C (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009).

Quatro dias depois da LPG3 passar por um resfriamento natural dentro do forno, observou-se um desvio, em comprimento de onda, de -60,73 nm em relação a sua posição espectral na temperatura ambiente (de 25°C antes do aquecimento e de 24,7°C quatro dias depois do aquecimento). Também foi registrada uma redução de 69,2 % na atenuação da rede, comparada ao valor medido para essa grandeza no início do experimento. Mas, apesar da degradação sofrida, a rede ainda encontrava-se em uma boa condição operacional.

A finalidade inicial para ser feito esse aquecimento foi a de descobrir a temperatura na qual as LPGs gravadas com UV ponto-a-ponto poderiam ser apagadas. Não foi possível observar a extinção da rede até 1200°C e, embora no final do processo o seu espectro já estivesse bastante ruidoso, ficou demonstrado com esse ensaio que essas redes têm potencialidade para uso em

elevadas temperaturas. O deslocamento espectral, bem como a perda de eficiência de uma LPG após o recozimento é função da temperatura e duração do processo, dos modos das bandas de ressonância e das concentrações originais e residuais das moléculas de hidrogênio na fibra (BHATIA, 1996). Esses fatores devem ser levados em consideração no planejamento das aplicações desses dispositivos.

4.3.6 Análise dos Espectros da LPG8 após Três Ciclos de “Annealing”

Estão plotados na Figura 69, os pontos relativos às posições do vale de atenuação da LPG8, gravada em fibra “Centaurus”, ao longo de três ciclos de “annealing”. Esse experimento está descrito em detalhes na seção 3.3.6 do Capítulo 3. Procedimentos semelhantes foram feitos com FBGs por Douay e seus colaboradores (DOUAY, FERTEIN, XIE *et al*, 1993). Após cada um dos três ciclos percebe-se que a rede apresentou desvios para menores comprimentos de onda. Foi feito um ajuste linear nos pontos experimentais de cada ciclo. Os coeficientes angulares desse ajuste estão apresentados na Tabela 15.

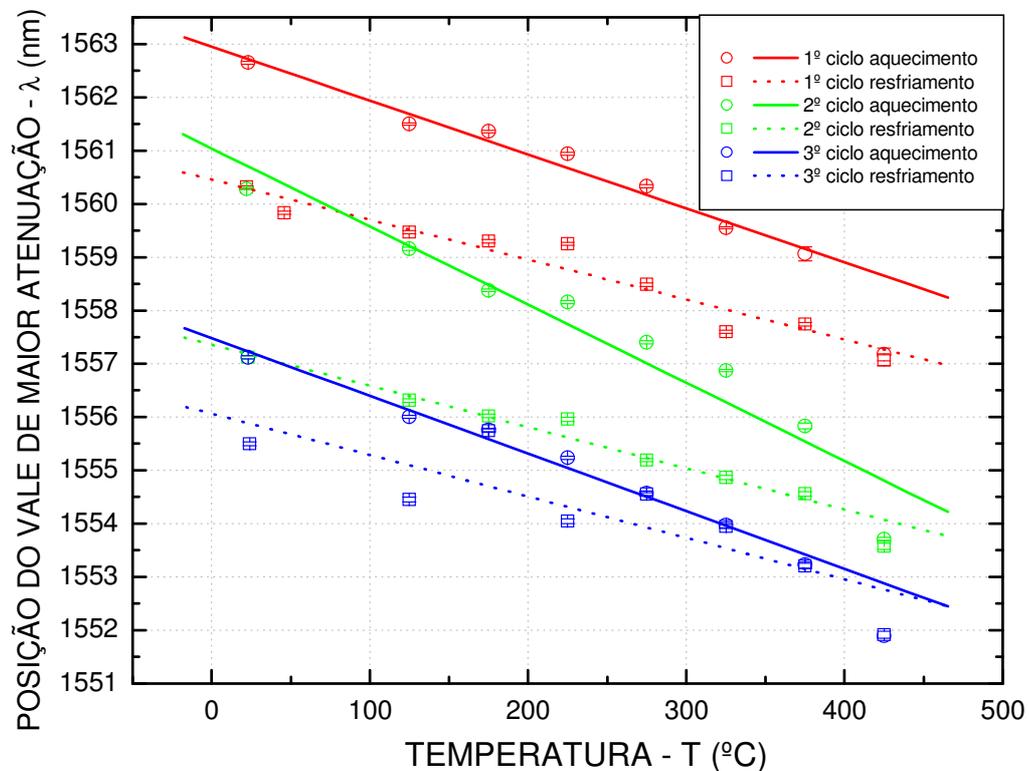


Figura 69: Evolução do vale central de atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “annealing”.

Os pontos relativos aos ciclos de aquecimento, conforme já explicado na seção 3.3.6, foram coletados pelo analisador de espectros óticos após um tempo de permanência de 30 minutos em cada patamar de temperatura. Mas no resfriamento, logo após o forno desligar-se automaticamente, os pontos relativos a cada temperatura foram coletados bem rapidamente principalmente nos primeiros pontos, já que a temperatura baixava bem depressa. Já no final de cada resfriamento, o processo ficava mais lento. Inclusive o dado relativo à posição espectral em temperatura ambiente, sempre era coletado no dia seguinte.

O menor desvio em comprimento de onda após um ciclo de aquecimento e resfriamento natural é o relativo ao 3º ciclo, indicando que a rede apenas tendia a atingir a estabilidade. A Tabela 16 apresenta os valores das posições do vale de ressonância da LPG8, em temperatura ambiente, antes e depois de cada ciclo de “annealing”. Para o 3º “annealing” a diferença entre a posição espectral antes e depois do ciclo é a menor de todas, o que reforça a hipótese de uma tendência à estabilização. As diferenças de temperatura de ± 1 °C antes e depois de cada ciclo podem estar influenciando a diferença entre as posições espectrais ($\Delta\lambda$) somente na segunda casa decimal, porque as sensibilidades térmicas determinadas são da ordem de grandeza de pm/°C.

Tabela 15: Sensibilidade térmica encontrada em cada ciclo da LPG8.

	Sensibilidade térmica (pm/°C)
1º aquecimento	-12,22 \pm 1,45
1º resfriamento	- 7,63 \pm 0,71
2º aquecimento	- 14,66 \pm 1,70
2º resfriamento	- 8,22 \pm 0,68
3º aquecimento	- 12,25 \pm 0,99
3º resfriamento	- 7,77 \pm 2,00

Tabela 16: Posição do vale de atenuação da LPG8 antes e depois de cada ciclo de “annealing”.

	antes		depois		$\Delta\lambda$ (nm)
	T(°C)	λ_c (nm)	T(°C)	λ_c (nm)	
1º “annealing”	23	1562,65 \pm 0,02	22	1560,31 \pm 0,03	- 2,34 \pm 0,04
2º “annealing”	22	1560,28 \pm 0,02	23	1557,12 \pm 0,03	- 3,16 \pm 0,04
3º “annealing”	23	1557,12 \pm 0,03	24	1555,49 \pm 0,03	- 1,63 \pm 0,04

Na Figura 70 estão apresentados os valores dos deslocamentos espectrais da LPG8 antes de cada ciclo de aquecimento e no final do último processo de “*annealing*”. Na Figura 71 estão apresentados os valores das atenuações do vale principal da LPG8 antes e depois de cada ciclo de aquecimento e resfriamento. Na Tabela 17 constam os valores dessas atenuações. Essas mudanças espectrais ocorrem na medida em que a energia térmica remove o hidrogênio molecular residual e destrói os centros de defeitos instáveis, alterando a modulação do índice de refração das regiões da fibra que foram expostas à radiação UV durante a gravação da rede. Este é o principal efeito responsável pelas perdas de atenuação e desvios do espectro para menores comprimentos de onda.

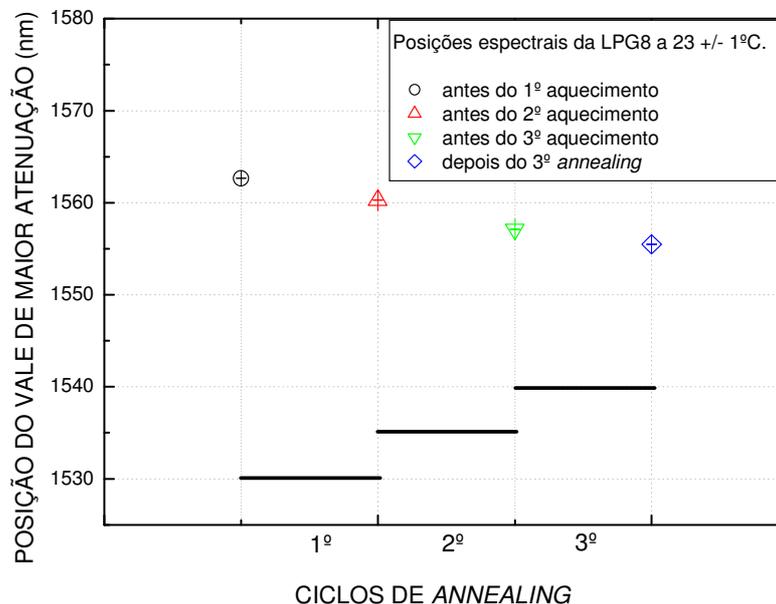


Figura 70: Deslocamentos espectrais do maior vale de atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “*annealing*”.

Pela Figura 71 e pela Tabela 17 atesta-se que a menor perda de amplitude da LPG8 foi ao final do 3º ciclo de “*annealing*”, o que confirma apenas uma tendência à estabilização. Com base nessa inferência, buscou-se fazer uma estimativa das perdas da amplitude que poderiam ocorrer com um maior número de ciclos de “*annealing*”. Essa avaliação foi feita plotando os valores dessa grandeza, em porcentagens relativas ao seu valor inicial, antes e depois de cada ciclo e fazendo o ajuste no programa Origin através de uma equação exponencial. A Figura 72 apresenta o resultado do ajuste que forneceu o maior coeficiente de determinação entre a curva traçada e os pontos experimentais. Esse coeficiente foi de 0,99779 e representa uma determinação de 99,78%.

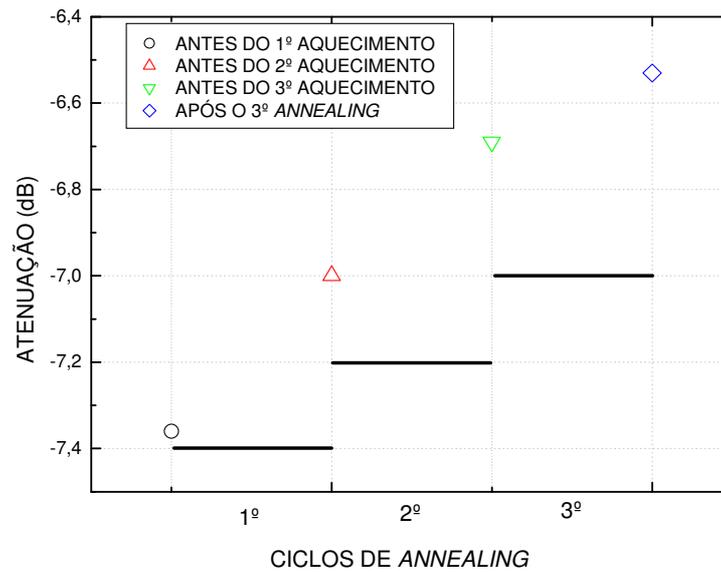


Figura 71: Evolução da atenuação da LPG8 ao longo dos três ciclos de “annealing”.

Tabela 17: Atenuação do vale principal da LPG8 antes e depois de cada ciclo de “annealing”.

	antes		depois		percentagem de perdas de atenuação por ciclo (%)
	T(°C)	atenuação (dB)	T(°C)	atenuação (dB)	
1º annealing	23	-7,36	22	-7,00	4,89
2º annealing	22	-7,00	23	-6,69	4,43
3º annealing	23	-6,69	24	-6,53	2,39

A equação utilizada no ajuste da Figura 72 foi a exponencial de 2ª ordem, denominada de Equação 54, na qual as variáveis y e x representam, respectivamente, os percentuais de perdas de atenuação da rede e os ciclos de aquecimento e resfriamento natural. As constantes A_1 , A_2 , t_1 , t_2 e y_0 foram determinadas pelo ajuste e aparecem na Figura 72. Constatou-se pela Figura 72 que haveria a necessidade de um número maior de ciclos de “annealing” para que a estabilização da rede fosse atingida.

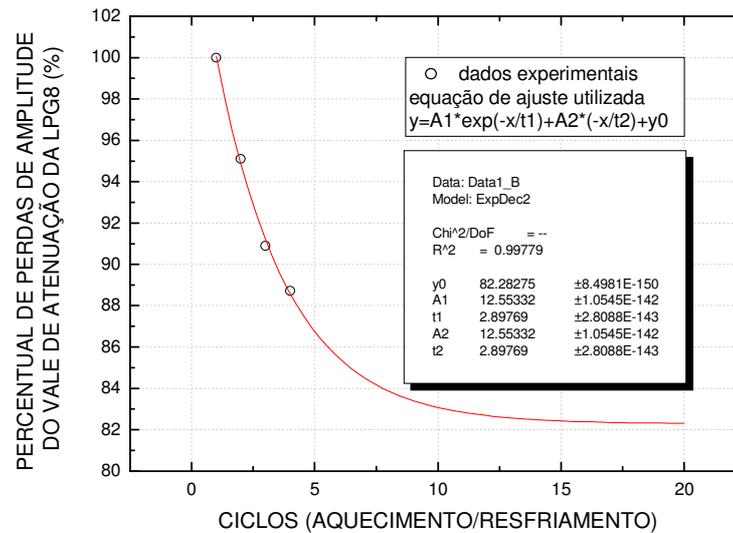


Figura 72: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG8 em função dos ciclos de “annealing”.

Esse moroso processo de estabilização através do “annealing” pode ser explicado pelo lento processo de resfriamento, no interior do forno, ao qual a rede foi submetida a cada ciclo. O resfriamento lento promove uma recuperação parcial dos defeitos fotoinduzidos responsáveis pela modulação do índice de refração, por isso a LPG8 permaneceu ainda instável mesmo depois dos três ciclos de “annealing”.

4.3.7 Análise da LPG5 e da LPG6 após Dois Ciclos de “Quenching”

Estão plotados na Figura 73 (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009), os pontos relativos às posições do vale de atenuação da LPG6 ao longo de dois ciclos de “quenching”. Os procedimentos de aquecimento para os ciclos de “quenching” foram os mesmos dos ciclos de “annealing”. A diferença consiste em não deixar que a rede esfrie dentro do forno. No procedimento de “quenching” a LPG é puxada rapidamente para fora do forno no momento em que ele desliga-se automaticamente. Então o espectro da rede é coletado diretamente em temperatura ambiente. Esse experimento está descrito em detalhes na seção 3.3.7 do Capítulo 3.

Foi feito um ajuste linear nos pontos experimentais de cada processo de aquecimento da LPG6. Os coeficientes angulares desse ajuste estão apresentados na Tabela 18. Esse ajuste não representa a sensibilidade térmica definitiva da rede, já que a mesma ainda estava passando por um

processo de estabilização. Pela Tabela 18, comparando-se o primeiro e o segundo aquecimentos, percebe-se que no 2º aquecimento a sensibilidade térmica da LPG6 tornou-se maior do que no 1º aquecimento.

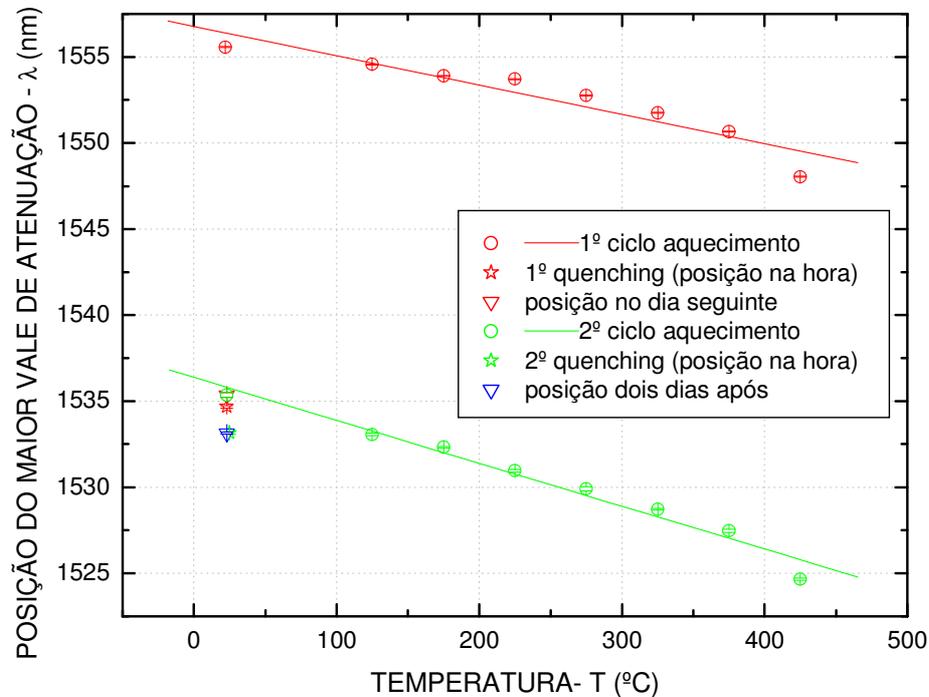


Figura 73: Evolução do vale central de atenuação da LPG6 ao longo dos dois ciclos de “*quenching*” (COSTA, KAMIKAWACHI, MULLER *et al*, 2009).

Tabela 18: Coeficiente angular determinado com os dados da Figura 73 em cada processo de aquecimento da LPG6.

	coeficiente angular (pm/°C)
1º aquecimento	- 17,04 ± 2,39
2º aquecimento	- 24,94 ± 1,70

As Tabelas 19 e 20 mostram os desvios espectrais da LPG6 e da LPG5, respectivamente, após cada “*quenching*”. Imediatamente depois do 1º “*quenching*”, a LPG6 apresentou um deslocamento de $-20,90 \pm 0,08$ nm, no dia seguinte, antes da execução do 2º “*quenching*”, um deslocamento adicional de $0,68 \pm 0,15$ nm, e mais um deslocamento de $-2,20 \pm 0,15$ nm após o 2º

“*quenching*”. O desvio em comprimento de onda da LPG6 após o 2º processo de “*quenching*” foi 89,47 % menor do que o desvio após o 1º. Na Tabela 20 percebe-se que foi registrado um deslocamento de $-30,36 \pm 0,21$ nm logo após o 1º “*quenching*” da LPG5 e no dia seguinte um deslocamento adicional, anterior à execução do 2º “*quenching*”, de $0,94 \pm 0,24$ nm e por fim mais um desvio de $-2,48 \pm 0,14$ nm após a execução do 2º “*quenching*”. Verifica-se ainda que o desvio em comprimento de onda da LPG5 após o 2º “*quenching*” foi 91,83 % menor do que o desvio após o 1º “*quenching*”.

Tabela 19: Posição do vale de atenuação da LPG6 antes e depois de cada “*quenching*”.

	antes		depois		$\Delta\lambda$ (nm)
	T(°C)	λ_c (nm)	T(°C)	λ_c (nm)	
1º “ <i>quenching</i> ”	22	$1555,58 \pm 0,03$	23	$1534,68 \pm 0,07$	$-20,90 \pm 0,08$
2º “ <i>quenching</i> ”	23	$1535,36 \pm 0,13$	23	$1533,16 \pm 0,07$	$-2,20 \pm 0,15$

Tabela 20: Posição do vale de atenuação da LPG5 antes e depois de cada “*quenching*”.

	antes		depois		$\Delta\lambda$ (nm)
	T(°C)	λ_c (nm)	T(°C)	λ_c (nm)	
1º “ <i>quenching</i> ”	25	$1538,54 \pm 0,07$	25	$1508,18 \pm 0,20$	$-30,36 \pm 0,21$
2º “ <i>quenching</i> ”	18	$1509,12 \pm 0,13$	26	$1506,64 \pm 0,06$	$-2,48 \pm 0,14$

As Figuras 74 e 75, bem como as Tabelas 21 e 22, apresentam a evolução da amplitude do vale de ressonância da LPG6 e da LPG5, respectivamente, ao longo dos dois ciclos de “*quenching*”. Na Figura 74 observa-se que no dia seguinte ao 1º “*quenching*” a LPG6 recuperou 5,59 % da sua atenuação e após o 2º “*quenching*” ela perdeu 3,39 %. A recuperação pela qual ela passou um dia após o 1º “*quenching*” compensou a perda provocada pelo 2º “*quenching*”, fazendo com que a atenuação ao final do 2º ficasse ainda maior do que a atenuação ao final do 1º. Dois dias depois do 2º “*quenching*” a atenuação do vale principal foi de -4,51 dB, ou seja, a LPG6 havia perdido mais 0,05 dB em dois dias e essa diferença representa 1,10 % de perdas na atenuação com relação ao valor medido para essa grandeza logo após o 2º “*quenching*”. Mas observa-se que o valor medido dois dias após o 2º “*quenching*” ainda supera em 0,04 dB o valor medido logo após o 1º “*quenching*”. Assim como na LPG6, na LPG5 essas pequenas diferenças, bem como os desvios positivos em comprimentos de onda da LPG5 e da LPG6, anteriores ao 2º “*quenching*”, certamente

ocorreram porque no momento da execução do “*quenching*” ocorrem mudanças no posicionamento da rede. Essas mudanças no posicionamento da rede são devidas ao ato de puxar rapidamente a LPG para fora do forno e acomodá-la para registrar o seu espectro.

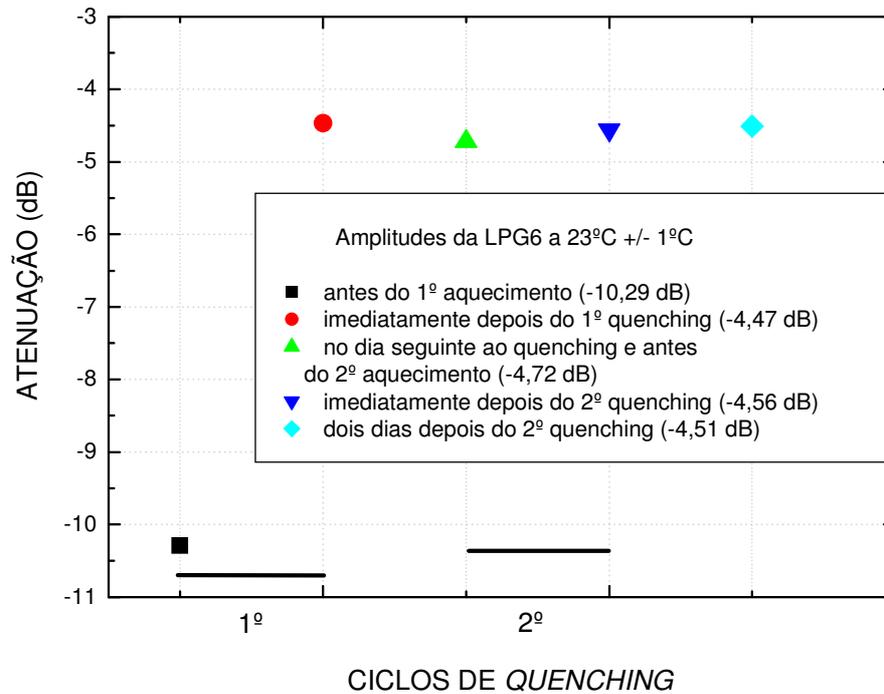


Figura 74: Evolução da atenuação da LPG6 ao longo dos dois ciclos de “*quenching*”.

Tabela 21: Atenuação do vale principal da LPG6 antes e depois de cada “*quenching*”.

	antes		depois		percentagem de perdas de atenuação por ciclo (%)
	T(°C)	atenuação (dB)	T(°C)	atenuação (dB)	
1º “ <i>quenching</i> ”	22	-10,29	23	-4,47	56,56
2º “ <i>quenching</i> ”	23	-4,72	23	-4,56	3,39

A aproximação exponencial que foi feita para extrapolar as perdas de amplitude a cada ciclo de “*annealing*” foi feita nos ciclos de “*quenching*” da LPG6 e da LPG5. As Figuras 76 e 77 apresentam os resultados do ajuste feito com a exponencial de 2ª ordem, denominada de Equação 54, que apresentou coeficiente de determinação de 100% para os pontos experimentais das duas

redes submetidas ao “*quenching*”. Pelos ajustes apresentados nas Figuras 76 e 77 e pelas Tabelas 19, 20, 21 e 22 é possível inferir que tanto a LPG6 quanto a LPG5 haviam atingido a estabilização após somente dois ciclos de “*quenching*”. A estabilização da LPG6 também pode ser confirmada pela Figura 73 que mostra que o desvio em comprimento de onda de -2,20 nm, sofrido pela LPG6 após o 2º “*quenching*”, foi ainda mantido depois de dois dias.

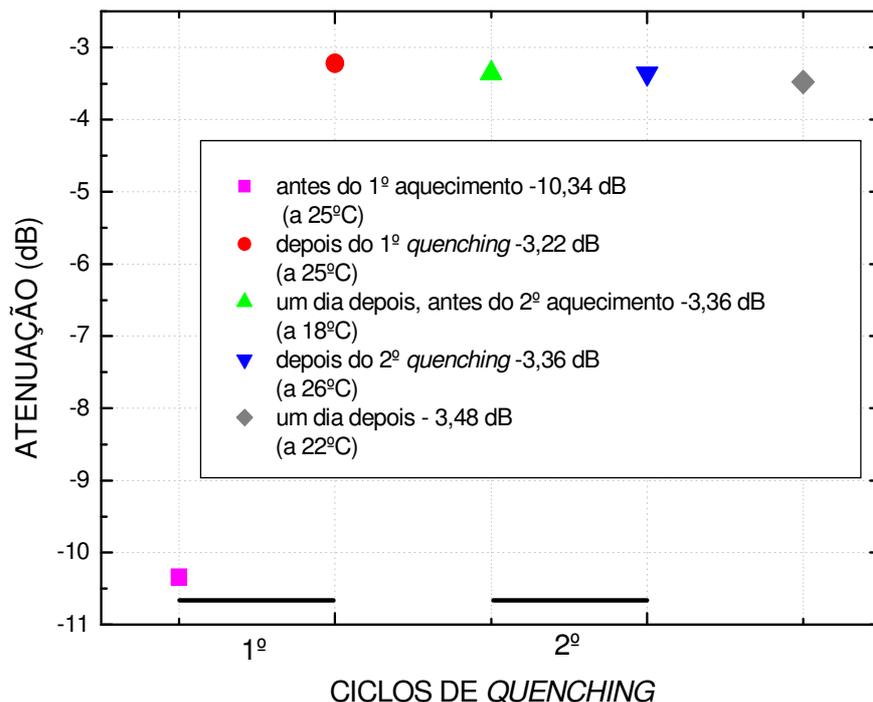


Figura 75: Evolução da atenuação da LPG5 ao longo dos dois ciclos de “*quenching*”.

Tabela 22: Atenuação do vale principal da LPG5 antes e depois de cada “*quenching*”.

	antes		depois		percentagem de perdas de atenuação por ciclo (%)
	T(°C)	atenuação (dB)	T(°C)	atenuação (dB)	
1º “ <i>quenching</i> ”	25	-10,34	25	-3,22	68,86
2º “ <i>quenching</i> ”	18	-3,36	26	-3,36	0

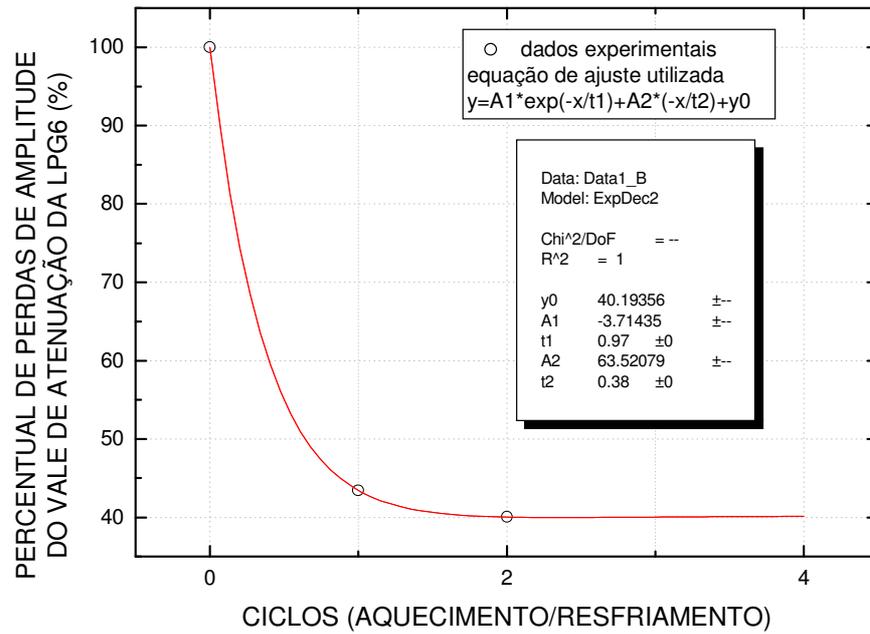


Figura 76: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG6 em função dos ciclos de “*quenching*”.

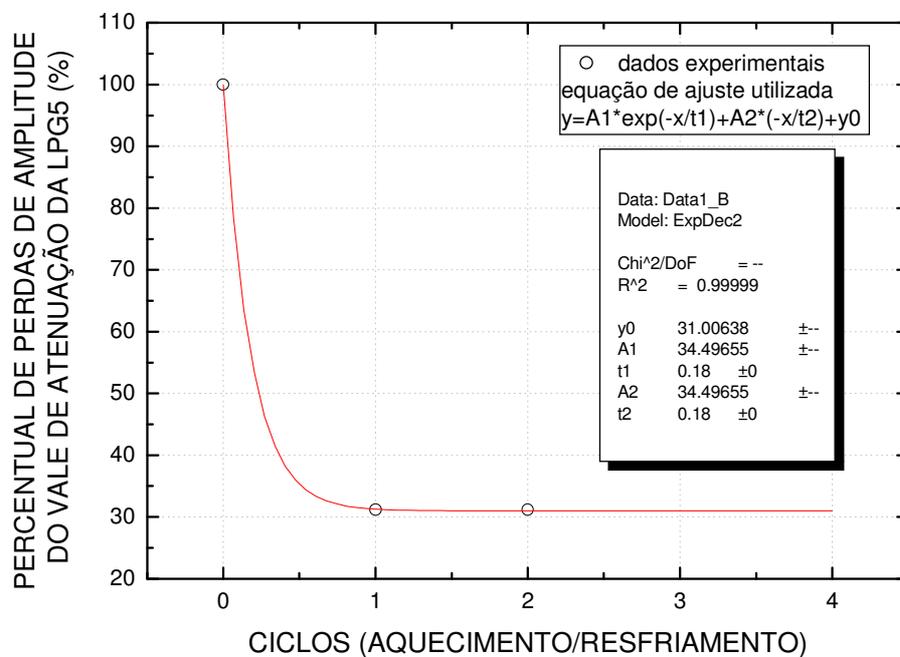


Figura 77: Ajuste exponencial da evolução das perdas percentuais de amplitude da LPG5 em função dos ciclos de “*quenching*”.

Os dados apresentados nas Tabelas 19, 20, 21 e 22 mostram que um processo praticamente irreversível ocorreu com a LPG5 e a LPG6 imediatamente após o 1º “*quenching*”. Nesse processo não ocorre uma recuperação parcial dos defeitos que são destruídos durante o aquecimento, como ocorre no processo de “*annealing*” que tem o aquecimento seguido por um lento resfriamento, por causa do choque térmico sofrido durante o procedimento de “*quenching*”.

Comparando-se os resultados dos dois processos de tratamento térmico, ou seja, o de “*annealing*” e o de “*quenching*”, embora o primeiro processo tenha sido repetido três vezes e o segundo duas vezes, faz-se as seguintes constatações:

(i) As três redes submetidas aos processos de tratamento térmico já haviam sido gravadas há mais de oito meses quando foram submetidas aos procedimentos de “*annealing*” e “*quenching*”, por isso a presença de hidrogênio molecular residual está totalmente descartada para ambas. A diferença entre as três redes consistia apenas na fluência empregada para a gravação, no caso da LPG5 foi de $137,40 \pm 15,11 \text{ mJ/cm}^2$, no caso da LPG6 foi de $233,95 \pm 25,73 \text{ mJ/cm}^2$ e no da LPG8 foi de $252,49 \pm 27,77 \text{ mJ/cm}^2$. Percebe-se que a sensibilidade térmica das três redes foi negativa.

(ii) Embora nos dois procedimentos tenha acontecido um desvio com deslocamentos para menores comprimentos de onda, os dois procedimentos não são equivalentes para fins de estabilização das redes. Após o primeiro ciclo de cada procedimento, o desvio da LPG8, submetida ao processo de “*annealing*” ($-2,34 \pm 0,03 \text{ nm}$), foi 8,93 vezes menor do que o da LPG6 submetida ao “*quenching*” ($-20,90 \pm 0,05 \text{ nm}$) e 12,97 vezes menor do que o da LPG5 ($-30,36 \pm 0,21 \text{ nm}$) também submetida a “*quenching*”. Já no 2º ciclo a LPG6 submetida ao “*quenching*” apresentou um desvio em comprimento de onda 1,44 vezes menor do que o da LPG8 submetida ao “*annealing*”. Essa constatação também foi feita no 2º “*quenching*” da LPG5 cujo desvio em comprimento de onda foi 1,27 vezes menor do que o da LPG8 submetida ao “*quenching*”. Confirma-se desta maneira que o primeiro “*quenching*” gera um grande desvio em comprimento de onda, mas esse valor diminui consideravelmente a partir do 2º ciclo que utiliza esse método.

(iii) No primeiro ciclo, a LPG6 submetida ao “*quenching*” apresentou uma queda de amplitude do vale de atenuação, ou queda de eficiência, 11,57 vezes maior do que a LPG8 submetida ao “*annealing*”. Na LPG5, submetida a “*quenching*”, a queda de amplitude foi 14,08 vezes maior do que a da LPG8 submetida ao “*annealing*”.

(iv) Embora antes de iniciarem os tratamentos térmicos as redes submetidas ao “*quenching*”, tivessem uma amplitude maior (LPG6 com $-10,29 \text{ dB}$ e LPG5 com $-10,34 \text{ dB}$) do que a da LPG8, que foi submetida ao “*annealing*” ($-7,36 \text{ dB}$), no final elas acabaram com menores amplitudes. A LPG6 com uma amplitude 1,43 vezes menor do que a da LPG8 ($-6,53 \text{ dB}$) e a LPG5 com uma

amplitude 1,94 vezes menor do que a da LPG8 que passou por “*annealing*”. Mesmo depois de uma suposta estabilização da LPG8 depois de 15 ciclos de “*annealing*”, conforme a previsão mostrada através do gráfico apresentado na Figura 72, a amplitude da LPG8 seria ainda 1,33 vezes maior do que a amplitude da LPG6 e 1,80 vezes maior do que a amplitude da LPG5.

(iv) O procedimento de “*quenching*” estabiliza mais rapidamente as redes, mas apresenta a desvantagem de gerar grandes quedas na amplitude das mesmas.

4.3.8 Resultados da Caracterização e Investigação da Estabilidade Térmica em 350°C da LPG5

Depois de submetida aos dois ciclos de “*quenching*” a LPG5 exibiu inicialmente o comportamento apresentado na Figura 78, quando passou pelo primeiro processo de aquecimento e resfriamento cuja programação está esquematizada na Figura 29. O ajuste de curvas gaussianas nos espectros registrados nesse ensaio apresentou significativas barras de erros porque o espectro estava ruidoso e foi coletado apenas uma vez em cada temperatura que era atingida no aquecimento.

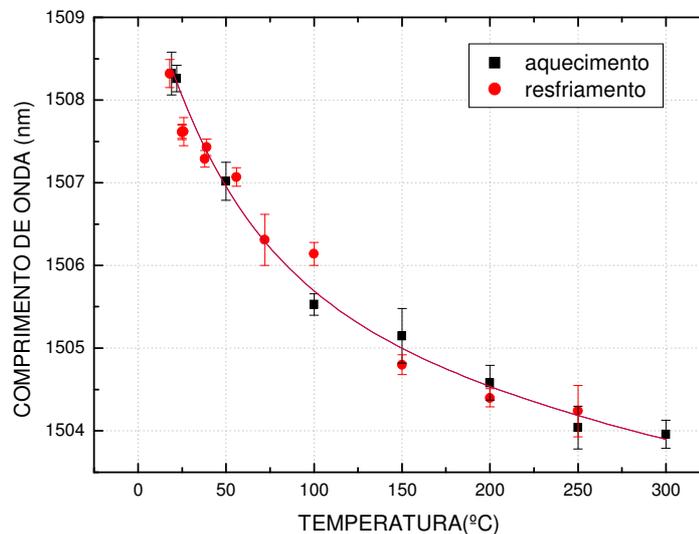


Figura 78: Primeiro teste para investigar a sensibilidade térmica da LPG5.

Depois dessa primeira investigação da sensibilidade térmica, apresentada na Figura 78, que mostra que a rede não exibiu um comportamento linear, a LPG5 foi submetida a um teste de

estabilização térmica ao ser mantida por duas semanas em temperatura de 350°C. As Figuras 79 e 80 apresentam os registros da posição espectral e da atenuação dessa rede durante as duas semanas.

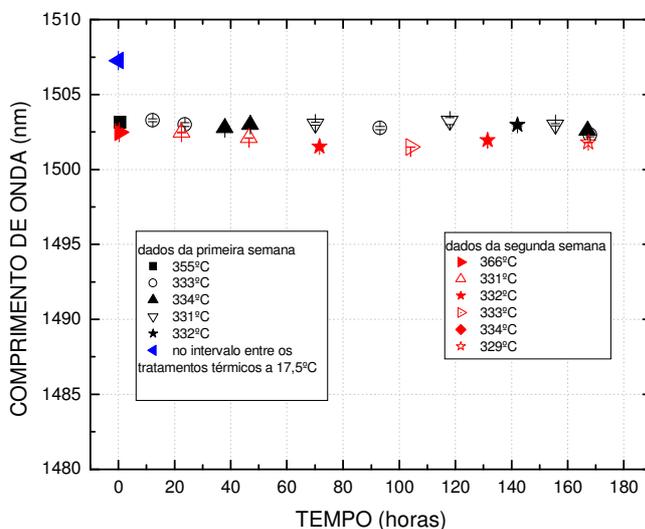


Figura 79: Acompanhamento da posição do vale de atenuação da LPG5 durante as duas semanas nas quais foi mantida em temperatura de 350°C.

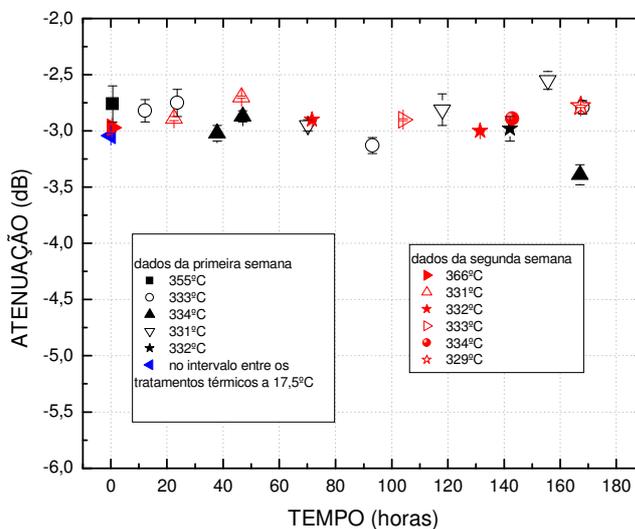


Figura 80: Acompanhamento da atenuação da LPG5 durante as duas semanas nas quais foi mantida em temperatura de 350°C.

Embora o forno estivesse programado para manter a temperatura de 350°C, houve algumas variações que foram detectadas com o auxílio do termômetro digital e que estão anotadas nas

legendas dos gráficos. Essas oscilações de temperatura podem ter provocado pequenos desvios nos pontos experimentais.

Depois desse processo de teste de estabilização térmica, que manteve a LPG5 por duas semanas em 350°C, não foram observados desvios adicionais em comprimento de onda e nem mesmo degradação na amplitude dessa rede. Os defeitos residuais ainda instáveis a 425°C (temperatura do “*quenching*”) foram removidos e consequentemente a estabilização da rede até 350°C foi alcançada. A Figura 81 mostra a resposta da LPG5 à variações de temperatura inferiores a 350°C depois das duas semanas de estabilização térmica em 350°C. Como o espectro estava menos ruidoso, o ajuste de múltiplas gaussianas na determinação do comprimento de onda central apresentou menores erros. Além disso, o registro de um maior número de espectros para compor o gráfico da Figura 81, possibilitou o traçado da curva de calibração definitiva dessa rede. A Equação 54 foi utilizada nesse ajuste.

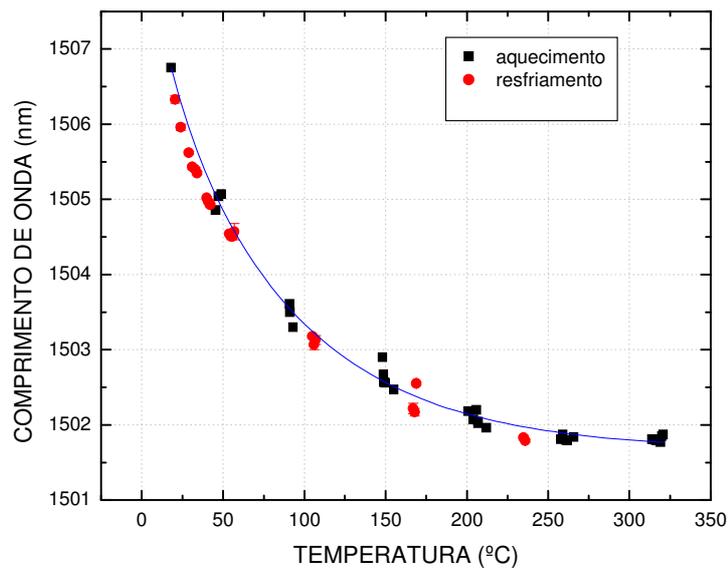


Figura 81: Resposta da LPG5 à variações de temperaturas inferiores a 350°C.

A equação obtida para o ajuste apresentado na Figura 81 é:

$$\lambda(T) = 1,34.e^{(-T/16,76)} + 5,81.e^{(-T/80,70)} + 1501,66 \quad (55)$$

na qual λ é a posição espectral em comprimento de onda, dada em *nanometros*, e T é a temperatura em °C.

A posição espectral foi medida durante o ciclo de aquecimento e resfriamento, apresentado na Figura 81, e a resposta térmica da LPG5 não mostrou desvios em comprimento de onda ao final desse processo. A sensibilidade térmica dessa rede mostrou um comportamento não linear no intervalo de temperaturas analisado neste experimento, variando de - 0,044 nm/°C, na região de sensibilidade mais elevada (de 20°C a 50°C), para aproximadamente -0,0044 nm/°C na região de sensibilidade mais baixa (de 250°C a 300°C). Um comportamento não linear semelhante foi observado com uma LPG de elevada sensibilidade produzida em fibra ótica dopada com B-Ge (SHU, ALLSOP, GWANDU *et al*, 2001).

Na repetição desse processo de aquecimento até 300°C seguido de resfriamento, seguindo-se a programação apresentada na Figura 29, porém retirando-se a fita adesiva durex que prendia a extremidade inferior da LPG5, houve mais uma vez a confirmação dessa resposta para temperaturas compreendidas entre 18°C e 300°C.

4.3.9 Resultados dos Ensaios para Investigação da Aplicabilidade das LPGs na Detecção de Curvaturas em Diferentes Planos

A Figura 82 apresenta as variações espectrais da LPG12 quando foram feitas mudanças aleatórias no estado de polarização da radiação por ela transmitida. Como esse experimento tratou-se apenas de uma inspeção preliminar, os estados de polarização não foram cuidadosamente controlados. Pela observação da sobreposição desses espectros, constatou-se que a rede é sensível a esse parâmetro. No detalhe ampliado da Figura 82 percebe-se que houve um deslocamento espectral aparentemente mensurável.

A Tabela 23 apresenta os resultados das medidas realizadas através da montagem apresentada na Figura 33. Nesse experimento procurou-se investigar a resposta espectral da LPG12 ao alterar-se o estado de polarização da luz com o auxílio de uma FBG Hi-Bi. A resolução do OSA empregada nas medidas 1 e 2 foi de 0,1 nm e nas medidas 3 e 4 de 0,2 nm.

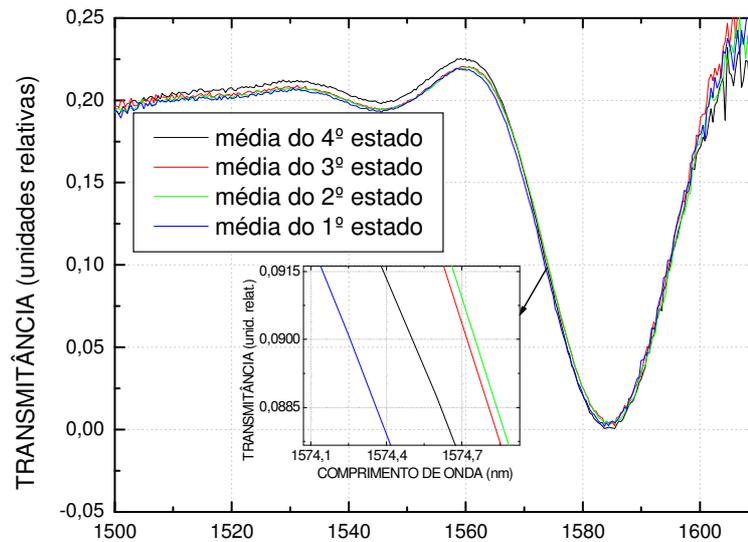


Figura 82: Variações espectrais que demonstram a sensibilidade da LPG12 à mudanças no estado de polarização. No detalhe observa-se um deslocamento em comprimento de onda aparentemente mensurável.

Tabela 23: Resposta da LPG12 às mudanças do estado de polarização da luz.

n° da medida	estado de polarização	FBG Hi-Bi		LPG
		λ_{B_x} (nm)	λ_{B_y} (nm)	λ (nm)
1	1	$1549,73 \pm 0,01$	PICO NÃO VISÍVEL	$1581,54 \pm 0,42$
	2	PICO NÃO VISÍVEL	$1550,25 \pm 0,01$	$1580,99 \pm 0,35$
	3	$1549,73 \pm 0,01$	$1550,25 \pm 0,01$	$1581,23 \pm 0,37$
2	1	$1549,73 \pm 0,01$	PICO NÃO VISÍVEL	$1581,37 \pm 0,50$
	2	PICO NÃO VISÍVEL	$1550,25 \pm 0,01$	$1580,85 \pm 0,44$
	3	$1549,73 \pm 0,01$	$1550,25 \pm 0,01$	$1581,12 \pm 0,30$
3	1	$1549,73 \pm 0,01$	PICO NÃO VISÍVEL	$1581,02 \pm 0,13$
	2	PICO NÃO VISÍVEL	$1550,25 \pm 0,01$	$1580,74 \pm 0,14$
	3	$1549,73 \pm 0,01$	$1550,25 \pm 0,01$	$1580,94 \pm 0,14$
4	1	$1549,73 \pm 0,01$	PICO NÃO VISÍVEL	$1581,18 \pm 0,14$
	2	PICO NÃO VISÍVEL	$1550,25 \pm 0,01$	$1580,82 \pm 0,15$
	3	$1549,73 \pm 0,01$	$1550,25 \pm 0,01$	$1581,09 \pm 0,13$

Os erros, que aparecem na Tabela 23, para o comprimento de onda da FBG Hi-Bi, são relativos aos desvios entre diferentes medições, e para o comprimento de onda da LPG12 são relativos aos ajustes com múltiplas gaussianas do programa Origin. Como a diferença entre as posições espectrais da LPG12 entre distintos estados de polarização em alguns casos foi menor do que o erro devido ao ajuste de múltiplas gaussianas, não se obteve uma confirmação satisfatória a respeito da resposta espectral da LPG12 às mudanças do estado de polarização da luz. Essas diferenças espectrais foram pequenas quando comparadas com a de redes gravadas em fibras com núcleo elíptico ou fibras D, nas quais as mudanças são de aproximadamente 15 nm (ALLSOP, DUBOV, MARTINEZ *et al*, 2006), ou com a de redes gravadas com laser de femtosegundo, nas quais os deslocamentos chegam a 4,1 nm e 6,4 nm, dependendo da banda de atenuação monitorada (ALLSOP, KALLI, ZHOU *et al*, 2008).

Antes de realizarem-se mais ensaios experimentais alguns trabalhos de outros pesquisadores foram estudados. Segundo os experimentos de Patrick e seus colaboradores, rotacionar o plano de propagação da luz linearmente polarizada não é equivalente a rotacionar a LPG (PATRICK, CHANG e VOHRA, 1998). No trabalho de Allsop e seus colaboradores a luz polarizada foi empregada durante a gravação de LPGs, em fibras de cristal fotônico, a fim de investigar o espectro de transmissão das redes, durante a inscrição com um laser de femtosegundo. As LPGs daquele trabalho que apresentavam assimetria na modulação do índice exibiam deslocamentos espectrais de 6,4 nm e 4,1 nm, para as bandas centradas em 1590 nm e 1350 nm, respectivamente, ao ser alterado o estado de polarização da luz. O grupo de Allsop, ao realizar ensaios de curvatura, empregou a luz polarizada somente para maximizar a eficiência das bandas de atenuação de LPGs que apresentavam assimetrias na modulação do índice de refração (ALLSOP, KALLI, ZHOU *et al*, 2008).

Com a montagem esquematizada na Figura 34, cuja fotografia está apresentada na Figura 83, seguiram-se os procedimentos especificados na seção 3.3.9 do capítulo 3 com outra rede, a LPG20. Como os deslocamentos espectrais não haviam sido significativos com a LPG12, na alteração do estado de polarização, e aliado ao fato de não haver garantias de que o estado de polarização da luz refletida pela FBG Hi-Bi seria o mesmo da luz transmitida nas LPGs, optou-se por fazer a análise dos dados coletados com luz não polarizada. Inclusive tentou-se com a outra rede, a LPG20, aumentar a atenuação espectral alterando-se o estado de polarização através do controlador de polarização, de acordo com os procedimentos apresentados por Allsop e seus colaboradores (ALLSOP, KALLI, ZHOU *et al*, 2008), mas não foram detectadas alterações espectrais mensuráveis.

A Figura 84 mostra a evolução espectral do vale de atenuação da LPG20 em diferentes curvaturas, segundo os ângulos de rotação da fibra de 0° e de 120° , e o detalhe da secção transversal da fibra quando rotacionada segundo esses ângulos. Na representação da secção transversal da fibra, o lado do núcleo que está mais escurecido corresponde ao lado de incidência da luz UV e que tem forte absorção a essa radiação. Os gráficos referentes à resposta espectral da LPG20 quando rotacionada nos demais ângulos do experimento estão no Anexo 5.

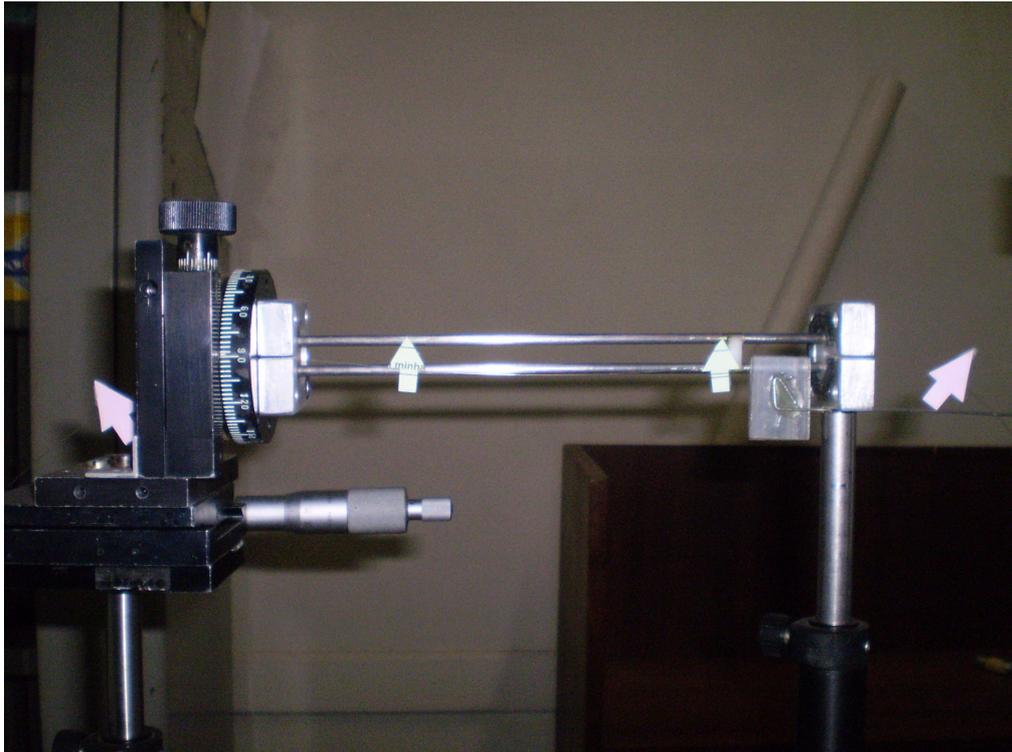


Figura 83: Fotografia da montagem para os ensaios de curvatura

Pela Figura 84 percebe-se que na medida em que a curvatura aumentou tornou-se cada vez mais aparente uma segunda banda de atenuação situada em maiores comprimentos de onda, enquanto que a amplitude da banda situada em menores comprimentos de onda gradualmente decresceu. A formação de novas bandas no espectro de transmissão pode ocorrer devido a quebras na simetria dos modos de casca (LIU, ZHANG, WILLIAMS, 2000; BLOCK, DANGUI, DIGONNET *et al*, 2006) ou por birrefringência induzida pela curvatura (GONZÁLEZ, ARCE-DIEGO, COBO *et al*, 2001). A eficiência do acoplamento entre os modos de casca e o modo fundamental de núcleo da LPG varia de acordo com o raio da curvatura aplicada. Pode-se observar que a amplitude do vale de ressonância, situado em menores comprimentos de onda, diminui quando a rede é curvada como resultado da redução da eficiência do acoplamento.

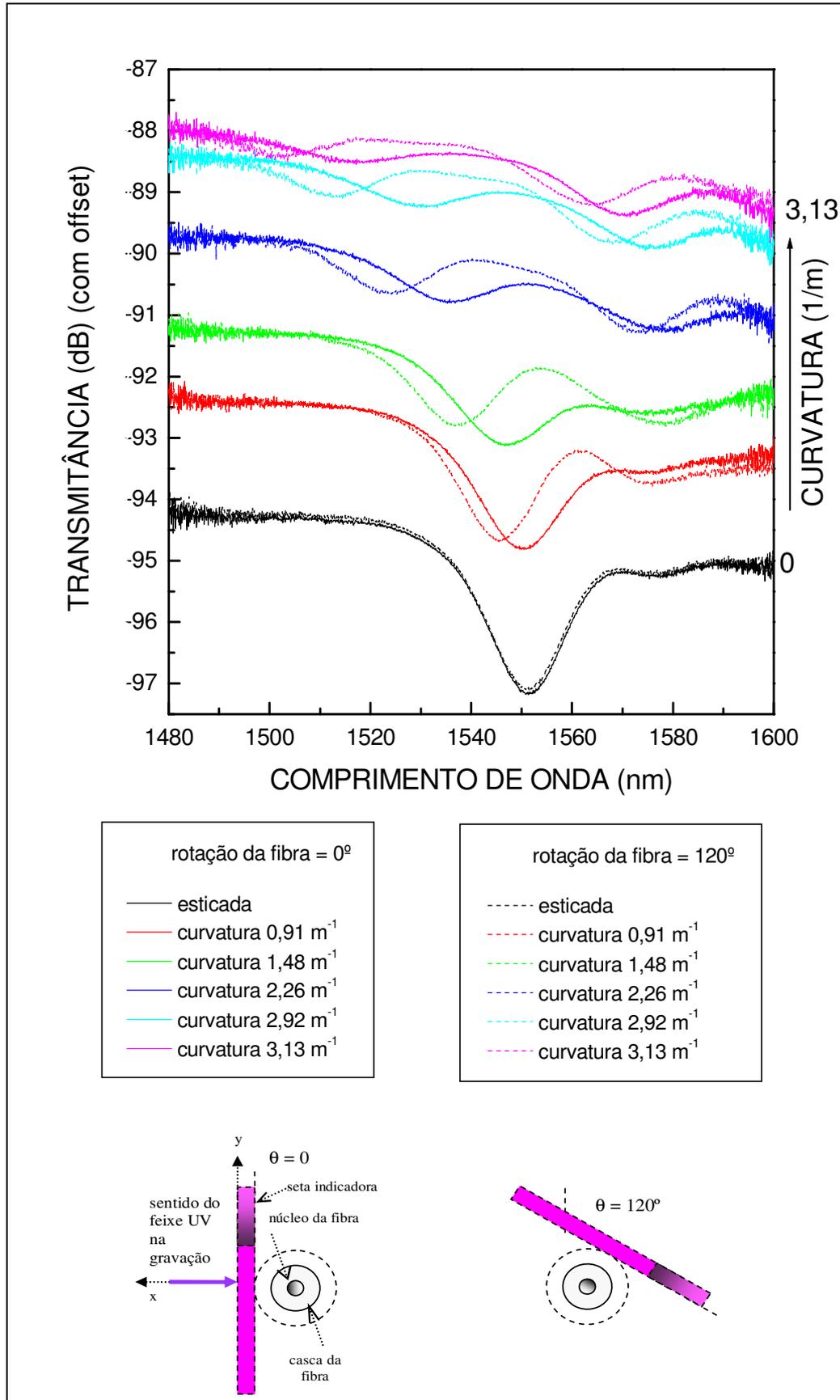


Figura 84: Respostas espectrais da LPG20 à curvatura quando rotacionada de 0° e de 120° .

Fica evidente também pela Figura 84 de que a técnica de gravação ponto-a-ponto, empregada com o laser Nd:YAG operando em 266 nm, diferentemente da técnica que emprega máscara de amplitude, provoca uma maior assimetria na modulação do índice de refração do núcleo da fibra, já que para uma mesma curvatura os deslocamentos espectrais são diferentes se a fibra estiver rotacionada de diferentes ângulos.

Como a resposta às curvaturas da LPG20 não foi linear nem unívoca, optou-se pelo emprego de redes neurais artificiais (RNA) para correlacionar as curvaturas empregadas na LPG20, bem como as direções das curvaturas, com as referidas respostas espectrais. As RNA são estruturas matemáticas capazes de implementar padrões de associação entre grandezas independentemente da linearidade envolvida em tais associações. Construíram-se três RNA para tentar identificar as curvaturas empregadas na LPG20, bem como as direções das referidas curvaturas. As RNA foram construídas a partir dos dados obtidos experimentalmente, mas cada uma empregou um conjunto de dados diferente. As redes foram denominadas de RNA1, RNA2 e RNA3 e os conjuntos de dados empregados na construção de cada uma foram os seguintes:

(i) RNA1 – 77 valores de atenuação máxima (A_I) e de posição do comprimento de onda central (λ_{c1}) da banda de atenuação situada em menores comprimentos de onda.

(ii) RNA2 – 77 valores da posição do comprimento de onda central (λ_{c1}) da banda de atenuação situada em menores comprimentos de onda.

(iii) RNA3 – 77 valores das posições dos comprimentos de onda centrais (λ_{c1} e λ_{c2}) das duas bandas de atenuação.

Como não há um modelo matemático que descreva as relações entre tais grandezas (A_I e λ_{c1} e λ_{c2}) e poucos estudos foram feitos nessa área, optou-se pelo emprego de um método capaz de correlacionar as referidas grandezas, a partir de um conjunto de dados experimentais, e generalizar esse complexo comportamento para hipotéticas situações. Esses dados compuseram o vetor de entrada x para a construção e a validação de diversas RNA, com a estrutura *Perceptron Multicamadas* (MLP), as quais foram implementadas com o auxílio do programa Matlab®, versão 7.5. Os valores de saída y para essas RNA foram atribuídos segundo os valores de curvatura, variando entre 0 m^{-1} e $3,13 \text{ m}^{-1}$, e da direção de curvatura, oscilando entre 0 rad e $\pi \text{ rad}$, os quais originaram cada um dos valores intrínsecos a x . Esses dados podem ser visualizados na Figura 85.

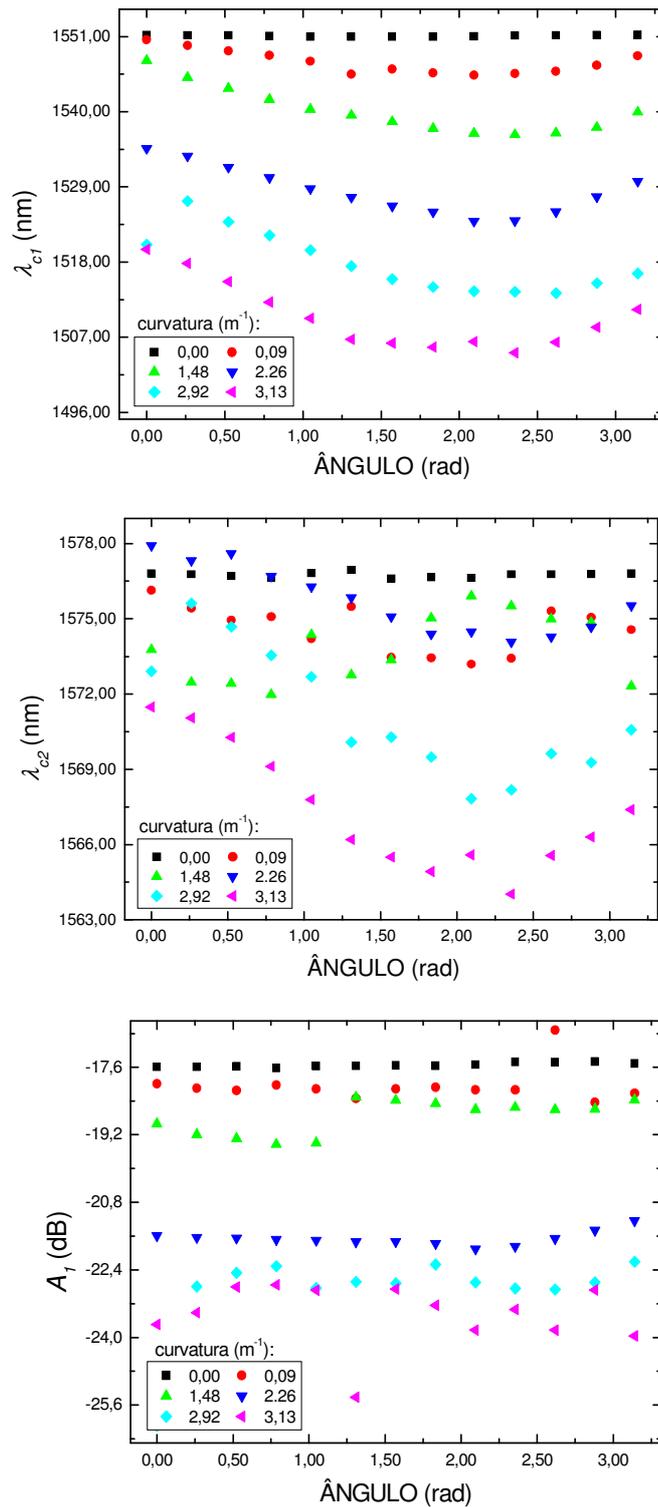
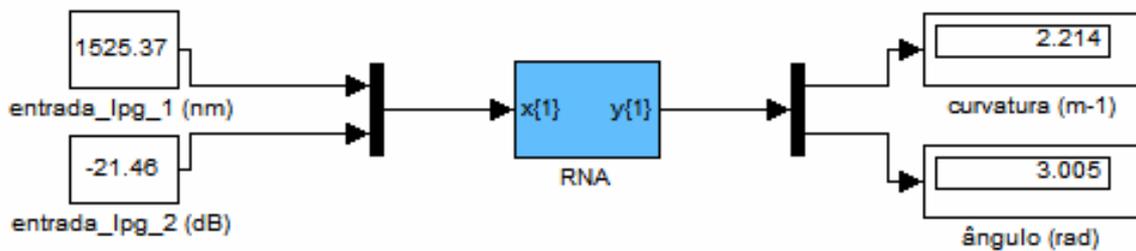


Figura 85: Dados para a construção da RNA1, RNA2 e RNA3.

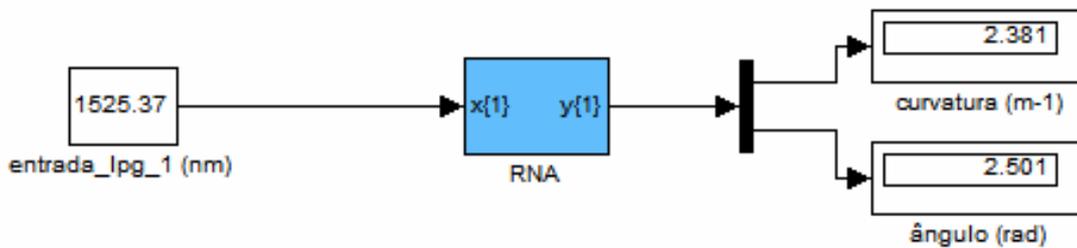
Um subconjunto de 67 amostras, aleatoriamente escolhidas do conjunto inicial de dados constituintes de cada RNA, foi utilizado para treinar as MLP, segundo o algoritmo de retro-

propagação do erro. O número de camadas ocultas (M) e o número de neurônios em cada uma dessas camadas (N_i , com $i = 1, 2, \dots, M$) foram variados de forma a se obter o menor erro médio quadrático e uma capacidade preditiva ótima. Um subconjunto com 10 amostras foi utilizado para testar as MLP. As funções de ativação utilizadas foram do tipo tangente hiperbólica, nas camadas ocultas, e do tipo linear, na camada de saída.

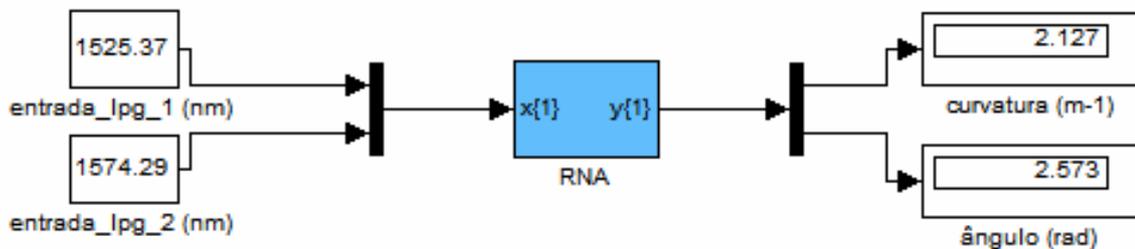
Uma vez construída, uma RNA pode ser facilmente empregada para a supervisão do sistema óptico de medição. A Figura 86 ilustra os diagramas de blocos que representam mais detalhadamente esses procedimentos.



(a)



(b)



(c)

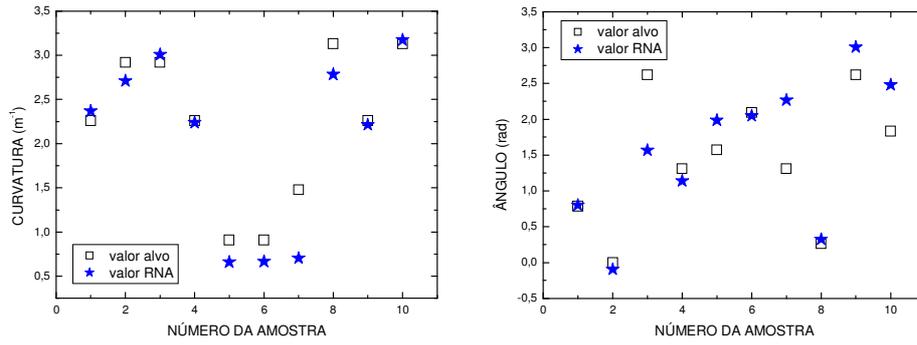
Figura 86: Diagrama esquemático do princípio de supervisão realizado pela (a) RNA1, (b) RNA2 e (c) RNA3.

Os dados captados dos espectros de transmissão da LPG20 são apresentados a cada RNA que é capaz de processá-los e fornecer os valores de curvatura e de ângulo de curvatura impostos ao transdutor ótico.

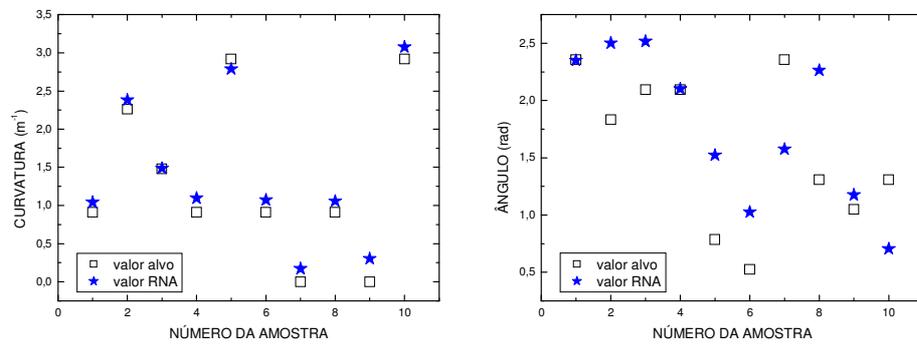
As inúmeras simulações executadas demonstraram que a escolha adequada dos parâmetros da MLP é decisiva em seu desempenho. Os parâmetros de construção da topologia com resposta mais satisfatória, considerando as etapas de treinamento e de teste, são $M = 3$ e $N_1 = 45$, $N_2 = 20$ e $N_3 = 2$. O erro médio quadrático obtido após o procedimento de treinamento, que durou 11 épocas para cada RNA, foi de aproximadamente 0,02.

A Figura 87 ilustra o conjunto de dados empregados para teste das melhores MLP. Os valores experimentais conhecidos de cada conjunto de entrada (\square) são comparados àqueles fornecidos pela RNA (\star). Os erros médios quadráticos entre os valores calculados pela RNA e os valores alvos foram de (i) $0,091 \text{ m}^{-1}$ e $0,281 \text{ rad}$ para a RNA1, (ii) $0,028 \text{ m}^{-1}$ e $0,333 \text{ rad}$ para a RNA2 e (iii) $0,013 \text{ m}^{-1}$ e $0,357 \text{ rad}$ para a RNA3. Esses erros poderiam ser reduzidos caso um número maior de dados fosse utilizado para a construção das MLP.

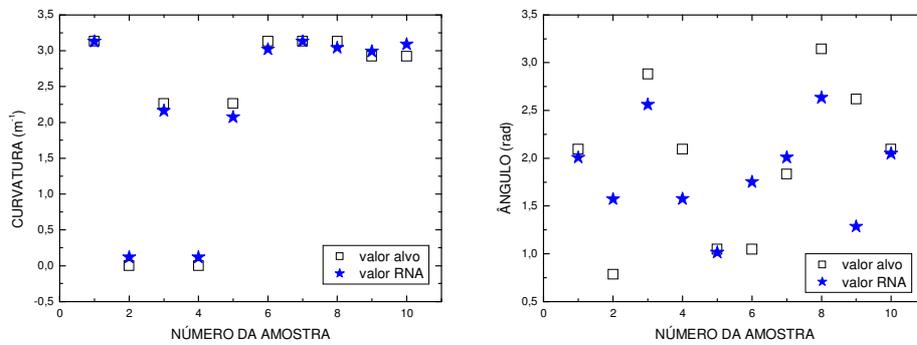
A RNA3, que foi treinada com valores das posições espectrais centrais das duas bandas de atenuação (λ_{C1} e λ_{C2}), demonstrou-se mais precisa para a determinação de curvaturas do que a RNA1 e a RNA2. Já a RNA1, que foi treinada com valores de atenuação máxima (A_I) e posições espectrais centrais apenas da banda situada em menores comprimentos de onda (λ_{C1}), demonstrou-se a mais eficiente das três RNA na determinação das direções das curvaturas. O emprego da RNA3, para a determinação da curvatura, e da RNA1, para a determinação da direção da curvatura foi capaz de fornecer essas medidas com os menores erros médios quadráticos.



(a)



(b)



(c)

Figura 87: Comparação entre as respostas desejadas (\square) e as respostas fornecidas (\star) pela (a) RNA1, (b) RNA2 e (c) RNA3, quando fomentadas pelos dados de teste.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Esta tese comprovou a possibilidade de gravação de redes de período longo através da técnica de escrita ponto-a-ponto com radiação UV, utilizando uma fonte ótica laser (*New Wave, Tempest-20 Nd:YAG*) operando em 266 nm. Até então as redes gravadas por essa fonte empregavam máscaras de amplitude (JAMES, TATAM, TWIN *et al*, 2003) que limitam a escolha do período das redes ao valor do período das máscaras. As sensibilidades desses dispositivos à alterações do índice de refração do meio externo, à variações de temperatura, à tensões longitudinais, bem como à curvaturas em diferentes orientações foram investigadas. Essas redes demonstraram também que têm potencial para operar em elevadas temperaturas, já que não foi observada a extinção de uma delas quando submetida a temperaturas que alcançaram 1200°C. Além disso, foram testadas diferentes estratégias de estabilização térmica, que atingiram temperaturas até 425°C, para as redes operarem em temperaturas que variem desde a ambiente até 300°C.

5.1 REDES DE PERÍODO LONGO PRODUZIDAS E SUAS CARACTERIZAÇÕES

Através do processo ótico de gravação, que faz uso de radiação UV, foram gravadas LPGs em fibras óticas hidrogenadas no Laboratório de Laser da UTFPR. Foram utilizadas duas espécies de fibras nas gravações, a “*Centaurus*” e a “*Nufern GFI*”. A largura de banda de todas as redes gravadas na fibra “*Nufern GFI*” foi inferior a de uma LPG também gravada na mesma fibra hidrogenada, com laser de femtosegundo, operando em 264 nm, que apresentou largura de banda de 44 nm para o vale de maior atenuação centrado em 1594 nm (KALACHEV, PUREUR e NIKOGOSYAN, 2005). Também as comparando às primeiras LPGs produzidas no mesmo laboratório pela técnica com arco elétrico, as LPGs produzidas óticamente, com exceção da LPG13, apresentaram menores atenuações, ou maiores eficiências, bem como menores larguras de banda, o que representa um aspecto positivo para um sensor dessa natureza.

As redes produzidas passaram por diversos processos de caracterização. Na caracterização quanto ao índice de refração, constatou-se que as redes gravadas com UV foram mais sensíveis às

modificações do meio externo do que as redes gravadas com arco elétrico no mesmo laboratório, dentro da mesma faixa espectral analisada.

A cinética das LPGs escritas com radiação UV, em fibras hidrogenadas, nas primeiras horas após a gravação, mostram importantes alterações espectrais, tais como deslocamentos em comprimento de onda e variações de amplitude. Essas mudanças comprometem o correto funcionamento desses dispositivos no monitoramento de parâmetros físico-químicos. As redes apresentam uma grande instabilidade que se estende por mais de 500 horas nos seus espectros. Isso se deve à difusão de moléculas de hidrogênio das regiões do núcleo não expostas à radiação UV para as regiões do núcleo expostas à radiação UV, bem como da casca da fibra para as regiões expostas do núcleo. Essas alterações espectrais são prejudiciais para o desempenho do sensor até que a sua estabilidade seja atingida.

Comparadas às sensibilidades das redes gravadas por meio da técnica do arco elétrico, que apresentam sensibilidade térmica positiva na faixa de temperatura de 22°C a 63°C (FALATE, 2002), as redes gravadas com UV apresentam sensibilidade térmica negativa, porém com a mesma ordem de grandeza.

O comportamento térmico das redes é altamente dependente do meio no qual elas são inseridas. Tal dependência é derivada da relação entre o índice de refração do meio e os parâmetros da rede. Se essas redes gravadas com UV forem utilizadas como transdutores de temperatura em diferentes espécies de fluidos, as suas respostas térmicas devem ser cautelosamente investigadas em tais meios. Esse mesmo cuidado deve ser tomado quando se pretende inserir a LPG em um fluido para aumentar ou diminuir a sua sensibilidade térmica.

O experimento para a investigação da sensibilidade às tensões longitudinais revelou uma sensibilidade baixa e negativa, com a rede imersa no ar. No ensaio realizado encontrou-se uma sensibilidade de $-0,19 \pm 0,15$ pm/ $\mu\epsilon$ na faixa de 0 a 125 $\mu\epsilon$. Uma LPG escrita com arco elétrico, 59 pontos e período de 595 μm , apresentou sensibilidade a esse parâmetro 1,53 vezes maior quando submetida a deformações longitudinais de 0 a 250 $\mu\epsilon$ no ar (KAMIKAWACHI, POSSETTI, FALATE *et al*, 2007). Uma LPG praticamente insensível a tensões longitudinais pode ser útil quando existem problemas de sensibilidade cruzada envolvidos e somente uma grandeza deve ser mensurada. Tal proposta é vantajosa no sensoriamento quando se pretende isolar a resposta do sensor a um ou a outro parâmetro. Mas para o ideal desempenho desses dispositivos nos quais a sensibilidade cruzada entre deformação longitudinal e temperatura, por exemplo, deseja ser eliminada, é necessária uma investigação criteriosa do período da LPG bem como da resposta da rede a esses parâmetros.

Os resultados experimentais relativos ao ensaio no qual a LPG3 resistiu a temperaturas elevadas de até 1200°C, provaram que os defeitos fotoinduzidos foram responsáveis por aproximadamente 23 % da eficiência da LPG3. Por isso pode-se afirmar que os defeitos fotoinduzidos são responsáveis por cerca de 20 % da eficiência de uma LPG quando é empregada uma fonte laser Nd:YAG, operando em 266 nm, para produzir tal dispositivo pela técnica ponto-a-ponto com as fluências e tempos de exposição que foram empregadas neste trabalho. Os pulsos de energia elevados aos quais cada ponto de cada LPG foi exposto ao longo de 200 segundos, durante as gravações, também foram responsáveis por modificações estruturais. Dessa forma o principal mecanismo envolvido no processo de escrita das LPGs é referente à densificações, já que a 1200°C ainda foi detectada modulação de índice de refração. As alterações registradas nessa rede após esse experimento foram a perda de eficiência e um deslocamento permanente em comprimento de onda.

Para ser alcançada a estabilização térmica das redes foram experimentados dois diferentes processos de tratamento térmico, denominados de “*annealing*” e “*quenching*”. Os dois tratamentos envolveram o aquecimento de LPGs até 425°C, mas diferiram na técnica empregada no resfriamento. No “*annealing*” o processo de resfriamento foi lento já que foi realizado no interior do próprio forno e acompanhou a redução natural da temperatura do mesmo até a ambiente. No “*quenching*” o processo de resfriamento foi brusco, já que as redes foram transferidas instantaneamente dos 425°C para a temperatura ambiente. A comparação dos dois processos mostrou que o aquecimento das redes seguido de “*quenching*” apresentou uma estabilização mais rápida do que o aquecimento seguido de “*annealing*”. Após dois ciclos de “*quenching*” a estabilização térmica da LPG5 e da LPG6 foi alcançada enquanto que a LPG8, submetida ao processo de resfriamento lento, não foi estabilizada mesmo depois de passar por três processos de “*annealing*”.

Após o processo de estabilização térmica de “*quenching*”, nenhuma degradação adicional foi observada na rede mantida por duas semanas em uma temperatura de 350°C. Embora essa rede não tenha apresentado, posteriormente a sua estabilização, uma resposta linear às alterações de temperatura, compreendidas entre 20°C e 300°C, ela pode ser utilizada como elemento sensor dessa grandeza como o emprego da sua curva de calibração. Mas quando essa LPG for utilizada em aplicações reais será necessário recobrir a fibra para aumentar a robustez do sensor e, ao mesmo tempo, para assegurar que o meio circunvizinho não interfira com os modos de casca descontroladamente.

A resposta da LPG20 à curvatura foi investigada submetendo-a a curvaturas que variaram de 0 a 3,13 m⁻¹ em diferentes orientações. Embora a resposta às curvaturas da LPG20 não tenha

sido linear nem unívoca, através de ajustes lineares nos pontos experimentais, determinaram-se as sensibilidades médias à curvatura na orientação mais e menos sensível a esse parâmetro. A menor sensibilidade foi de $-10,37 \pm 2,39 \text{ nm/m}^{-1}$, que correspondeu à curvaturas na orientação de 0° , ou seja, direção na qual a rede foi curvada em um plano perpendicular ao de incidência da radiação UV na gravação. A maior sensibilidade correspondeu à orientação de 135° na qual o valor determinado foi de $-14,76 \pm 1,50 \text{ nm/m}^{-1}$. Liu e seus colaboradores não conseguiram identificar essa dependência rotacional da sensibilidade à curvaturas, em redes gravadas com UV utilizando máscara de amplitude, em fibras dopadas com boro e germânio. A máxima discrepância na sensibilidade à curvatura entre diferentes orientações que o grupo de Liu conseguiu determinar foi menor do que 1 nm/m^{-1} , medindo curvaturas em direções iguais a 0° , 90° , 180° e 270° (LIU, ZHANG, WILLIAMS, 2000). Com essa constatação comprovou-se que a técnica de gravação ponto-a-ponto, com luz UV, diferentemente da técnica que emprega máscara de amplitude, provoca uma maior assimetria na modulação do índice de refração do núcleo da fibra. Afinal, para uma mesma curvatura os deslocamentos espectrais são diferentes se a fibra estiver rotacionada de diferentes ângulos. A dependência rotacional da resposta à curvatura das LPGs gravadas com a técnica de gravação empregada neste trabalho pode permitir a identificação de curvaturas em diferentes planos de uma estrutura.

Os resultados apresentados, analisados e discutidos comprovaram que os objetivos desse trabalho foram atingidos. Ficou evidenciado que as redes de período longo produzidas ponto-a-ponto em fibras hidrogenadas, com o uso de um laser Nd:YAG, operando em 266 nm, após passarem por um processo de estabilização apropriado, têm potencial para serem aplicadas como elementos sensores de parâmetros físico-químicos. Dentre as aplicações desses dispositivos, constatou-se que os mesmos podem ser empregados no monitoramento de índice de refração, especialmente em ambientes sujeitos à variações de temperatura, de curvaturas em diferentes orientações e especialmente de temperaturas elevadas até 300°C .

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho não foram gravadas redes de período longo em série, ou com “*chirp*”, através do sistema que foi implementado no Laboratório de Laser para gravação ponto-a-ponto com a emissão de radiação UV. Isso não foi feito devido à limitação do deslocamento máximo do estágio de translação que desloca o feixe UV ponto-a-ponto. Atualmente o estágio é deslocado de uma

distância máxima de cerca de 2,45 cm. Esse avanço limitado também não permitiu que as redes gravadas com os períodos de 400 μm e 407 μm tivessem mais do que 60 pontos. Uma vez que a técnica de gravação foi dominada com essa fonte ótica, seria possível tentar gravar redes em série, com “*chirp*” ou com um número maior de pontos futuramente.

Como o processo de “*quenching*” demonstrou-se mais rápido e eficaz do que o processo de “*annealing*” para promover a estabilização térmica das redes, mais testes poderiam ser realizados empregando temperaturas mais baixas do que a utilizada nesse trabalho. Redes de período longo que não precisem operar em temperaturas tão elevadas poderiam sofrer menores perdas de atenuação se a temperatura do “*quenching*” for menor.

Esforços também podem ser concentrados na tentativa de buscar alcançar a estabilidade térmica dessas redes em temperaturas superiores a 500°C. Para isso devem ser empregadas redes com atenuações elevadas (no mínimo de 15 dB), já que após o primeiro ciclo de “*quenching*” as redes perdem mais de 50% da sua atenuação. Além disso, nos ensaios de “*quenching*” que são realizados retirando-se rapidamente a rede do interior do forno aquecido, para evitarem-se curvaturas indesejadas ou acidentes com a rede, seria conveniente pensar em uma forma de protegê-la, talvez a fixando no interior de um tubo de quartzo.

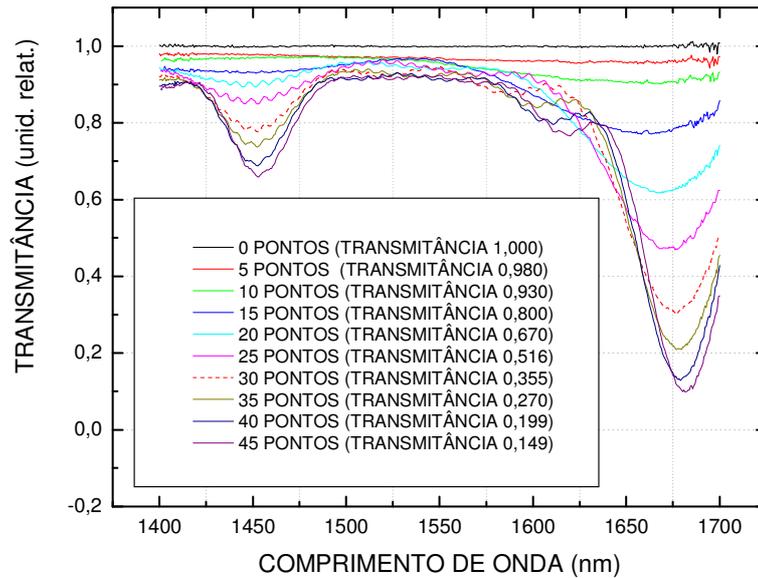
O dispositivo utilizado para rotacionar a LPG20, a fim de que ela seja curvada em diferentes planos, poderia ser aperfeiçoado de modo a permitir que a fibra descrevesse rotações superiores aos 180° que o sistema limita. Assim a sensibilidade às curvaturas seria investigada em mais direções. Outra questão seria a possibilidade de se obter um maior número de dados experimentais, nos ensaios de curvatura, a fim de que o erro médio quadrático entre os valores calculados pela RNA e os valores alvo fosse reduzido. Por isso ainda há perspectivas de treinar outras RNA com um maior número de dados referente ao sensor de curvaturas em diferentes orientações.

Outra possibilidade seria a realização de ensaios de compressão lateral das LPGs. A compressão lateral também deve gerar mudanças espectrais que possibilitariam novos métodos de medida de certos parâmetros físicos. Sensores baseados em birrefringência induzida por compressão podem ser aplicados no monitoramento de pressão de fluidos, de peso de caminhões, de deformações decorrentes de fissuras ou vibrações mecânicas em pontes, asas de aviões (com redes incrustadas) (GRIETENS e VOET, 2007) e outras estruturas.

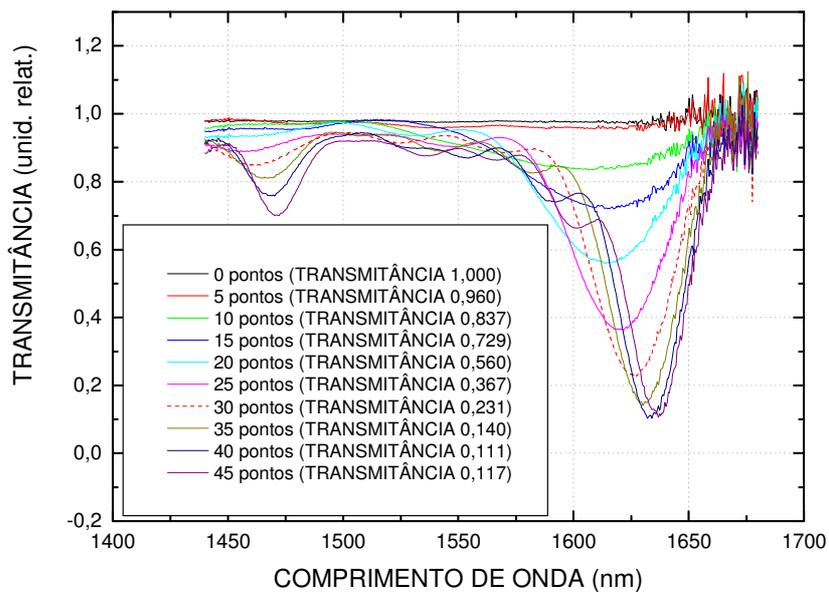
ANEXO 1

OS ESPECTROS DAS LPGs

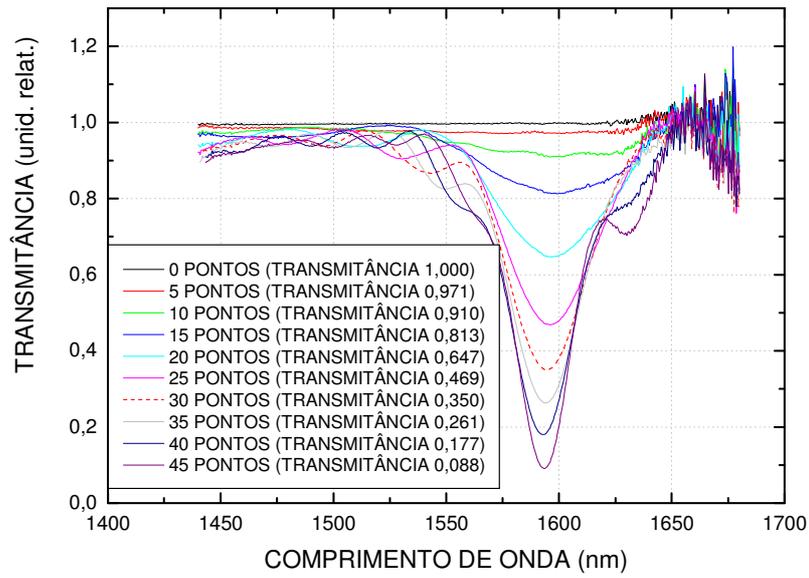
Neste anexo estão apresentados os espectros de dezoito das vinte LPGs gravadas oticamente no Laboratório de Laser.



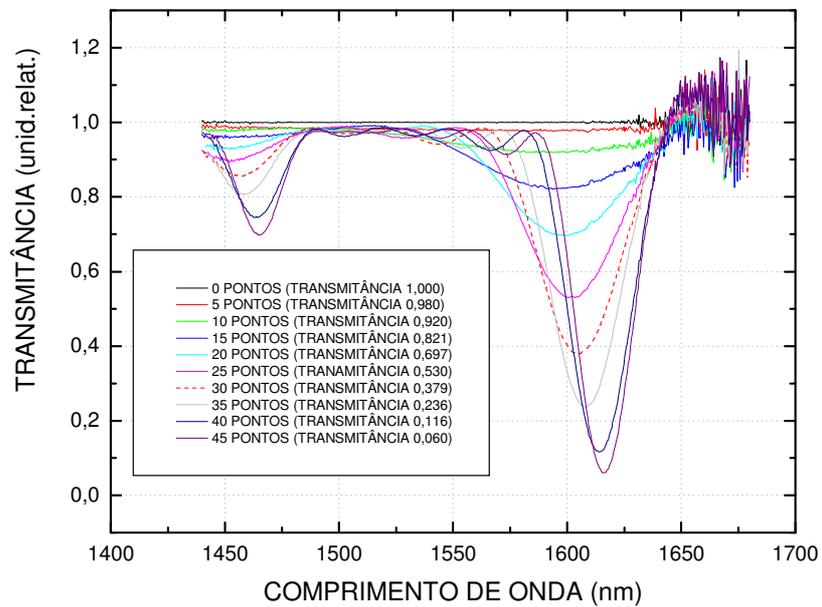
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG2 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



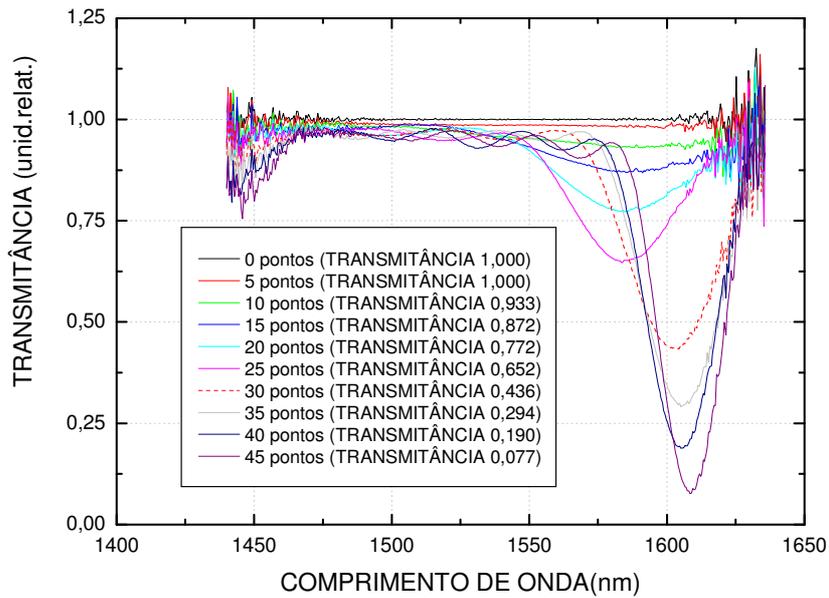
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG3 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



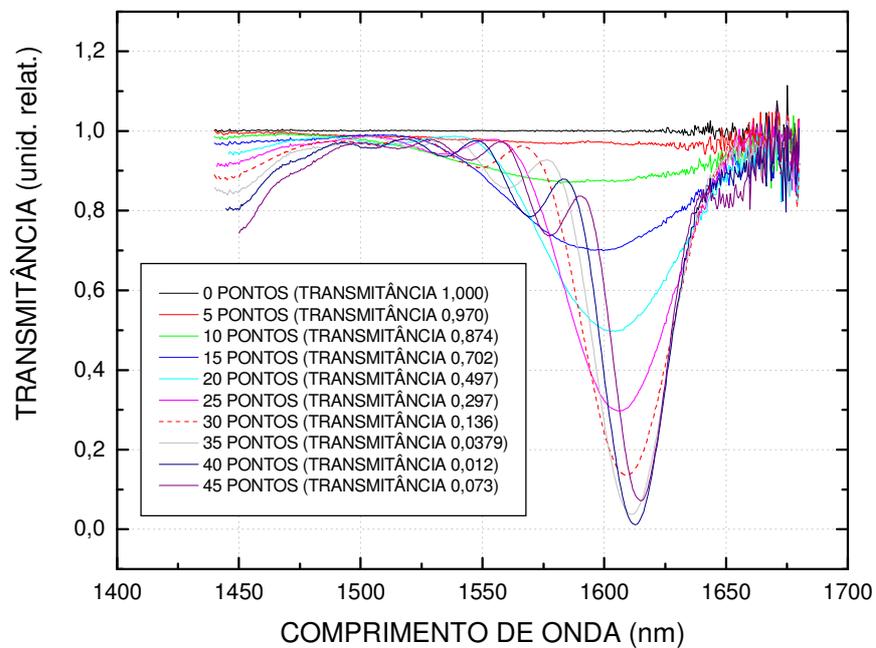
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG4 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



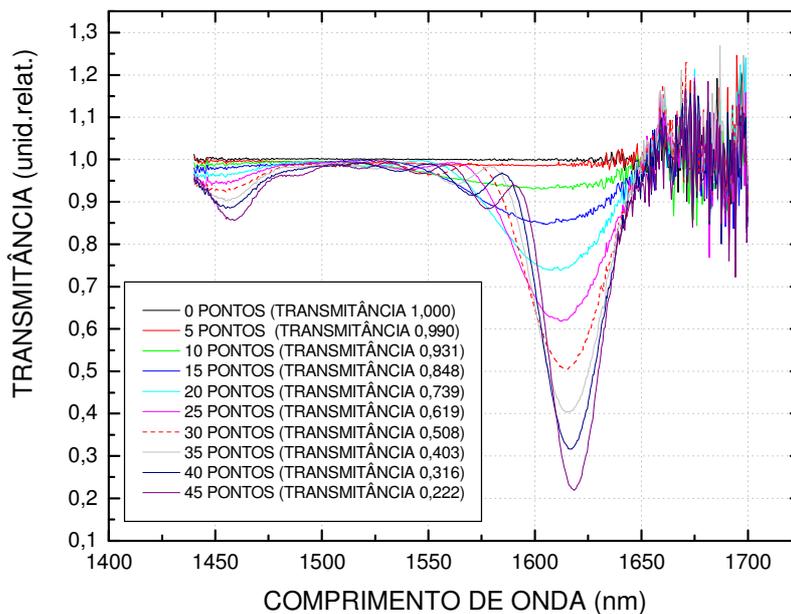
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG5 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



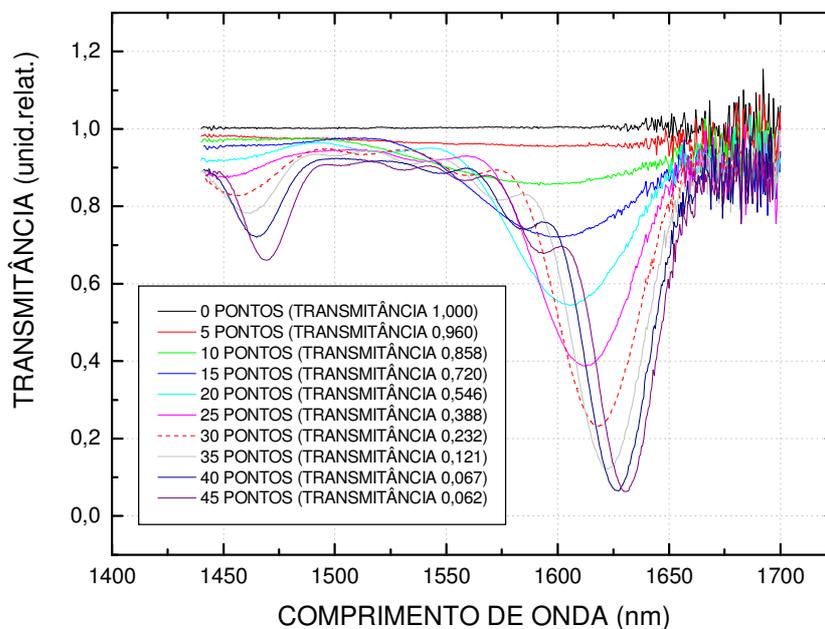
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG6 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



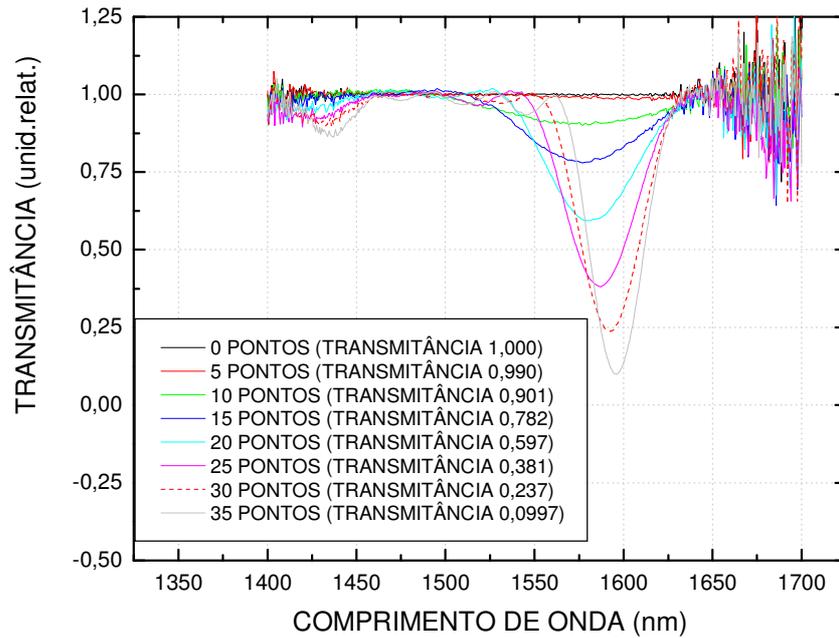
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG7 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



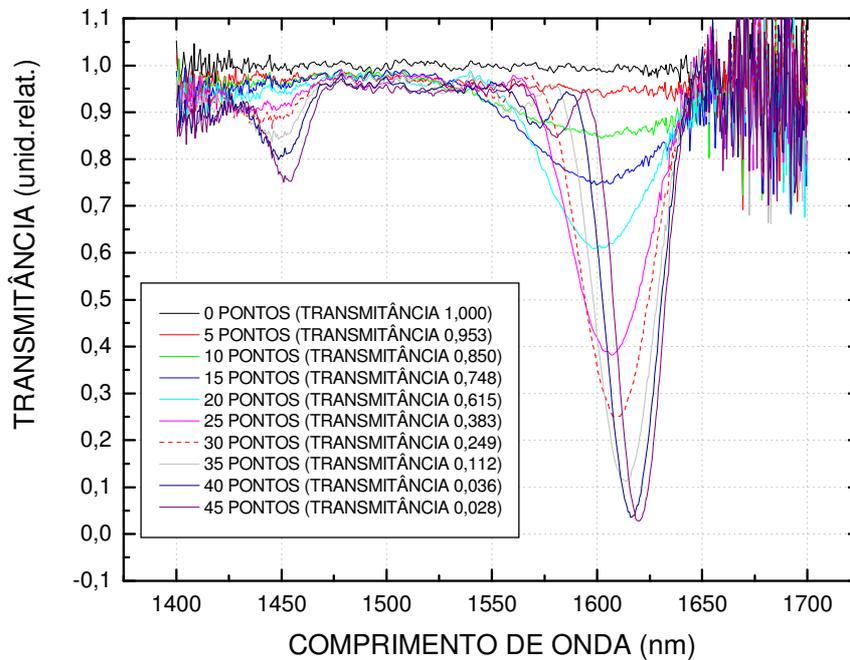
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG8 (fibra “Centaurus”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



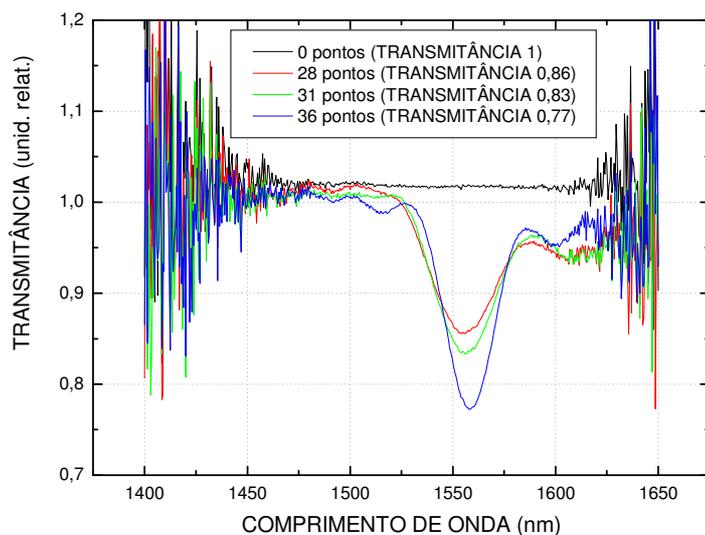
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG9 (fibra “Centaurus”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



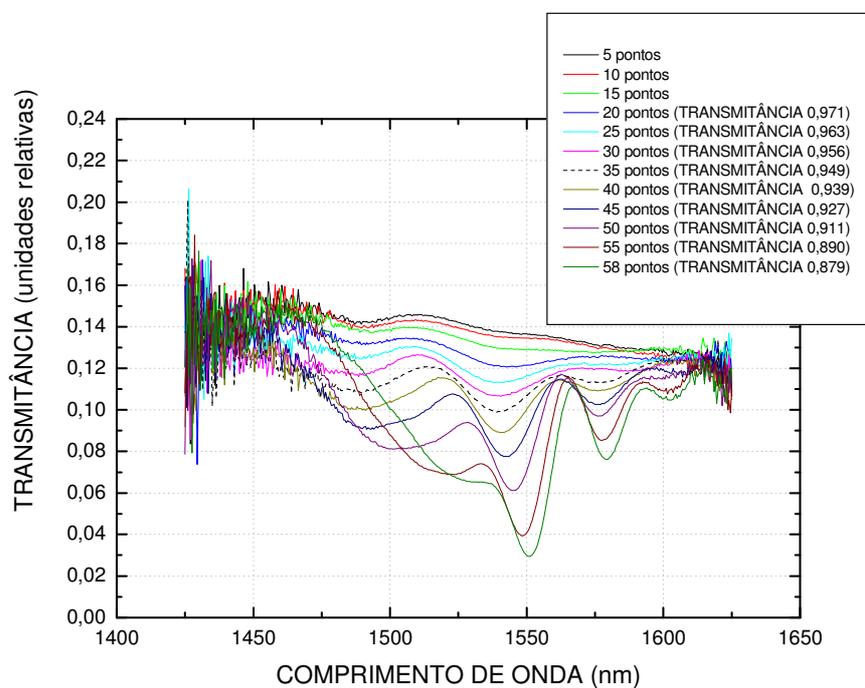
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG11 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



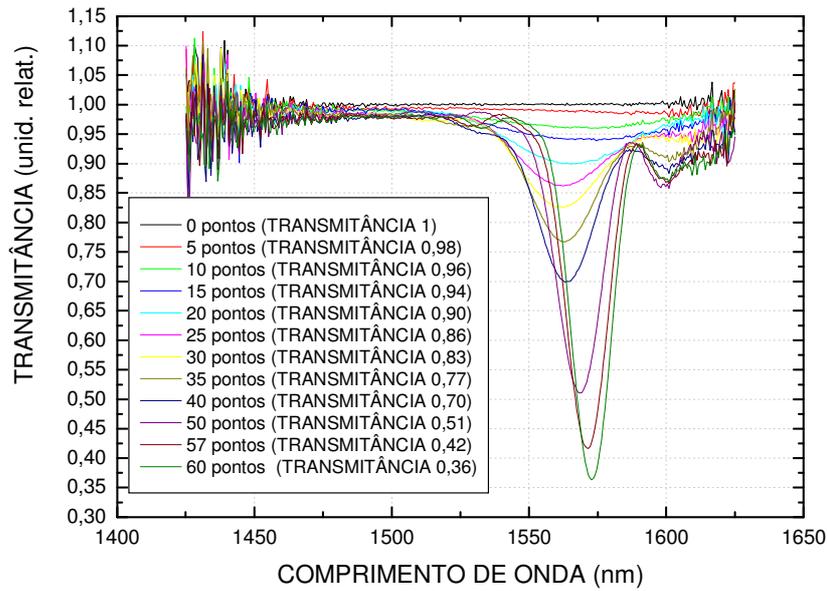
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG12 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



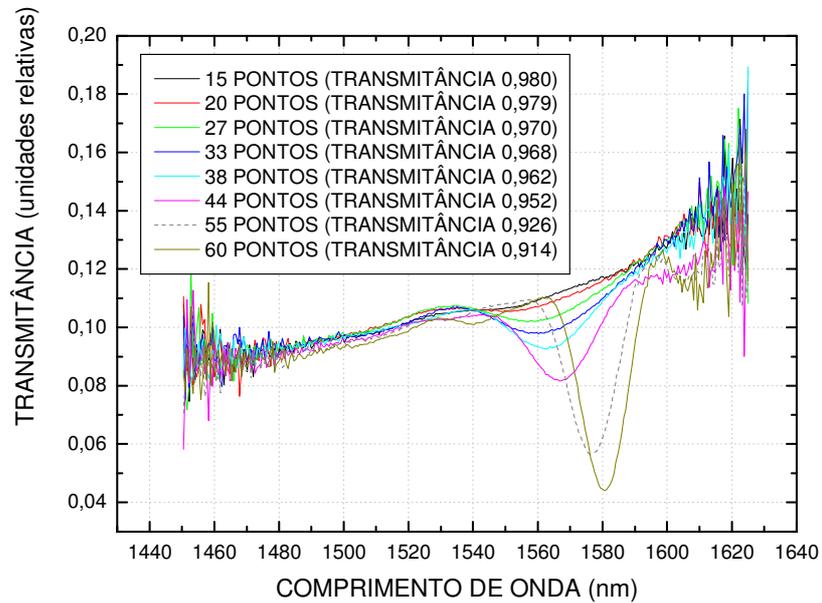
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG13 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



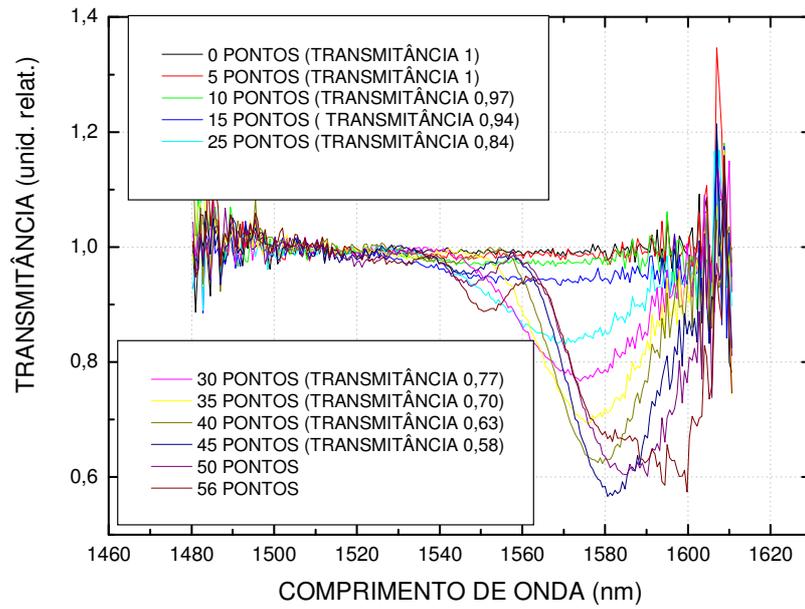
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG14 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



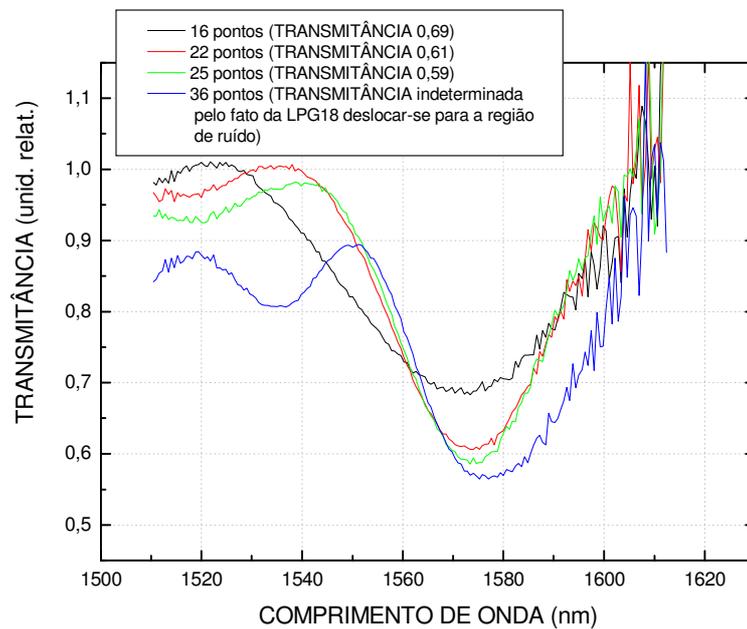
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG15 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



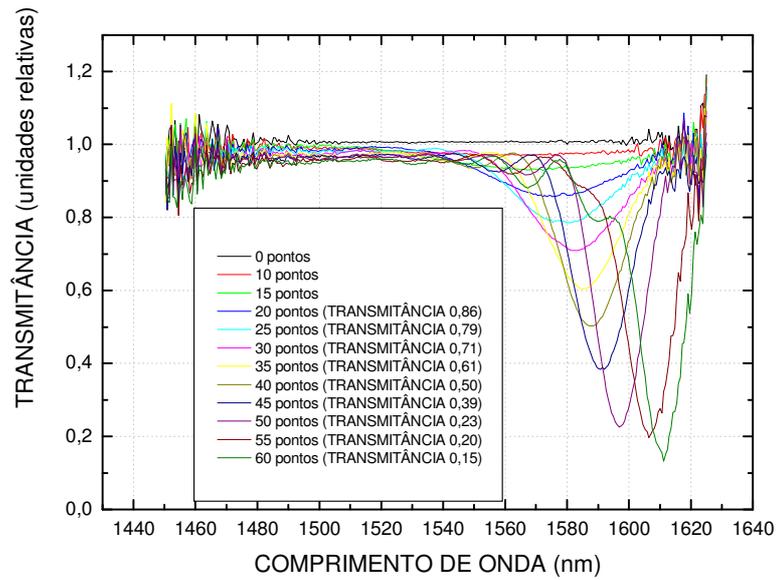
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG16 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



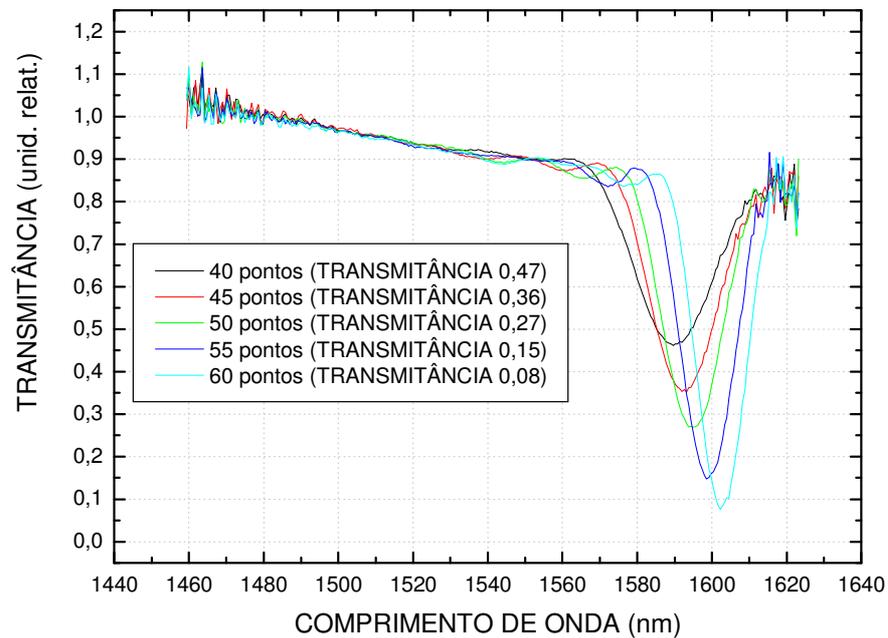
Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG17 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG18 (fibra “*Centaurus*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG19 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.



Razão espectral entre os sinais transmitidos pela LPG20 (fibra “*Nufern*”), durante a gravação, e o sinal emitido pela fonte ótica LED.

ANEXO 2

OS PARÂMETROS DAS LPGs

Neste anexo estão apresentados os levantamentos do comprimento de onda central (λ_C), da largura de banda a meia altura ($\Delta\lambda_{fwhm}$) e da transmitância (T) dos vales de atenuação das redes gravadas.

Levantamento de parâmetros da LPG1, gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $278,65 \pm 30,65 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,00
5						1,00
10				$1606,09 \pm 0,62$	$86,88 \pm 1,06$	0,939
15				$1601,23 \pm 20,45$	$67,83 \pm 1,15$	0,832
20	¹			$1600,04 \pm 0,13$	$50,87 \pm 0,29$	0,689
25	$1438,36 \pm 0,77$	$57,99 \pm 2,08$	0,950	$1599,54 \pm 0,09$	$42,13 \pm 0,20$	0,539
30	$1437,88 \pm 0,71$	$50,45 \pm 1,77$	0,920	$1599,24 \pm 0,07$	$35,76 \pm 0,14$	0,391
35	$1445,70 \pm 0,21$	$24,47 \pm 0,45$	0,880	$1602,31 \pm 0,09$	$31,16 \pm 0,18$	0,230
40	$1444,60 \pm 0,19$	$23,02 \pm 0,40$	0,850	$1601,13 \pm 0,09$	$29,34 \pm 0,18$	0,150
45	$1446,79 \pm 0,10$	$20,28 \pm 0,56$	0,800	$1602,65 \pm 0,08$	$25,82 \pm 0,17$	0,042

¹ As células da tabela que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG2 gravada na fibra “Centaurus”
com fluência de $243,71 \pm 26,81 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5				$1639,78 \pm 2,02$	$197,10 \pm 3,89$	0,980
10	¹			$1652,89 \pm 0,49$	$125,20 \pm 1,00$	0,930
15	$1443,48 \pm 0,48$	$88,14 \pm 1,10$	0,930	$1658,49 \pm 0,42$	$94,50 \pm 0,42$	0,800
20	$1444,81 \pm 0,29$	$52,10 \pm 0,64$	0,890	$1667,70 \pm 0,08$	$74,36 \pm 0,13$	0,670
25	$1448,94 \pm 0,18$	$50,32 \pm 0,38$	0,860	$1672,67 \pm 0,07$	$65,02 \pm 0,16$	0,516
30	$1450,40 \pm 0,12$	$36,61 \pm 0,25$	0,790	$1676,32 \pm 0,05$	$53,98 \pm 0,11$	0,355
35	$1451,29 \pm 0,15$	$37,23 \pm 0,15$	0,740	$1678,29 \pm 0,04$	$48,16 \pm 0,11$	0,270
40	$1451,81 \pm 0,05$	$31,58 \pm 0,24$	0,690	$1679,16 \pm 0,03$	$43,70 \pm 0,09$	0,199
45	$1454,13 \pm 0,06$	$31,45 \pm 0,13$	0,660	$1681,90 \pm 0,04$	$41,44 \pm 0,10$	0,149

Levantamento de parâmetros da LPG3 gravada na fibra “Centaurus”
com fluência de $209,82 \pm 23,08 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						1,000
10				$1603,54 \pm 0,28$	$86,50 \pm 0,64$	0,836
15				$1611,80 \pm 0,19$	$64,24 \pm 0,43$	0,720
20	$1452,38 \pm 0,57$	$43,27 \pm 1,10$	0,93	$1613,43 \pm 0,09$	$48,91 \pm 0,19$	0,589
25	$1456,58 \pm 0,14$	$28,32 \pm 0,32$	0,89	$1619,64 \pm 0,06$	$37,75 \pm 0,13$	0,424
30	$1461,84 \pm 0,08$	$28,53 \pm 0,17$	0,85	$1625,87 \pm 0,04$	$33,39 \pm 0,10$	0,287
35	$1465,96 \pm 0,09$	$23,92 \pm 0,18$	0,81	$1630,16 \pm 0,05$	$29,54 \pm 0,12$	0,170
40	$1468,64 \pm 0,05$	$19,02 \pm 0,10$	0,76	$1633,12 \pm 0,05$	$25,77 \pm 0,11$	0,163
45	$1471,52 \pm 0,04$	$18,18 \pm 0,07$	0,70	$1636,11 \pm 0,05$	$23,92 \pm 0,11$	0,185

¹ As células da tabela que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG4 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $185,68 \pm 20,42 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,970
10				$1600,58 \pm 0,38$	$83,50 \pm 0,81$	0,910
15				$1599,23 \pm 0,71$	$60,83 \pm 4,38$	0,813
20				$1597,71 \pm 0,05$	$58,13 \pm 0,14$	0,647
25				$1596,82 \pm 0,06$	$45,64 \pm 0,14$	0,469
30				$1595,26 \pm 0,07$	$38,75 \pm 0,17$	0,350
35				$1594,05 \pm 0,03$	$32,00 \pm 0,07$	0,261
40	¹			$1592,84 \pm 0,03$	$28,89 \pm 0,09$	0,177
45	$1442,24 \pm 0,41$	$16,41 \pm 0,76$		$1593,36 \pm 0,02$	$24,97 \pm 0,06$	0,088

Levantamento de parâmetros da LPG5 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $137,40 \pm 15,11 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1
5						0,980
10				$1592,60 \pm 0,26$	$84,09 \pm 0,58$	0,920
15	$1454,29 \pm 0,55$	$54,96 \pm 1,00$	0,960	$1596,33 \pm 0,13$	$64,21 \pm 0,30$	0,821
20	$1451,91 \pm 0,27$	$31,08 \pm 0,53$	0,930	$1598,91 \pm 0,08$	$48,00 \pm 0,18$	0,697
25	$1453,09 \pm 0,11$	$34,07 \pm 0,23$	0,900	$1602,26 \pm 0,06$	$36,80 \pm 0,12$	0,530
30	$1456,29 \pm 0,07$	$26,07 \pm 0,17$	0,860	$1605,60 \pm 0,06$	$33,04 \pm 0,13$	0,379
35	$1458,63 \pm 0,03$	$22,57 \pm 0,13$	0,810	$1608,35 \pm 0,05$	$28,50 \pm 0,11$	0,236
40	$1463,80 \pm 0,02$	$22,10 \pm 0,13$	0,740	$1614,33 \pm 0,05$	$24,89 \pm 0,11$	0,116
45	$1465,10 \pm 0,05$	$16,95 \pm 0,10$	0,698	$1616,31 \pm 0,04$	$23,15 \pm 0,08$	0,060

¹ As células das tabelas que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG6 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $233,95 \pm 25,73 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						1,000
10				$1591,54 \pm 0,73$	$88,31 \pm 1,15$	0,933
15				$1586,15 \pm 0,33$	$59,89 \pm 0,33$	0,871
20				$1585,33 \pm 0,09$	$44,56 \pm 0,20$	0,772
25				$1585,16 \pm 0,05$	$36,41 \pm 0,11$	0,652
30				$1602,87 \pm 0,06$	$32,02 \pm 0,12$	0,436
35				$1605,84 \pm 0,05$	$28,15 \pm 0,11$	0,294
40	¹			$1605,65 \pm 0,05$	$24,61 \pm 0,09$	0,190
45	$1446,56 \pm 0,99$	$19,40 \pm 3,95$	0,820	$1608,71 \pm 0,04$	$21,89 \pm 0,09$	0,077

Levantamento de parâmetros da LPG7 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $274,80 \pm 30,23 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,970
10				$1594,08 \pm 0,23$	$96,48 \pm 0,48$	0,874
15				$1598,55 \pm 0,12$	$67,52 \pm 0,27$	0,702
20				$1604,31 \pm 0,31$	$50,66 \pm 0,80$	0,497
25	$1441,87 \pm 0,71$	$35,10 \pm 1,33$		$1606,71 \pm 0,06$	$40,55 \pm 0,13$	0,297
30	$1443,67 \pm 1,24$	$25,83 \pm 4,42$		$1609,67 \pm 0,04$	$33,95 \pm 0,09$	0,136
35	$1446,12 \pm 0,12$	$30,86 \pm 0,35$		$1611,61 \pm 0,04$	$29,39 \pm 0,07$	0,038
40	$1447,07 \pm 0,20$	$25,28 \pm 0,50$		$1613,12 \pm 0,03$	$25,90 \pm 0,07$	0,012
45	$1448,51 \pm 0,19$	$18,26 \pm 0,55$		$1615,07 \pm 0,02$	$22,75 \pm 0,05$	0,073

¹ As células das tabelas que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG8 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $252,49 \pm 27,77 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,00
5				$1601,88 \pm 4,30$	$110,98 \pm 8,10$	0,99
10	¹			$1603,56 \pm 0,37$	$86,18 \pm 0,73$	0,93
15	$1410,63 \pm 18,69$	$86,40 \pm 15,21$		$1605,20 \pm 0,16$	$61,78 \pm 0,36$	0,85
20	$1448,84 \pm 0,63$	$33,69 \pm 1,14$	0,970	$1608,69 \pm 0,09$	$47,13 \pm 0,20$	0,74
25	$1449,56 \pm 0,46$	$28,22 \pm 0,93$	0,940	$1611,92 \pm 0,07$	$38,44 \pm 0,15$	0,62
30	$1452,64 \pm 0,20$	$28,20 \pm 0,44$	0,930	$1614,48 \pm 0,05$	$33,54 \pm 0,11$	0,51
35	$1454,69 \pm 0,11$	$22,15 \pm 0,25$	0,900	$1616,08 \pm 0,05$	$29,45 \pm 0,11$	0,40
40	$1456,21 \pm 0,09$	$18,43 \pm 0,19$	0,890	$1617,33 \pm 0,05$	$26,64 \pm 0,10$	0,32
45	$1458,27 \pm 0,06$	$20,36 \pm 0,14$	0,859	$1618,83 \pm 0,04$	$23,71 \pm 0,08$	0,22

Levantamento de parâmetros da LPG9 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $234,42 \pm 25,79 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,960
10				$1595,29 \pm 0,21$	$87,43 \pm 0,46$	0,858
15				$1600,66 \pm 0,11$	$66,99 \pm 0,25$	0,720
20	$1448,81 \pm 0,38$	$38,47 \pm 0,66$	0,920	$1606,23 \pm 0,12$	$50,21 \pm 0,25$	0,546
25	$1450,93 \pm 0,18$	$29,24 \pm 0,35$	0,880	$1612,60 \pm 0,04$	$40,97 \pm 0,08$	0,388
30	$1456,29 \pm 0,07$	$30,96 \pm 0,15$	0,830	$1618,30 \pm 0,03$	$35,75 \pm 0,06$	0,232
35	$1460,51 \pm 0,07$	$26,25 \pm 0,40$	0,780	$1622,67 \pm 0,02$	$31,25 \pm 0,05$	0,121
40	$1464,83 \pm 0,04$	$20,49 \pm 0,18$	0,720	$1626,77 \pm 0,03$	$29,19 \pm 0,07$	0,067
45	$1469,21 \pm 0,03$	$19,42 \pm 0,06$	0,661	$1630,70 \pm 0,04$	$26,95 \pm 0,09$	0,062

¹ As células das tabelas que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG10 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $207,03 \pm 22,77 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,970
10				$1572,34 \pm 0,26$	$88,38 \pm 0,58$	0,914
15	¹			$1573,45 \pm 0,15$	$69,39 \pm 0,32$	0,809
20	$1414,28 \pm 2,11$	$47,63 \pm 12,20$	0,960	$1579,44 \pm 0,07$	$45,87 \pm 0,15$	0,608
25	$1418,44 \pm 0,51$	$36,41 \pm 3,81$	0,920	$1583,24 \pm 0,07$	$37,60 \pm 0,14$	0,438
30	$1422,18 \pm 0,31$	$28,44 \pm 1,82$	0,880	$1586,39 \pm 0,06$	$31,64 \pm 0,12$	0,277
35	$1426,33 \pm 0,23$	$26,50 \pm 1,58$	0,850	$1589,57 \pm 0,05$	$27,78 \pm 0,10$	0,135
40	Espectro não gravado	Espectro não gravado	Espectro não gravado	Espectro não gravado	Espectro não gravado	Espectro não gravado
45	$1432,45 \pm 0,09$	$16,09 \pm 0,19$	0,765	$1594,03 \pm 0,04$	$20,51 \pm 0,08$	0,002

Levantamento de parâmetros da LPG11 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $185,68 \pm 20,42 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,990
10				$1577,12 \pm 0,21$	$90,14 \pm 0,49$	0,901
15				$1578,09 \pm 0,10$	$64,04 \pm 0,23$	0,782
20	$1414,56 \pm 2,57$	$59,09 \pm 15,84$	0,950	$1582,52 \pm 0,09$	$47,64 \pm 0,19$	0,597
25	$1422,16 \pm 0,98$	$46,79 \pm 9,42$	0,940	$1587,40 \pm 0,07$	$37,55 \pm 0,14$	0,381
30	$1430,03 \pm 0,66$	$36,25 \pm 8,14$	0,920	$1592,54 \pm 0,05$	$32,53 \pm 0,11$	0,237
35	$1435,35 \pm 0,21$	$22,23 \pm 0,47$	0,870	$1596,22 \pm 0,04$	$27,83 \pm 0,08$	0,100

¹ As células das tabelas que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG12 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $207,96 \pm 22,88 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
5						0,953
10				$1604,67 \pm 0,42$	$94,47 \pm 0,82$	0,850
15				$1601,23 \pm 0,13$	$67,00 \pm 0,29$	0,748
20	¹			$1601,51 \pm 0,08$	$48,92 \pm 0,17$	0,615
25	$1438,27 \pm 0,66$	$69,14 \pm 29,14$	0,910	$1606,57 \pm 0,06$	$36,36 \pm 0,12$	0,383
30	$1441,80 \pm 0,39$	$47,28 \pm 15,72$	0,890	$1609,54 \pm 0,05$	$31,38 \pm 0,11$	0,249
35	$1446,10 \pm 0,18$	$31,34 \pm 2,64$	0,860	$1613,40 \pm 0,04$	$27,23 \pm 0,09$	0,112
40	$1448,66 \pm 0,15$	$24,85 \pm 2,18$	0,800	$1616,69 \pm 0,04$	$23,59 \pm 0,08$	0,036
45	$1452,10 \pm 0,11$	$16,78 \pm 0,23$	0,757	$1620,13 \pm 0,04$	$20,40 \pm 0,08$	0,028

Levantamento de parâmetros da LPG13 gravada na fibra “*Nufern*”
com fluência de $285,07 \pm 31,36 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1
28				$1557,30 \pm 0,15$	$35,51 \pm 1,47$	0,86
31				$1557,54 \pm 0,12$	$33,91 \pm 0,89$	0,83
36				$1558,70 \pm 0,04$	$23,93 \pm 0,18$	0,77

¹ As células das tabelas que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG14 gravada na fibra “Nufern”
com fluência de $310,15 \pm 34,12 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0	1					1
20				$1545,52 \pm 0,13$	$43,53 \pm 1,33$	
25				$1541,04 \pm 0,08$	$34,35 \pm 0,74$	
30				$1540,02 \pm 0,06$	$29,18 \pm 0,38$	
35				$1539,59 \pm 0,10$	$23,78 \pm 0,34$	
40				$1540,83 \pm 0,06$	$20,06 \pm 0,17$	
45				$1542,76 \pm 0,07$	$17,75 \pm 0,18$	
50				$1546,02 \pm 0,14$	$16,22 \pm 0,22$	
55				$1549,27 \pm 0,08$	$13,40 \pm 0,19$	
58				$1551,61 \pm 0,08$	$13,24 \pm 0,24$	

Levantamento de parâmetros da LPG15 gravada na fibra “Nufern”
com fluência de $301,03 \pm 33,11 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1
5						0,98
10				$1568,93 \pm 0,30$	$57,15 \pm 1,89$	0,96
15				$1571,41 \pm 0,26$	$66,22 \pm 1,55$	0,94
20				$1565,84 \pm 0,07$	$44,29 \pm 0,41$	0,90
25				$1562,58 \pm 0,05$	$33,21 \pm 0,24$	0,86
30				$1562,76 \pm 0,10$	$30,74 \pm 0,56$	0,83
35				$1563,05 \pm 0,05$	$23,66 \pm 0,24$	0,77
40				$1563,87 \pm 0,04$	$20,03 \pm 0,15$	0,70
50				$1568,34 \pm 0,03$	$16,06 \pm 0,10$	0,51
57				$1571,12 \pm 0,02$	$14,82 \pm 0,09$	0,42
60				$1572,70 \pm 0,02$	$14,25 \pm 0,08$	0,36

¹ As células da tabela que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG16 gravada na fibra “Nufern”
com fluência de $307,87 \pm 33,87 \text{ mJ/cm}^2$

N° de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0	1					1
15				$1537,75 \pm 5,52$	$155,81 \pm 55,14$	
20				$1546,03 \pm 1,17$	$99,13 \pm 9,97$	
27				$1553,76 \pm 0,44$	$95,29 \pm 6,26$	
33				$1556,97 \pm 0,23$	$55,37 \pm 2,79$	
38				$1560,20 \pm 0,19$	$33,92 \pm 0,45$	
44				$1565,47 \pm 0,18$	$21,03 \pm 0,39$	
55				$1576,02 \pm 0,12$	$15,49 \pm 0,25$	
60				$1579,98 \pm 0,10$	$14,27 \pm 0,20$	

Levantamento de parâmetros da LPG17 gravada na fibra “Nufern”
com fluência de $319,27 \pm 35,12 \text{ mJ/cm}^2$

N° de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1
10				$1560,52 \pm 0,89$	$82,20 \pm 55,85$	0,97
15				$1565,81 \pm 0,68$	$76,94 \pm 20,35$	0,94
25				$1571,27 \pm 0,15$	$34,58 \pm 0,72$	0,84
30				$1574,57 \pm 0,14$	$29,81 \pm 0,76$	0,77
35				$1576,95 \pm 0,09$	$24,89 \pm 0,41$	0,70
40				$1579,01 \pm 0,07$	$23,32 \pm 0,46$	0,63
45				$1582,55 \pm 0,13$	$22,61 \pm 0,77$	0,58
56						

¹ As células da tabela que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

Levantamento de parâmetros da LPG18 gravada na fibra “*Centaurus*”
com fluência de $376,29 \pm 41,39$ mJ/cm²

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1,000
16	1			$1571,96 \pm 0,27$	$37,77 \pm 0,80$	0,69
22				$1574,08 \pm 0,13$	$27,93 \pm 0,35$	0,61
25				$1574,24 \pm 0,14$	$25,81 \pm 0,56$	0,59
40						

Levantamento de parâmetros da LPG19 gravada na fibra “*Nufern*”
com fluência de $410,50 \pm 45,16$ mJ/cm²

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{fwhm}$ (nm)	T (un.rel.)
0						1
10				$1562,70 \pm 0,50$	$80,24 \pm 8,78$	0,97
15				$1569,88 \pm 0,17$	$71,20 \pm 1,95$	0,93
20				$1575,83 \pm 0,09$	$41,64 \pm 0,44$	0,86
25				$1579,33 \pm 0,08$	$33,45 \pm 0,42$	0,79
30				$1582,78 \pm 0,05$	$30,53 \pm 0,29$	0,71
35				$1585,56 \pm 0,04$	$24,52 \pm 0,19$	0,61
40				$1588,26 \pm 0,05$	$21,29 \pm 0,24$	0,50
45				$1591,36 \pm 0,03$	$18,67 \pm 0,17$	0,39
50				$1596,97 \pm 0,03$	$15,87 \pm 0,13$	0,23
55				$1606,52 \pm 0,08$	$14,18 \pm 0,32$	0,20
60				$1610,53 \pm 0,10$	$13,69 \pm 0,56$	0,15

¹ As células da tabela que estão em branco referem-se a dados que não puderam ser determinados pelo fato de não estarem bem definidos nos espectros.

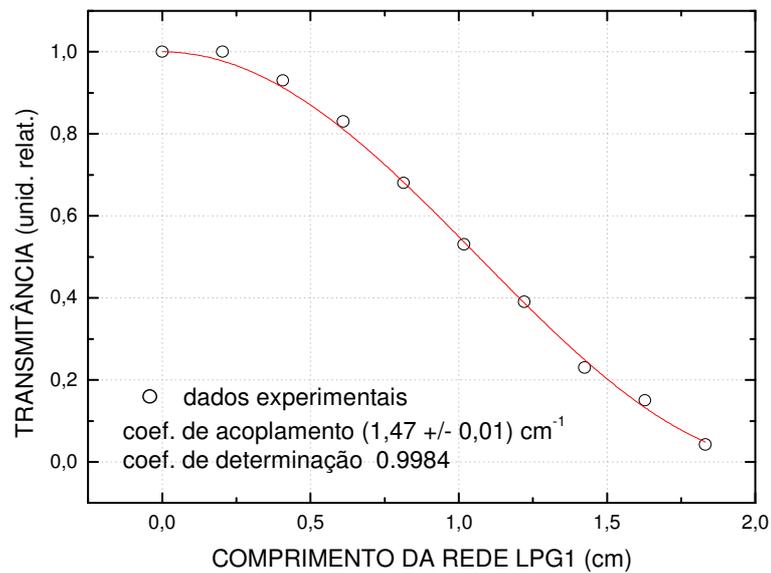
Levantamento de parâmetros da LPG20 gravada na fibra “Nufern”
com fluência de $410,50 \pm 45,16 \text{ mJ/cm}^2$

Nº de pontos	Vale de menor eficiência			Vale de maior eficiência		
	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)	λ_C (nm)	$\Delta\lambda_{\text{fwhm}}$ (nm)	T (un.rel.)
0						
5						
10						
25						
35				¹		
40				$1590,46 \pm 0,06$	$22,54 \pm 0,36$	0,47
45				$1593,00 \pm 0,06$	$19,20 \pm 0,33$	0,36
50				$1595,06 \pm 0,03$	$16,74 \pm 0,15$	0,27
55				$1599,06 \pm 0,03$	$14,82 \pm 0,15$	0,15
60				$1602,58 \pm 0,03$	$13,41 \pm 0,12$	0,08

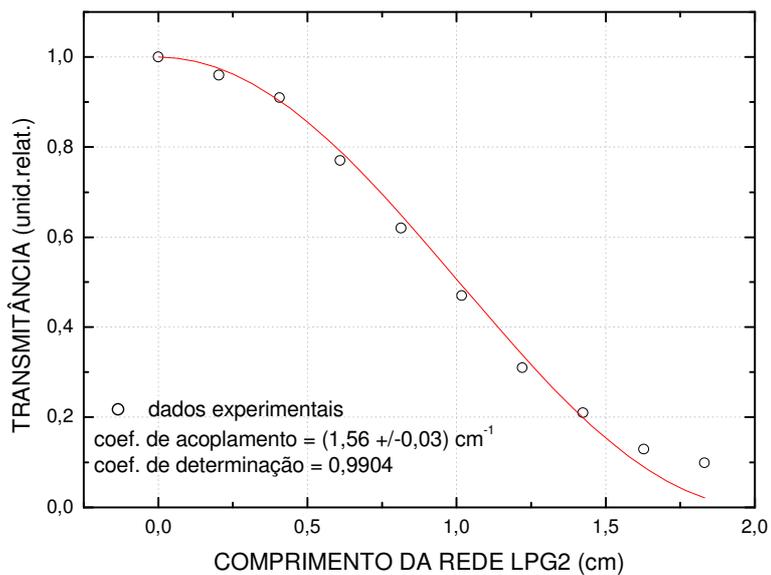
¹ Os espectros da LPG20 só foram salvos a partir dos 40 pontos de inscrição.

ANEXO 3**DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DE ACOPLAMENTO DAS LPGs**

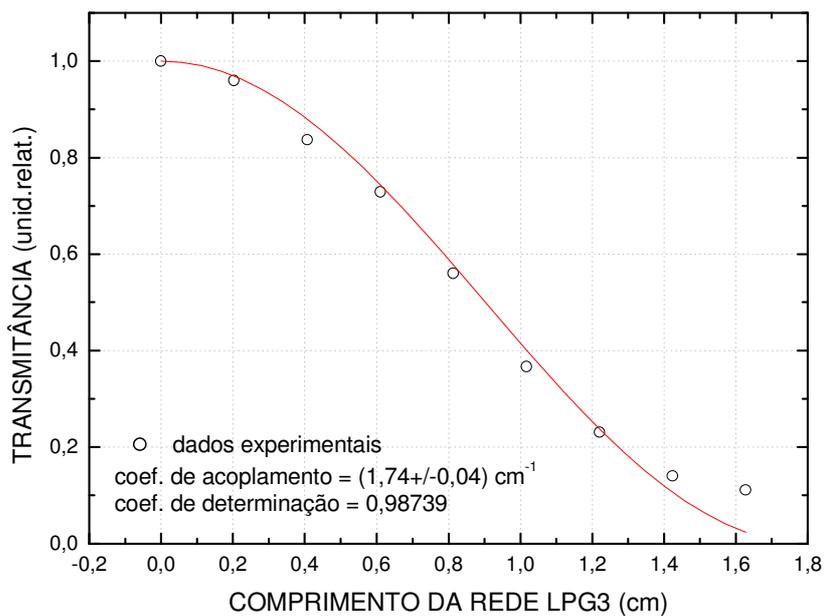
Este anexo apresenta o ajuste da Equação 38, da transmitância dada como uma função cossenoidal em função do comprimento da rede. Em cada gráfico aparece o coeficiente de acoplamento fornecido no ajuste do programa Origin.



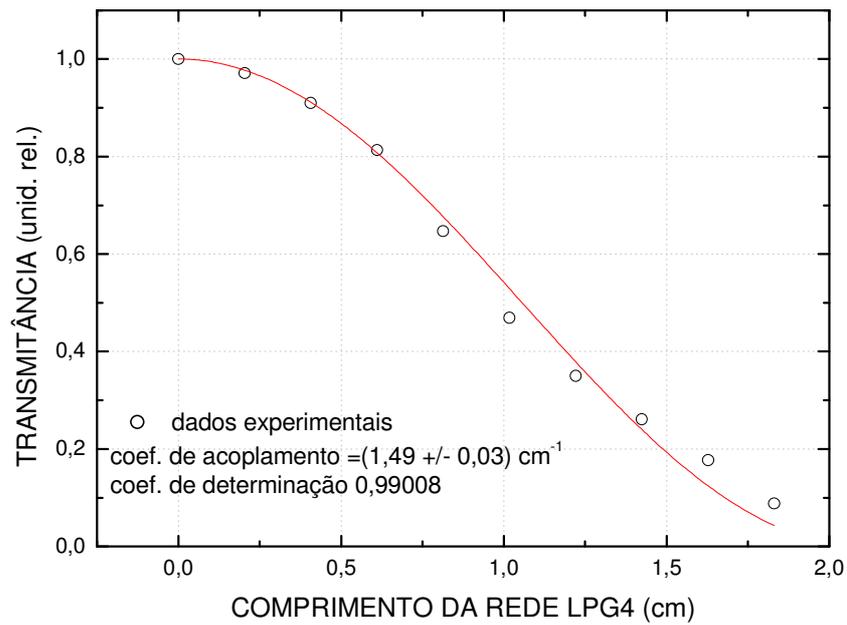
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG1



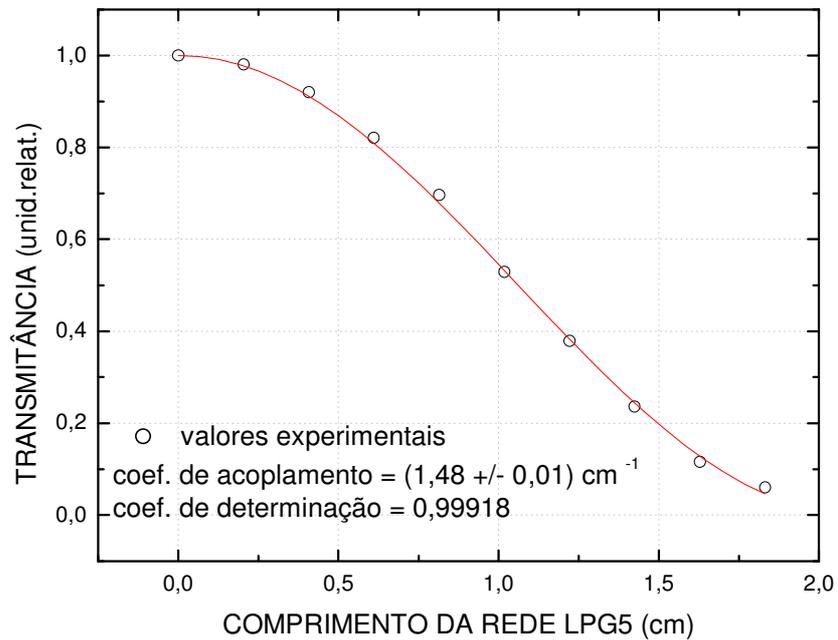
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG2



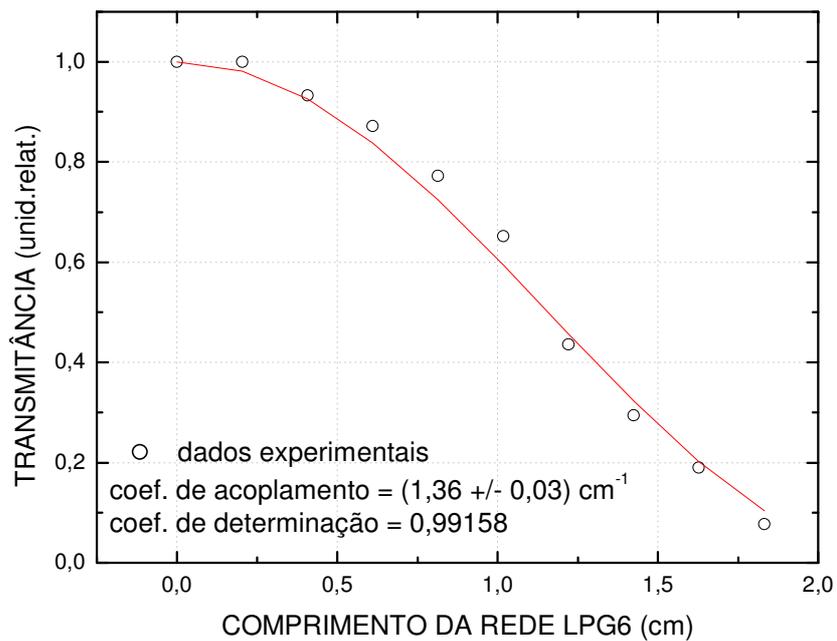
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG3



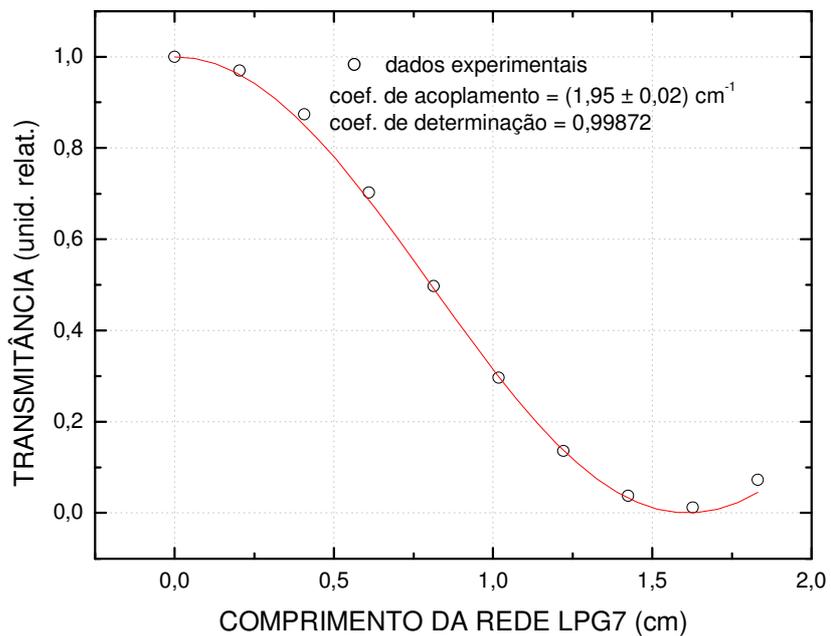
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG4



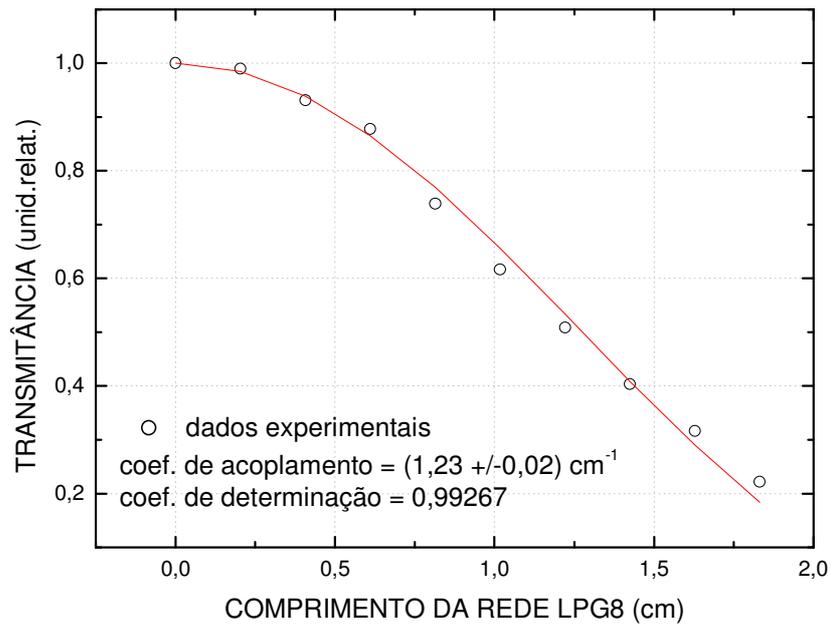
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG5



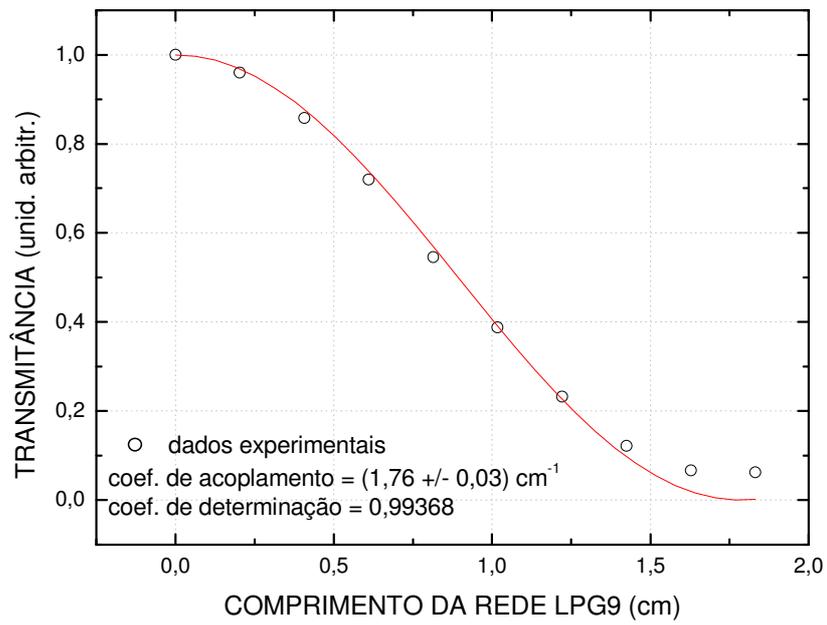
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG6



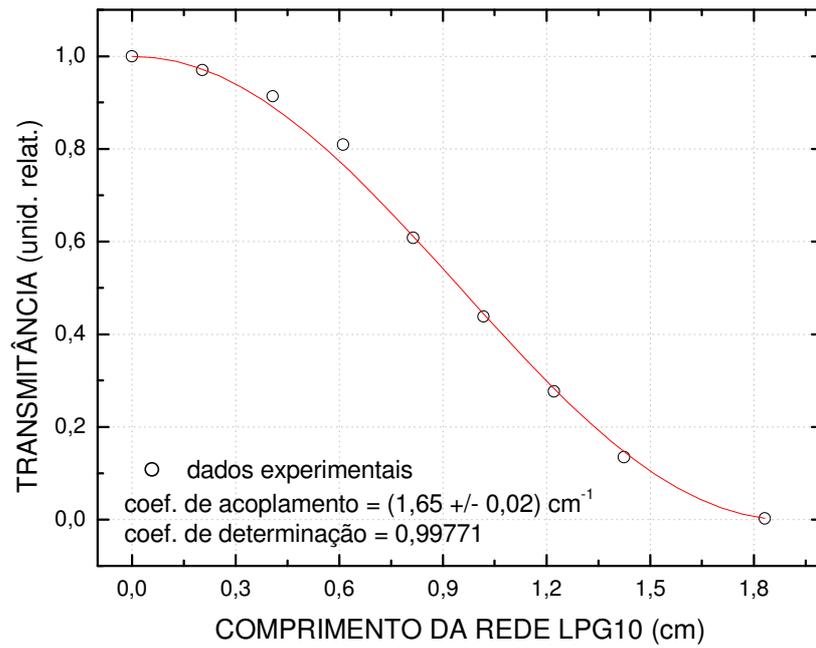
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG7



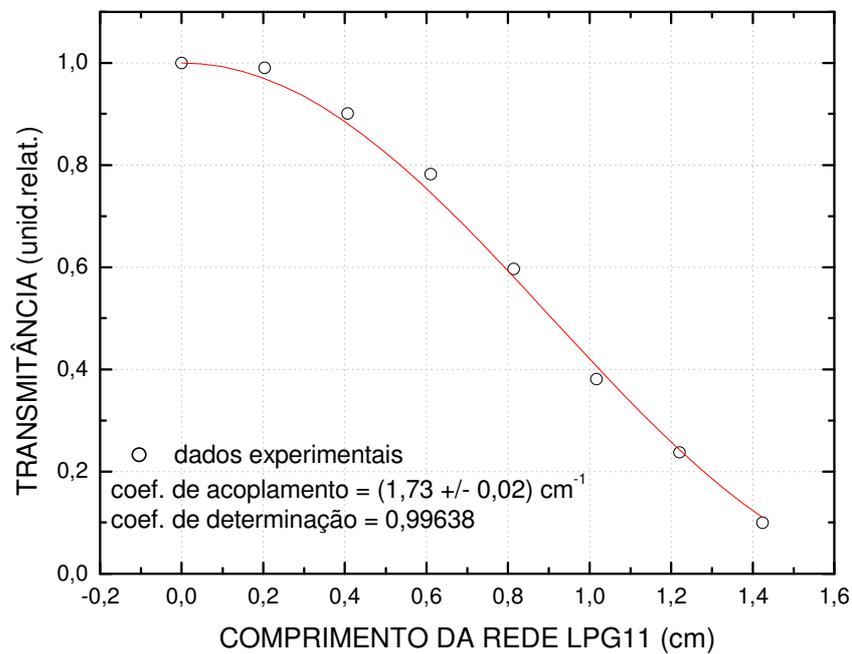
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG8



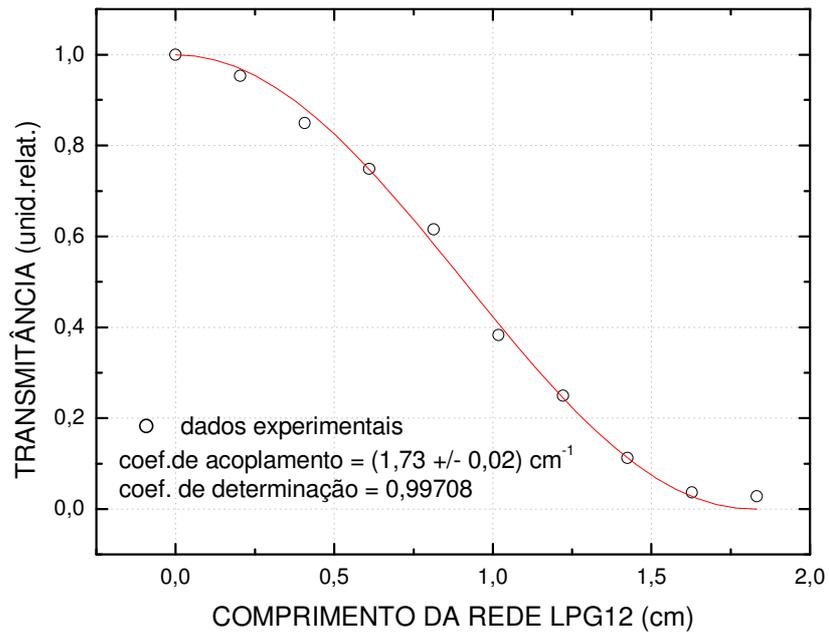
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG9



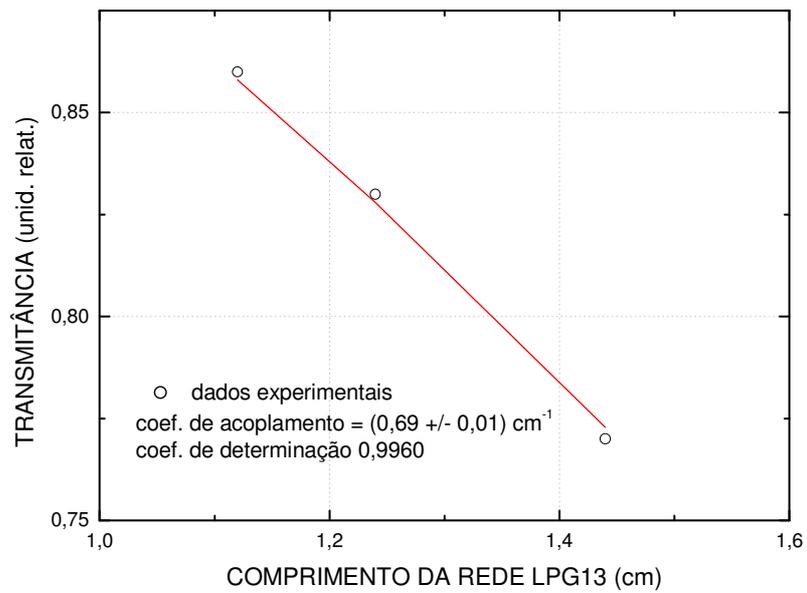
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG10



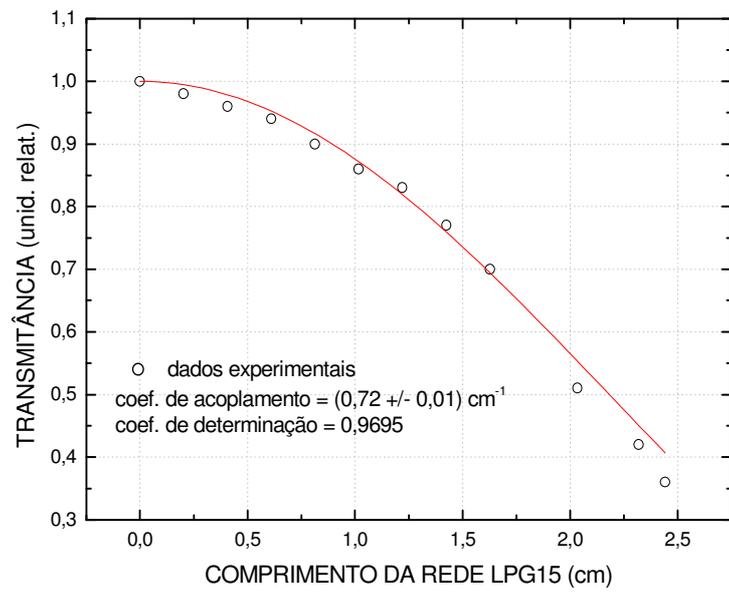
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG11



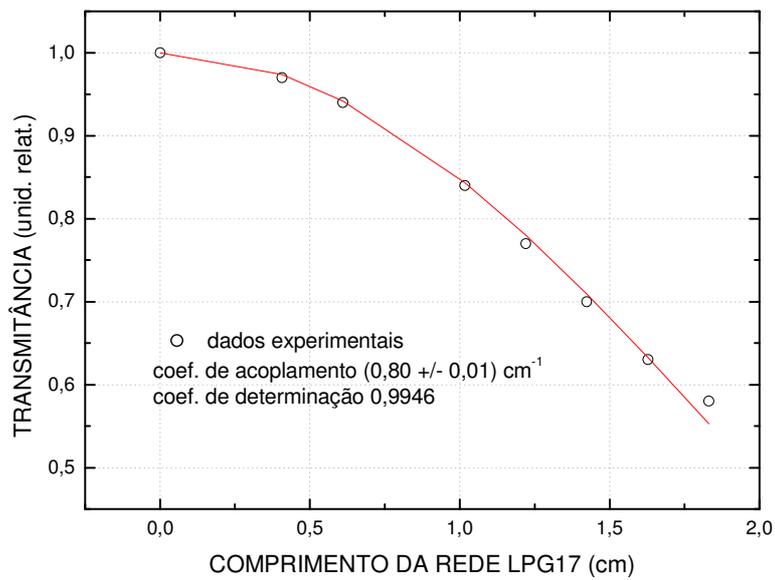
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG12



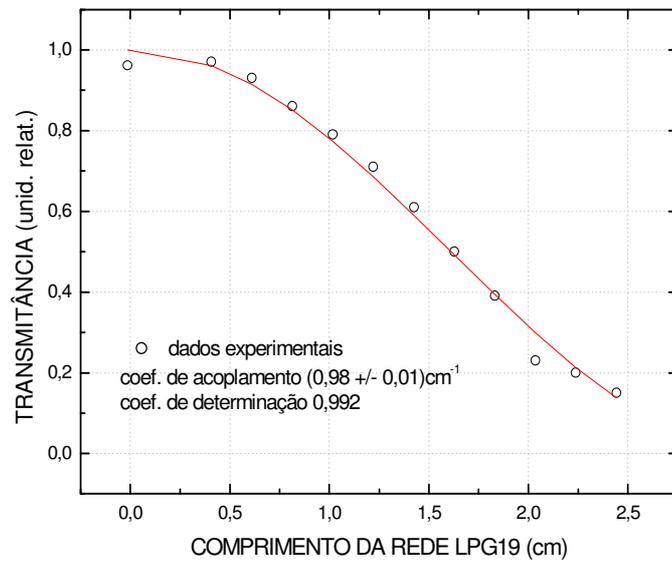
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG13



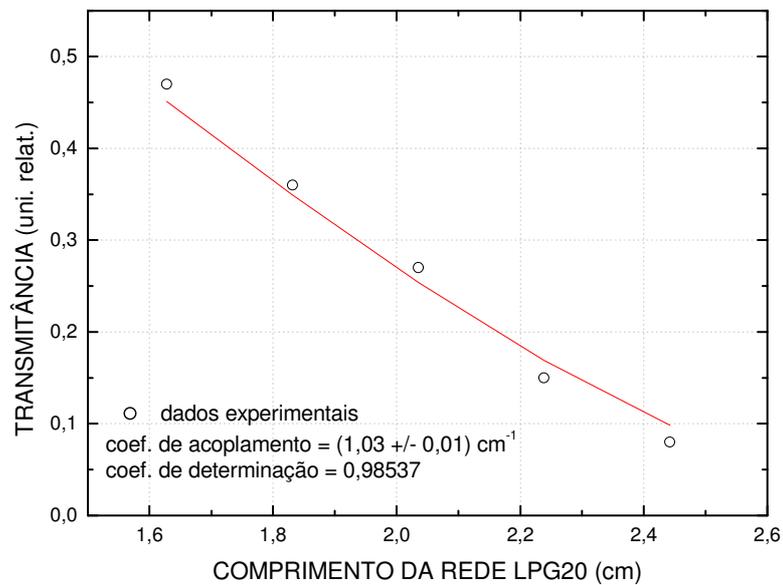
Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG15



Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG17



Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG19

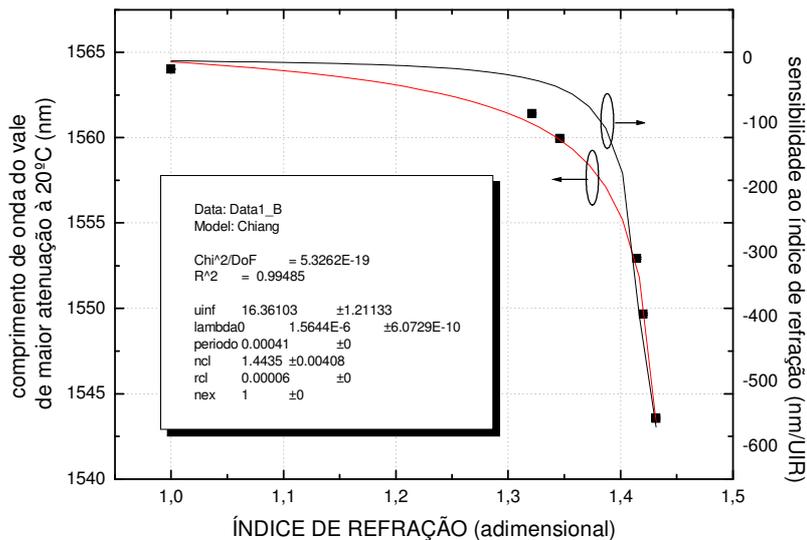


Determinação do coeficiente de acoplamento da LPG20

ANEXO 4

DETERMINAÇÃO DO MODO DE CASCA DE ACOPLAMENTO E DA SENSIBILIDADE AO ÍNDICE DE REFRAÇÃO DO MEIO EXTERNO DAS LPGs

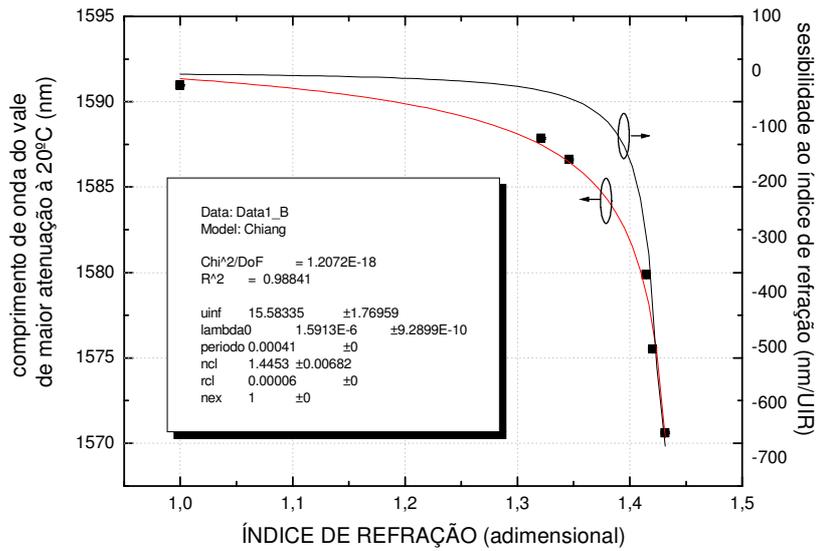
Ajustes feitos através da Equação de Chiang (Equação 47), correspondentes aos eixos da esquerda dos gráficos, na determinação do modo de casca LP_{0n} co-propagante nas LPGs. Os pontos experimentais são as posições espectrais da banda de atenuação das redes quando imersas nos líquidos: ar, água, álcool etanol, tiner, aguarrás e querosene. Os eixos da direita correspondem à derivada da Equação de Chiang (Equação 48), com respeito ao índice de refração do meio externo. Através da curva relativa a essa derivada, que está traçada em linha contínua preta, é determinada a sensibilidade das LPGs ao índice de refração.



Ajuste da Equação de Chiang na LPG1

Sensibilidade da LPG1 ao índice de refração do ar e do querosene.

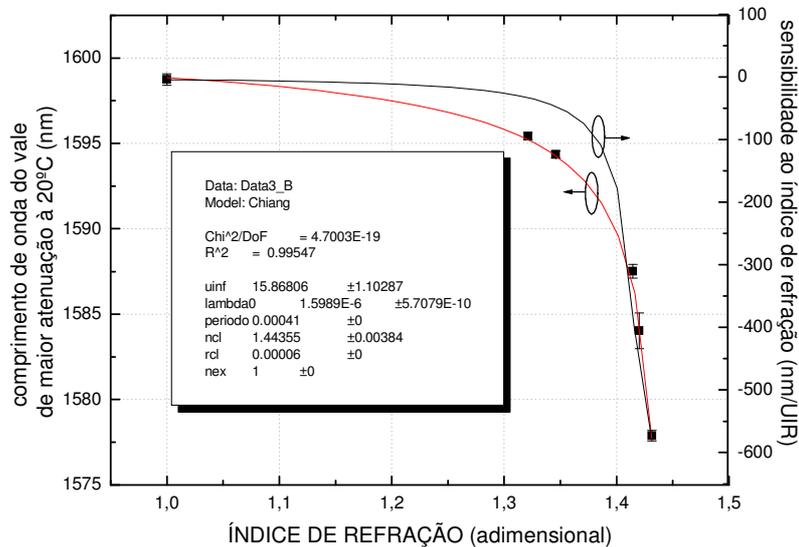
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,35
querosene (n = 1,4315)	- 570,09



Ajuste da Equação de Chiang na LPG2

Sensibilidade da LPG2 ao índice de refração do ar e do querosene.

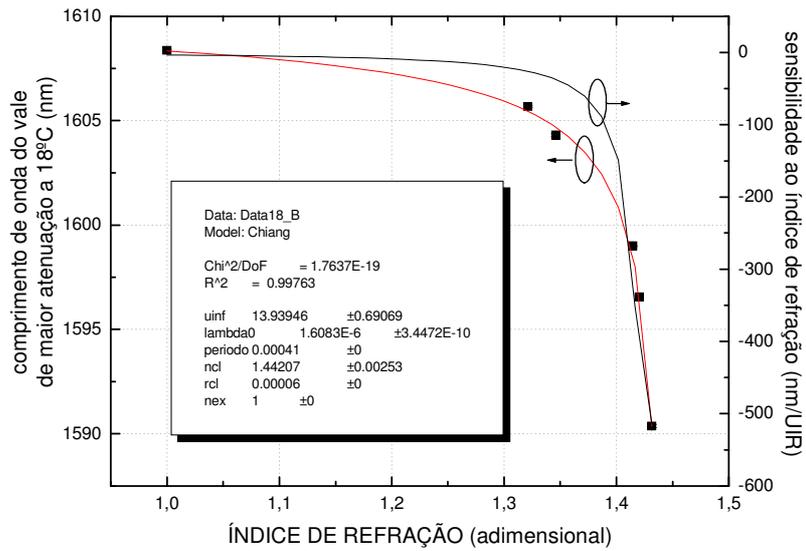
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,62
querosene (n = 1,4315)	- 677,68



Ajuste da Equação de Chiang na LPG3

Sensibilidade da LPG3 ao índice de refração do ar e do querosene.

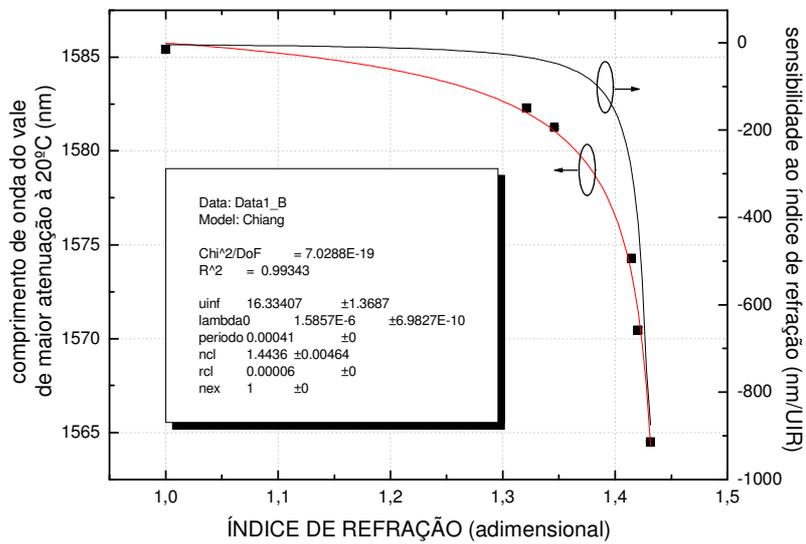
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,37
querosene (n = 1,4315)	- 569,62



Ajuste da Equação de Chiang na LPG4

Sensibilidade da LPG4 ao índice de refração do ar e do querosene.

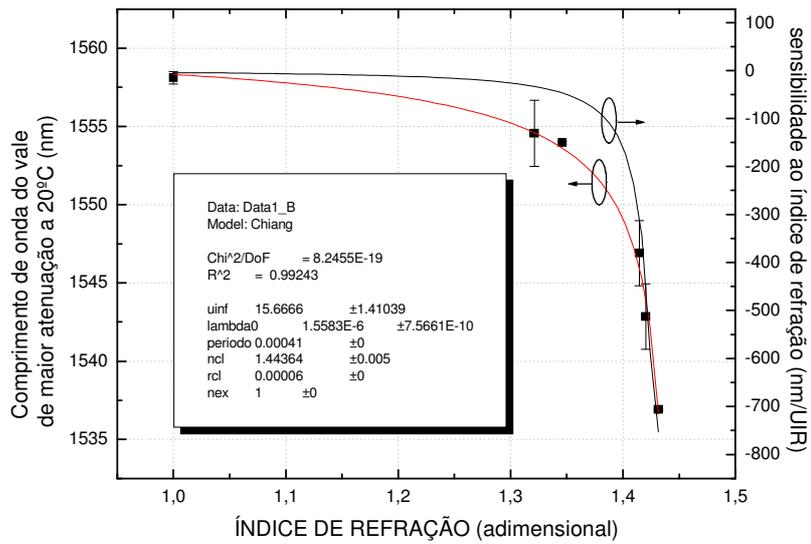
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 3,46
querosene (n = 1,4315)	- 514,24



Ajuste da Equação de Chiang na LPG5

Sensibilidade da LPG5 ao índice de refração do ar e do querosene.

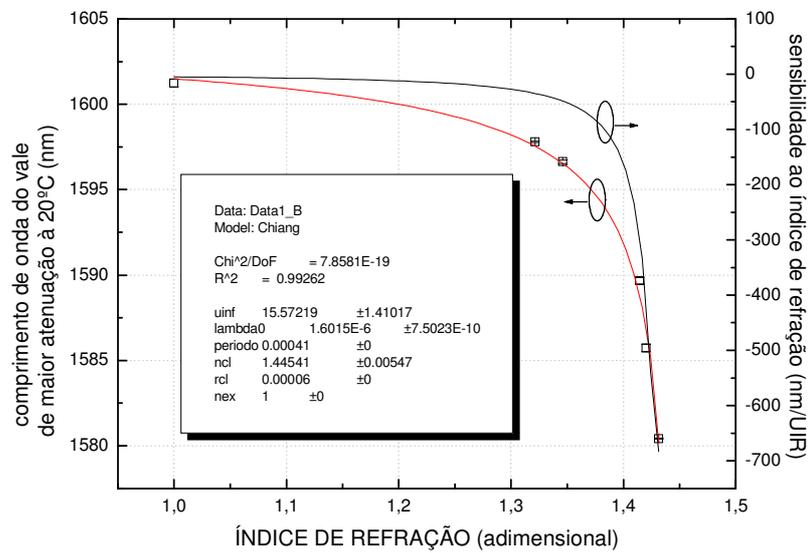
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,37
querosene (n = 1,4315)	- 874,61



Ajuste da Equação de Chiang na LPG6

Sensibilidade da LPG6 ao índice de refração do ar e do querosene.

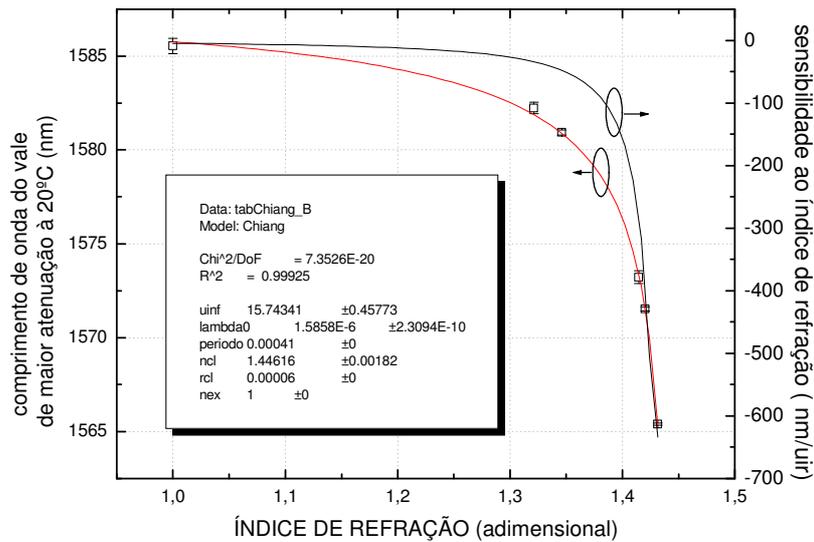
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,42
querosene (n = 1,4315)	- 753,03



Ajuste da Equação de Chiang na LPG8

Sensibilidade da LPG8 ao índice de refração do ar e do querosene.

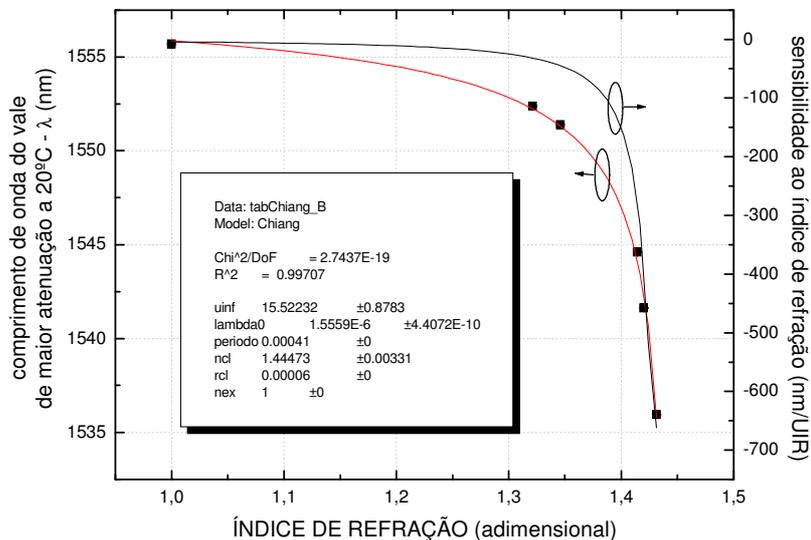
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,70
querosene (n = 1,4315)	- 682,90



Ajuste da Equação de Chiang na LPG9

Sensibilidade da LPG9 ao índice de refração do ar e do querosene.

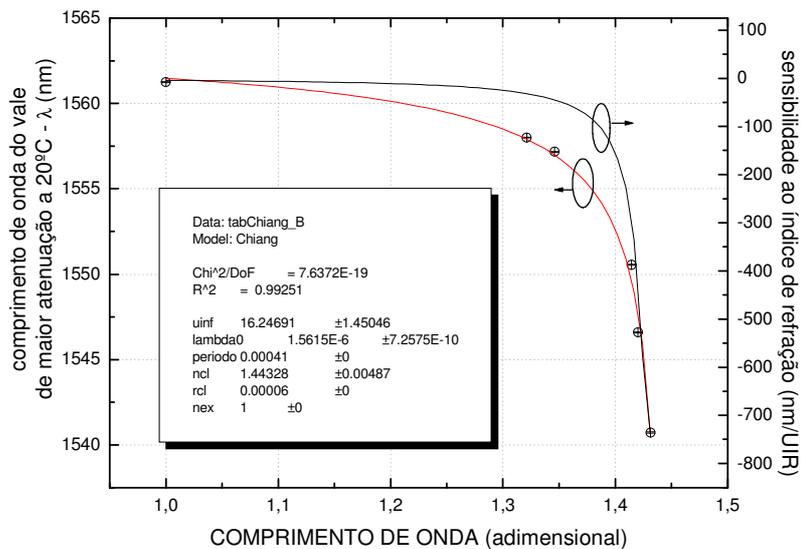
amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,65
querosene (n = 1,4315)	- 633,94



Ajuste da Equação de Chiang na LPG10

Sensibilidade da LPG10 ao índice de refração do ar e do querosene.

amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,30
querosene (n = 1,4315)	- 662,26



Ajuste da Equação de Chiang na LPG11

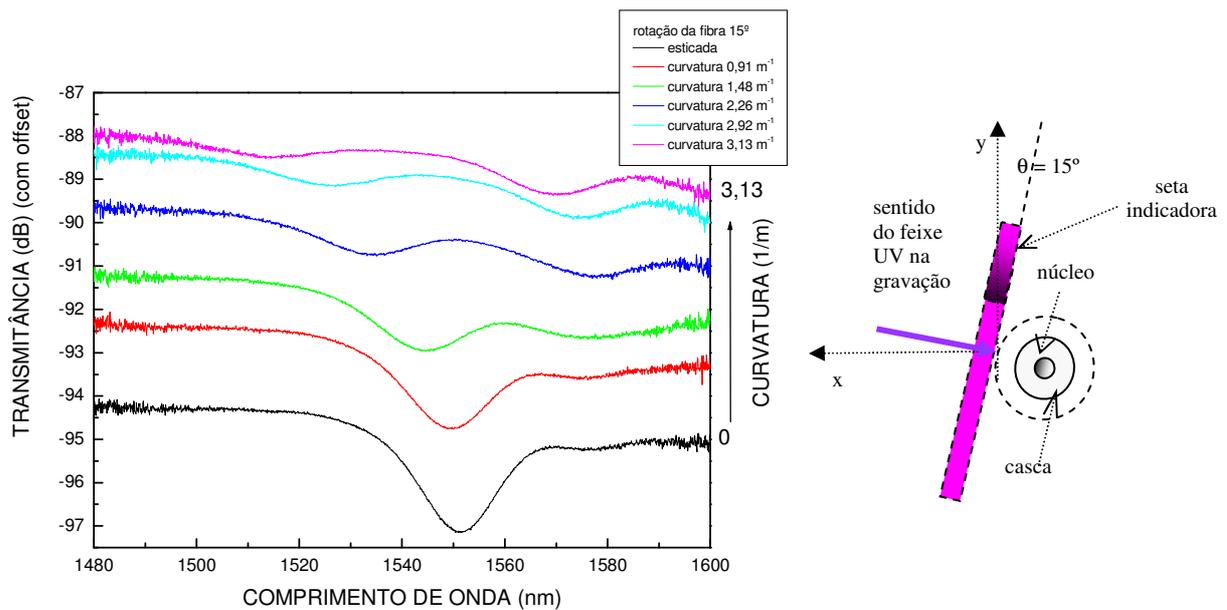
Sensibilidade da LPG11 ao índice de refração do ar e do querosene.

amostras	Sensibilidade ao Índice de Refração - RIS (nm/unidade)
ar (n = 1,0000)	- 4,21
querosene (n = 1,4315)	- 742,26

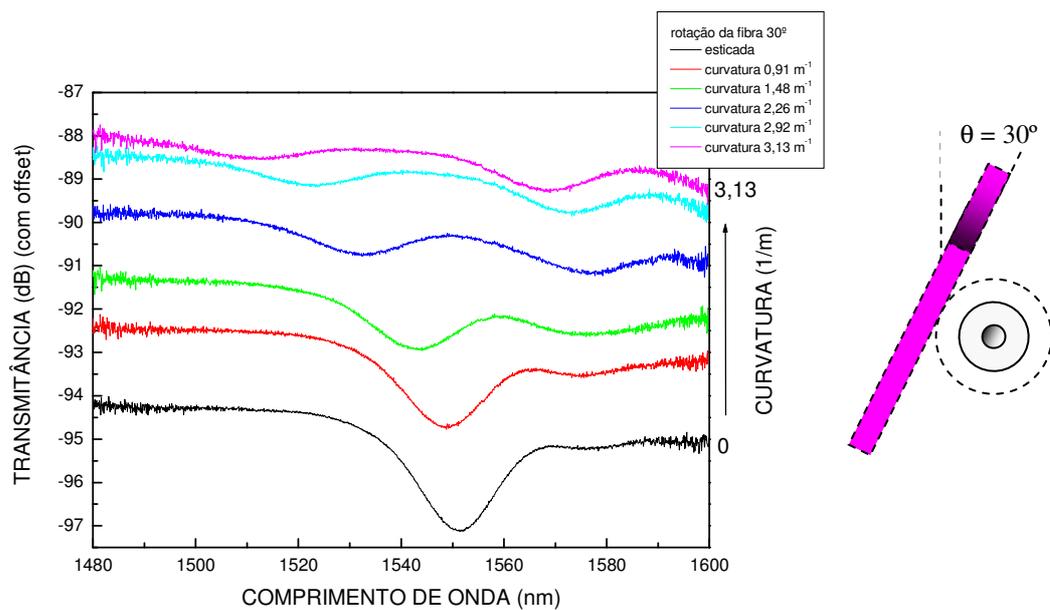
ANEXO 5

RESPOSTA ESPECTRAL DA LPG20 À CURVATURAS EM DIFERENTES DIREÇÕES

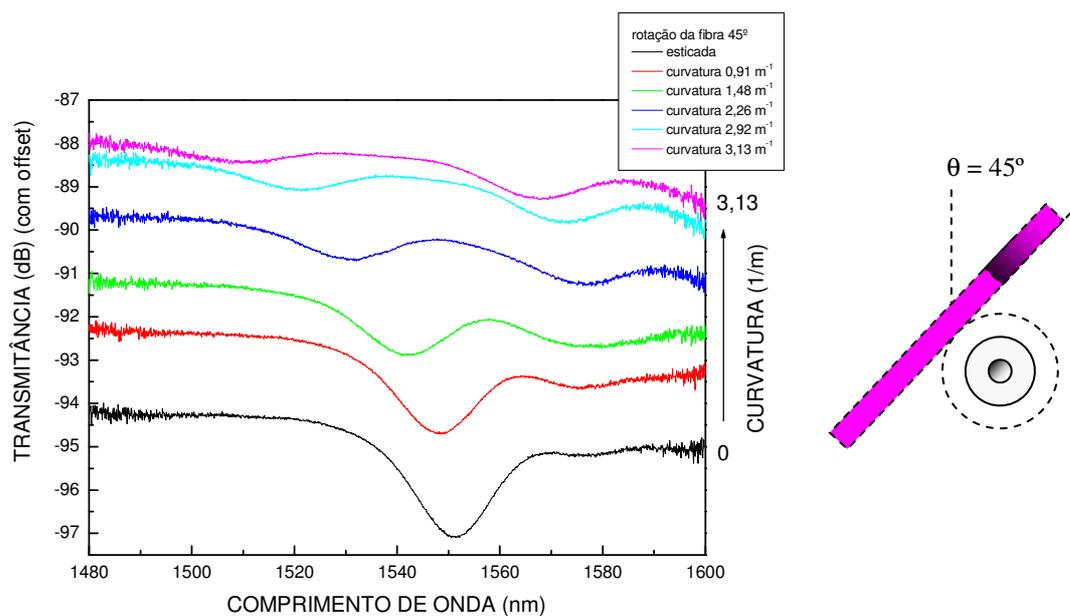
Este anexo apresenta a resposta espectral da LPG20 à curvaturas paralelas ao plano yz , especificado na Figura 34. Ao lado direito de cada gráfico aparece um desenho da secção transversal da fibra rotacionada segundo o ângulo correspondente aos espectros apresentados. Na representação da fibra rotacionada, a parte mais escura do núcleo corresponde ao lado de incidência da luz UV, que é a região de forte absorção durante a gravação.



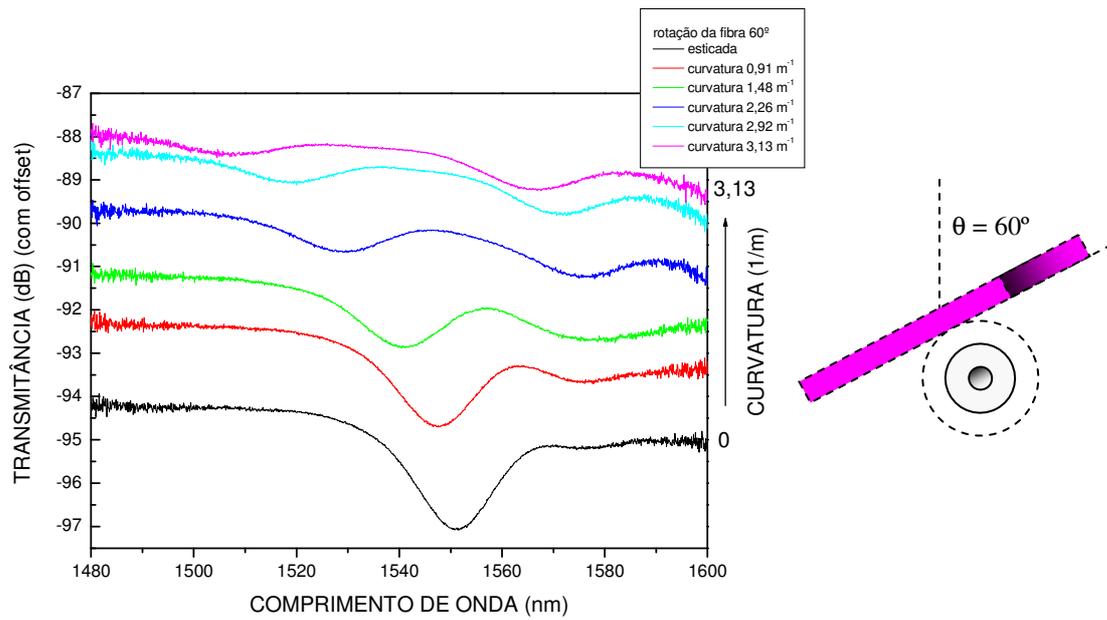
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 15°.



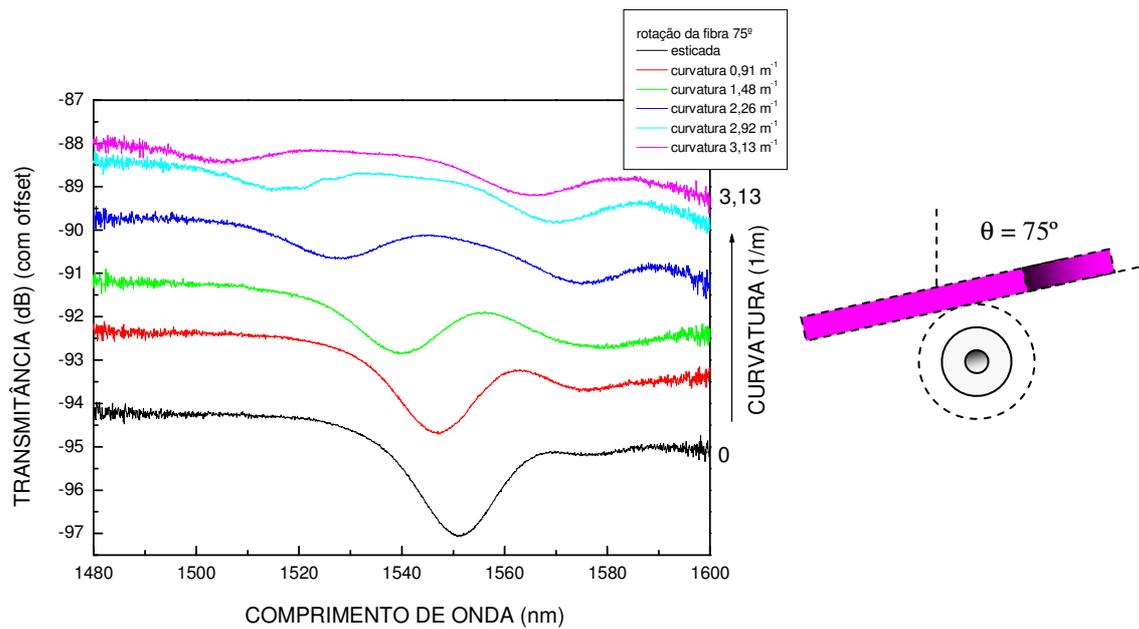
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 30° .



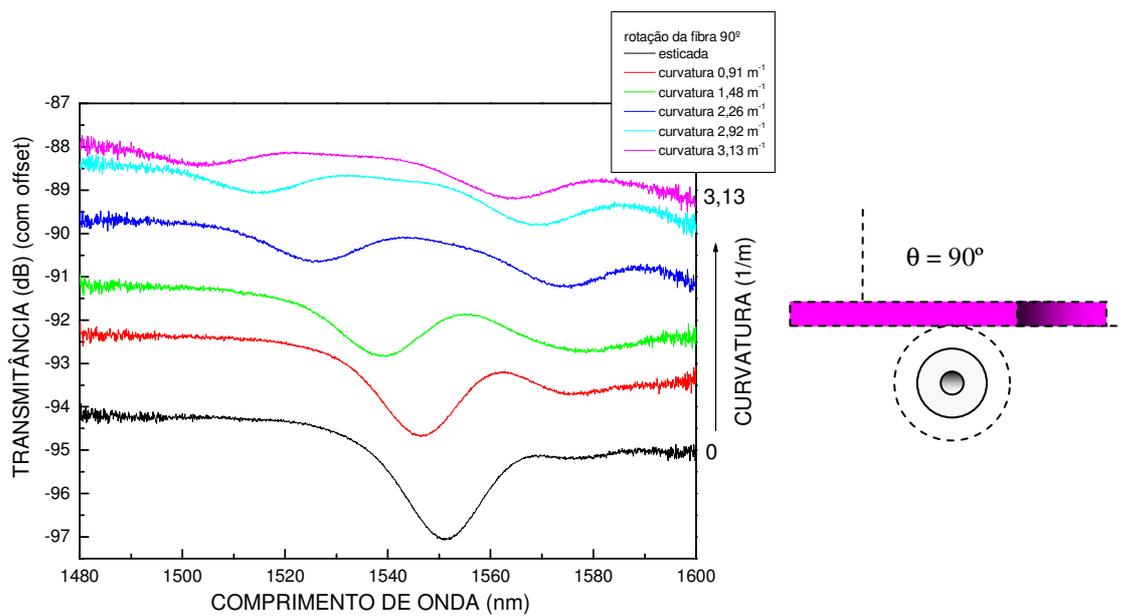
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 45° .



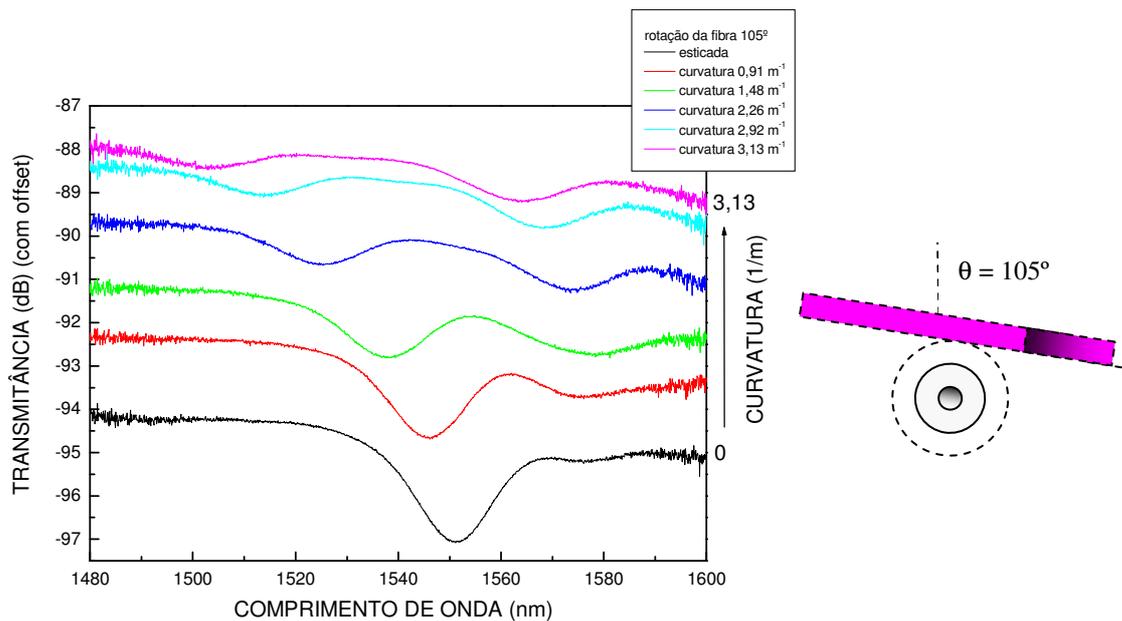
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 60°.



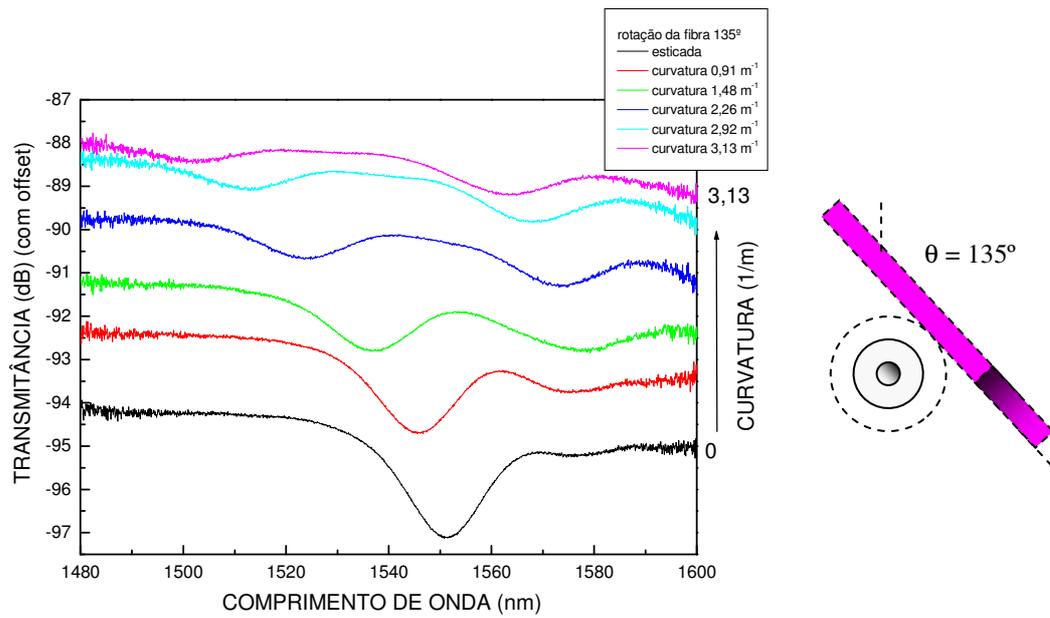
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 75°.



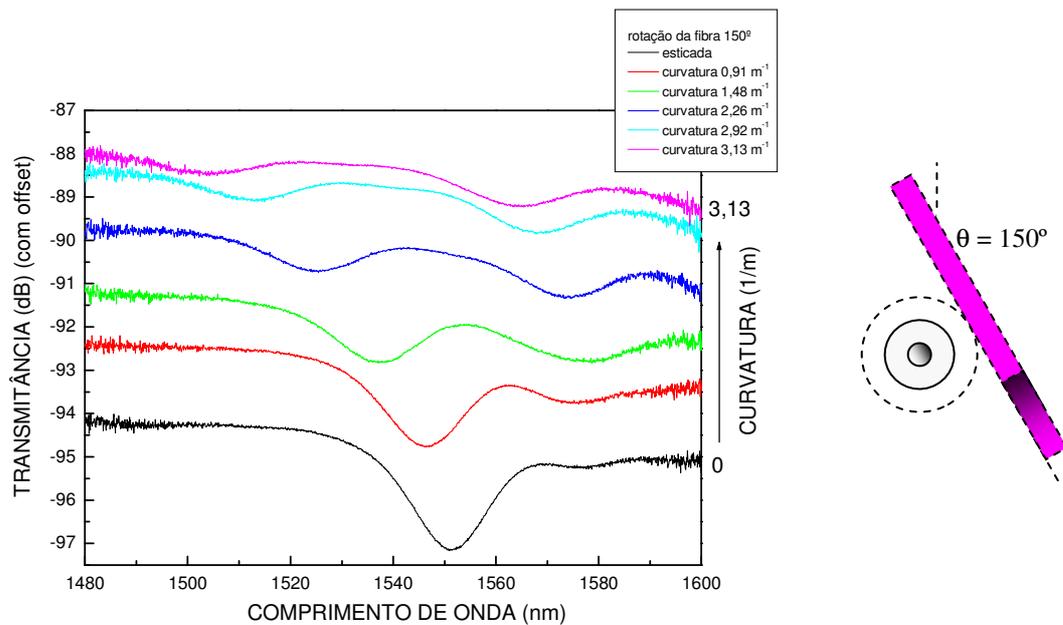
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 90°.



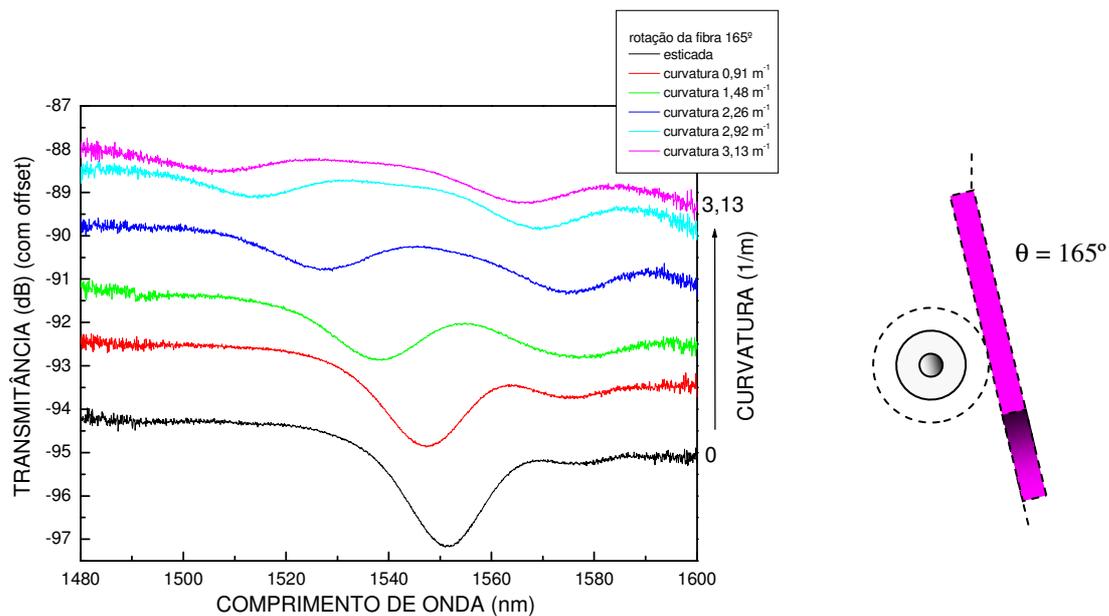
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 105°.



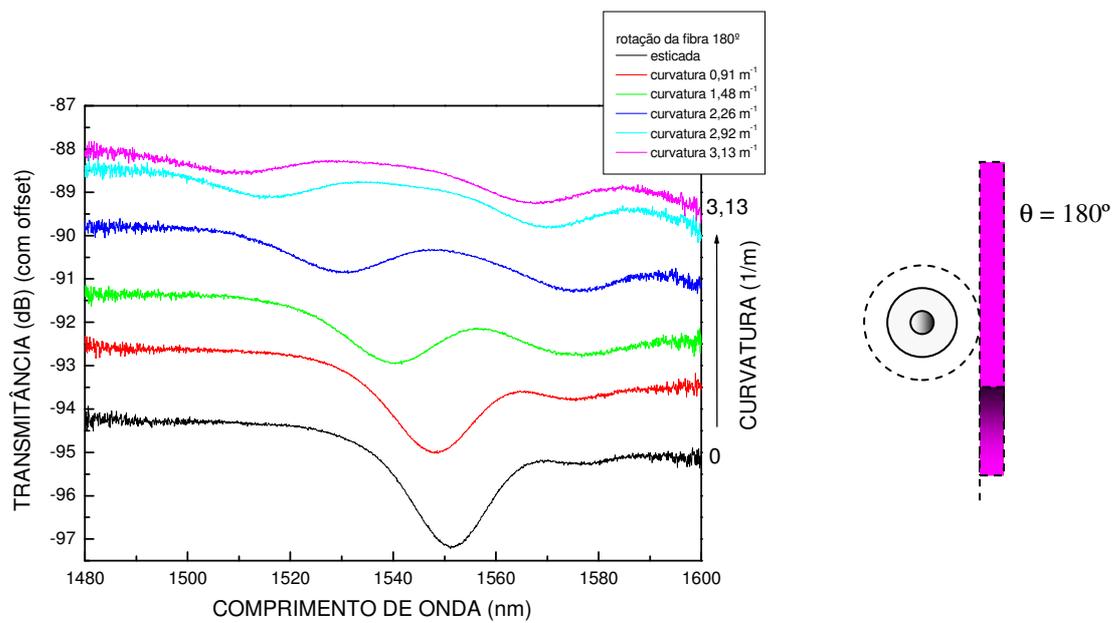
Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 135°.



Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 150°.



Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 165°.



Resposta espectral da LPG20 submetida à curvaturas quando rotacionada de 180°.

PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE

ARTIGO COMPLETO PUBLICADO EM PERIÓDICO

1. COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L. Thermal characteristics of long-period gratings 266 nm UV-point-by-point induced. **Optics Communications**, v. 282, p. 816-823, 2009.

TRABALHOS COMPLETOS EM ANAIS DE EVENTOS

1. COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., POSSETI, G. R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L., Nonlinear Thermal Sensitivity of a Long-Period Grating, **in Proc. of IMOC 2007 – International Microwaves and Optoelectronics Conference 2007**, v. único, p. 693-697, 2007.
2. COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L. Kinetic of Long Period Gratings UV-Induced and Sensing Characteristics. in RIAO/OPTILAS 2007: 6th Ibero-American Conference on Optics (RIAO); 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (OPTILAS), Campinas. **AIP Conference Proceedings**, v. 992, p. 242-247, 2008.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOV, A. A., EGGLETON, B. J., ROGERS, J. A., ESPINDOLA, R. P., HALE, A., WINDELER, R. S. and STRASSER, T. A. Electrically Tunable Efficient Broad-Band Fiber Filter. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 11, n.4, p.445-447, April 1999.
- AGRAWAL, G. P. **Fiber-Optic Communication Systems**. 2nd ed., New York, John Wiley & Sons, 1997.
- AGRAWAL, G. P. **Nonlinear Fiber Optics**, 2nd ed., San Diego, Academic Press, 1995.
- AKIYAMA, M., NISHIDE, K., SHIMA, K., WADA, A. and YAMAUCHI, R. A novel long-period fiber grating using periodically released stress of pure-silica core fiber. Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC' 98, Technical Digest, 1998, p. 276-277 citado em FALATE, 2002.
- AKIYAMA, M., NISHIDE, K., SHIMA, K., WADA, A., YAMAUCHI, R. A novel long period fiber grating using periodically released stress of pure-silica core fiber. **Optical Fiber Communication Conference and Exhibit**, 1998, OFC'98, Technical Digest, p. 276-277, 1998.
- ALBERT, J., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., HILL, K. O., HIBINO, Y. and KAWACHI, M. Photosensitivity in Ge-doped silica optical waveguides and fibers with 193-nm light from an ArF excimer laser. **Optics Letters**, v. 19, n. 6, p. 387-389, 1994.
- ALLSOP, T., DOBB, H., MEZENTSEV, V., EARTHGROWL, T., GILLOOLY, A., WEBB, D. J. and BENNION, I. The spectral sensitivity of long period gratings fabricated in elliptical core D-shaped optical fibre. **Optics Communications**, v. 259, p. 537-544, 2006.
- ALLSOP, T., DUBOV, M., MARTINEZ, A., FLOREANI, F., KHRUSHCHEV, I., WEBB, D. J. and BENNION, I. Long period grating directional bend sensor based on asymmetric modification of cladding. **Electronics Letters**, v. 41, n. 2, 20th January 2005.
- ALLSOP, T., DUBOV, M., MARTINEZ, A., FLOREANI, F., KHRUSHCHEV, I., WEBB, D. J. and BENNION, I. Bending Characteristics of Fiber Long-Period Gratings With Cladding Index Modified by Femtosecond Laser. **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 8, 2006.

- ALLSOP, T., KALLI, K., ZHOU, K., SMITH, G., WEBB, D. J., MEZENTSEV, V. and BENNION, I. The Spectral Characteristics of Femtosecond Laser inscribed Long Period Grating Bend Sensors written into a Photonic Crystal Fibre. in 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, edited by David Sampson, Stephen Collins, Kyunghwan Oh, Ryozo Yamauchi, **Proceedings of SPIE**, v. 7004, p. 70040D-1 – 70040D -4, 2008.
- ANDERSON, D. Z., MIZRAHI, V., ERDOGAN, T. and WHITE, A. E. Production of in-fiber gratings using a diffractive optical element. **Electronics Letters**, v. 29, p. 566-568, 1993.
- ATKINS, R. M., LEMAIRE, P. J., ERDOGAN, T. and MIZRAHI, V. Mechanisms of enhanced UV photosensitivity via hydrogen loading in germanosilicate glasses. **Electronics Letters**, v. 29, n. 14, p. 1234-1235, 1993.
- ATKINS, R. M. and ESPINDOLA, R. P. Photosensitivity and grating writing in hydrogen loaded germanosilicate core optical fibers at 325 and 351 nm. **Applied Physics**, v. 70, n. 9, p.1068, 1997.
- BABINET, J. Note on the transmission of light by sinuous canals. **Comptes Rendus** 15, p.802, Oct. 24, 1842.
- BAEK, S., JEONG, Y. and LEE, B. Characteristics of short-period blazed fiber Bragg gratings for use as macro-bending sensors. **Applied Optics**, v. 41, n. 4, p. 631-636, 2002.
- BENNION, I., WILLIAMS, J. A. R., ZHANG, L., SUGDEN, K. and DORAN, N. J. Tutorial Review, UV-written in fiber Bragg gratings, **Optics Quantum Electronics**, v. 29, p. 93-135, 1996.
- BHATIA, V. Properties and Sensing Applications of Long-Period Gratings, 1996. Dissertation (Electrical Engineering) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, (technical advisor) KENT A. MURPHY.
- BHATIA, V. and VENGSARKAR, A. M. Optical fiber long-period grating sensors. **Optics Letters**, v. 21, n.9, 1 May 1996.
- BHATIA, V. Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing. **Optics Express**, v.4, n.11, p.457-466, 24 May 1999.

- BILODEAU, F., MALO, B., ALBERT, J., JOHNSON, D. C., HILL, K. O., HIBINO, Y., ABE, M. and KAWACHI, M. Photosensitization of optical fiber and silica-on-silicon/silica waveguides. **Optics Letters**, v. 18, p. 953-955, 1993.
- BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., MALO, B., VINEBERG, K. A., HILL, K. O., Ultraviolet light photosensitivity in Er^{3+} -Ge doped optical fiber. **Optics Letters**, v. 15, p. 1138-1147, 1990.
- BLOWS, J. and TANG, D. Y. Gratings written with tripled output of Q-switched Nd: YAG laser. **Electronics Letters**, v.36, n.22,
- BLOWS, J. and TANG, D. Y. Gratings written with tripled output of Q-switched Nd:YAG laser. **Electronics Letters**, v. 36, n. 22, p.1837-1839, 2000.
- BRAMBILLA, G. High-temperature fibre Bragg grating thermometer. **Electronics Letters**, v. 38, p. 954-955, 2002.
- CARSLAW, H. S. and JAEGER, J. C. Conduction of Heat in Solids, **Clarendon Press**, Oxford, 1978, citado por KASHYAP, 1999.
- CARSON, J. R., MEAD, S. P. and SCHELKUNOFF, S. A. Hyper-Frequency Wave Guides – Mathematical Theory. **Bell System Technical Journal**, v. 15, p. 310-333, 1936.
- CAUSADO-BUELVAS, J. D., GOMEZ-CARDONA, N. D., TORRES, P. Magnetomechanically induced long period fiber gratings. in RIAO/OPTILAS 2007: 6th Ibero-American Conference on Optics (RIAO); 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (OPTILAS), Campinas. **AIP Conference Proceedings**, v. 992, p. 260-264, 2008.
- CHAN, C. C., JIN, W., RAD, A. B. and DEMOKAN, M. S. Simultaneous Measurement of Temperature and Strain: An Artificial Neural Network Approach. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 10, n. 6, 1998.
- CHEN, G., LIU, L., JIA, H., YU, J., XU, L. and WANG, W. Simultaneous pressure and temperature measurement using Hi-BI fiber Bragg gratings. **Optics Communications**, v. 228, p. 99-105, 2003.

- CHEN, K. P. and HERMAN, P. R. Fabrication of long-period fiber gratings with 157-nm F₂ laser radiation. In *Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides*, **OSA Tech. Digest**, Stresa, Italy 4-6 July 2001, BThC19.
- CHEN, K. P. and HERMAN, P. R. Strong fiber Bragg grating fabrication by hybrid 157-nm and 248-nm laser exposure, **IEEE Photonics Technol. Lett.**, v.14, p.170-172, 2002.
- CHEN, K.P., HERMAN, P.R., TAM, R. and ZHANG, J. Rapid long-period grating formation in hydrogen-loaded fibre with 157 nm F₂-laser radiation. **Electronics Letters**, v.36, n.24, 23rd November 2000.
- CHERN, G. W. and WANG, L. A. Transfer-matrix method based on perturbation expansion for periodic and quasi-periodic binary long-period gratings. **Optical Society of America**, v. 16, n. 11, November 1999.
- CHIANG, K. S., LIU, Y., MG, N. M. and DONG, X. Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index. **Electronics Letters**, v. 36, p. 966-967, 2000.
- COLLADON, D. On the reflections of a ray of light inside a parabolic liquid stream. **Comptes Rendus** 15, p. 800-802, Oct. 24, 1842.
- COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., POSSETI, G. R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L., Nonlinear Thermal Sensitivity of a Long-Period Grating, in **Proc. of IMOC 2007 – International Microwaves and Optoelectronics Conference 2007**, v. único, p. 693-697, 2007.
- COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L. Kinetic of Long Period Gratings UV-Induced and Sensing Characteristics. in **RIAO/OPTILAS 2007: 6th Ibero-American Conference on Optics (RIAO); 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (OPTILAS)**, Campinas. **AIP Conference Proceedings**, v. 992, p. 242-247, 2008.
- COSTA, R. Z. V., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M. and FABRIS, J. L. Thermal characteristics of long-period gratings 266 nm UV-point-by-point induced. **Optics Communications**, v. 282, p. 816-823, 2009.
- DAKIN, J. and CULSHAW, B. *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*, **Boston: Artech House**, v. 1, 1988.

- DAVIS, D. D., GAYLORD T. K., GLYTSIS E. N., KOSINSKI S. G., METTLER S. C. and VENGSARKAR A. M. Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser beams. **Electronics Letters**, v.34, p.302-303, 1998.
- DIANOV, E. M., GOLANT, K. M., KHRAPKO, R. R., KURKOV, A. S., LECONTE, B., DOUAY, M., BERNAGE, P. and NIAY, P. Grating formation in a germanium free silicon oxynitride fibre. **Electronics Letters**, v. 33, issue 3, p. 236-238, 1997.
- DIANOV, E. M., KARPOV V. I., GREKOV, M. V., GOLANT, K. M., VASILIEV, S. A., MEDVEKOV, O. I. and KHRAPKO, R. R. Thermo-Induced long period fibre grating IOOC-ECOC, v.2 (London: IEE), p.53-56, 1997.
- DIANOV, E. M., STARODUBOV, D. S., VASILIEV, S. A., FROLOV, A. A. and MEDVEDKOV, O. I., Refractive-index gratings written by near-ultraviolet radiation. **Optics Letters**, v. 22, n. 4, p 221-223, 1997.
- DIANOV, E. M., KARPOV, V. I., KURKOV, A. S. and GREKOV, M. V. Long-period fiber gratings and mode-field converters fabricated by thermodiffusion in phosphosilicate fibers. In Optical Communication, 24th European Conference, v.1, p.395-396, 1998.
- DYER, P. E., FARLEY, R. J., GIEDL, R., BYRON, K. C. and REID, D. High reflectivity fibre gratings produced by incubated damage using a 193 nm ArF laser. **Electronics Letters**, v. 30, p. 860-862, 1994.
- DONG, L., ARCHAMBAULT, J. L., REEKIE, L., J. RUSSEL., St. P. and PAYNE, D. N. Single Pulse Bragg Gratings Written During Fibre Drawing, **Electronics Letters**, v. 29, p. 1577-1578, 1993.
- DOUAY, M., FERTEIN, E., XIE, W. X., BERNAGE, P., NIAY, P., BAYON, J. F. and GEORGES, T. Thermal Hysteresis of Bragg Wavelengths of Intra-core Fiber Gratings. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 5, n. 11, November 1993.
- DROZIN, L. FONJALLAZ P.Z. and STENSLAND, L.K. Long-period fibre gratings written by CO₂ exposure of H₂-loaded standard fibres. **Electronics Letters**, v.36, p.742-743, 2000.
- DUHEM, O. and DOUAY, M. Effect of UV-induced birefringence on long-period grating coupling characteristics. **Electronics Letters**, v.36, p.416-417, 2000

- DU, W., TAM, H., LIU, M. and TAO, X. Long-period fiber grating bending sensors in laminated composite structure. in SPIE Conf. Proc. Smart Structures and Materials, **SPIE**, San Diego, USA, v. 3330, p. 284-292, 1998.
- ERDOGAN, T., MIZRAHI, V., LEMAIRE, P. J. and MONROE, D. Decay of ultraviolet-induced fiber Bragg gratings. **Journal Appl. Phys.**, v. 76, n.1, p. 73-80, 1994.
- FALATE, R. Produção e Caracterização de Redes de Período Longo para Aplicações em Sensoriamento, 2002. Dissertação (Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Orientador) José Luís Fabris.
- FALATE, R. Redes de Período Longo Fabricadas com Arco Elétrico como Sensores de Parâmetros Físico-Químicos., 2006. Tese (Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Orientador) José Luís Fabris.
- FALATE, R., FRAZÃO, O., REGO, G., FABRIS, J. L. and SANTOS, J. L. Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings based on Electric-Arc Discharges. III Symposium on Enabling Optical Networks – SEON 2005 Aveiro- Portugal, p. 51-53, 2005
- FALATE, R., FRAZÃO, O., REGO, G., IVANOV, O. V., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., SANTOS, J. L. Bending sensitivity dependent on the phase shift imprinted in long-period fibre gratings. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. 3123-3130, 2007.
- FALATE, R., FUGIHARA, M. C., MULLER, M., KALINOWSKI, H. J. and FABRIS, J. L. Produção e Caracterização de Redes de Longo Período Gravadas com Arco Elétrico. in X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica SBMO Recife, 2002, Anais do X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica, Sociedade Brasileira de Microondas e Optoeletrônica, p. 78-82, 2002.
- FALATE, R., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L. and MULLER, M. Redes de Período Longo para Controle de Qualidade de Combustíveis: Mistura Álcool-Gasolina. II Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná, 2002.

- FLAHERTY, F. J., GHASSEMLOOY, Z., MANGAT, P. S. and DOWKER, K. P. Temperature characterisation of long-period gratings for sensor applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 42, n. 5, 5 September 2004.
- FONJALLAZ, P. Y. LIMBERGER, H. G., SALATHÉ, R. P., COCHET, F. and LEUENBERGER, B., Tension increase correlated to refractive index change in fibers containing UV written Bragg gratings, **Optics Letters**, v. 20, n. 11, p 1346-1348, 1995.
- FUJUMAKI, M., OHKI, Y., BREBNER J. L. and ROORDA S. Fabrication of long-period optical fibre gratings by use of ion implantation. **Optics Letters**, v. 25, p.88-90, 2000.
- GAO, K. and FANG, Z. A new method of measuring the waveguide dispersion factor and the thermo-optic coefficient of long-period fiber gratings. **Optics Communications**, v.244, p.227-231, 2005.
- GIOZZA, W. F., CONFORTI, E. e WALDMAN, H. *Fibras Óticas: Tecnologias e Projeto de Sistemas*, São Paulo, **Makron Books**, 1991.
- GREENE, B. I., KROL, D. M., KOSINSKI, S. G., LEMAIRE, P. J. and SAETA, P. N. Thermal and photo-initiated reactions of H₂ with germanosilicate optical fibers. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 168, p. 195-199, 1994.
- GRIETENS, B. and VOET, M. Fiber Optic Sensors to Monitor Structural Components Made of Composite Materials. **Sensors & Transducers Journal**, v. 80, Issue 6, p. 1289-1294, June 2007.
- GRUBSKY, V. STARODUBOV, D. S. and FEINBERG, J. Photochemical reaction of hydrogen with germanosilicate glass initiated by 3.4-5.4-eV ultraviolet light. **Optics Letters**, v. 24, n. 11, 1999.
- GOWAR, J. **Optical Communication Systems**. Hertfordshire: Prentice Hall, 1984.
- GUAN, B.-O., TAM, H.-Y., HO, S.-L., LIU, S.-Y. and DONG, X.-Y. Growth of Long-Period Gratings in H₂-Loaded Fiber After 193-nm UV Inscription. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n.6, June 2000.

- GUAN, B-OU, TAM, H-Y, HO, S-L and DONG X-Y. Growth of longo-period gratings in H₂-loaded fibre after 193 nm UV inscription. **IEEE Photonics Technology Letters** V.12, p.642-644, 2000.
- HALL, D. G. Theory of waveguides and devices. in *Integrated Optical Circuits and Components*, L. D. Hutchinson, Ed. **Marcel Dekker**, New York, 1987.
- HAND, D. P. and RUSSEL, P. St. J. Photoinduced refractive index changes in germanosilicate optical fibers, **Optics Letters**, v. 15, n. 2, p. 102-104, 1990 citado por KASHYAP, 1999.
- HARRÉ, R. *Great Scientific Experiments: twenty experiments that changed our view of the world*. USA, **Oxford University Press**, 1983.
- HASEGAWA, A and KODAMA, Y. **Solitons in Optical Communications**. Oxford, Clarendon Press, 1995.
- HAYKIN, S. *Neural Networks: a Comprehensive Foundation*, ed. 2, **Prentice-Hall**, 1999.
- HE, W., SHI, W., CAI, P. and YE, A. Applications of acrylate-based polymer and silicone resin on LPGFG-based devices, **Optics Mater**, v. 21, p. 507-510, 2002.
- HECHT, J. **City of Light: The Story of Fiber Optics**. New York, Oxford University Press, 1999.
- HILL, K. O., Aperiodic distributed-parameter waveguides for integrated optics. **Applied Optics**, v. 13, n.8, p. 1853-1856, 1974.
- HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection filter fabrication. **Appl. Phys. Lett.**, v. 32, p. 647-649, 1978.
- HILL, K. O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C., MORSE, T. F., KILIAN, A., REINHART, L., KYUNGHWAN, O., Photosensitivity in Eu²⁺: Al₂O₃-doped-core fibre: Preliminary results and application to mode converters. Proc. Conference on Optical Fiber Communications, OFC' 91, p. 14-17, paper PD3-1, 1991.
- HILL, K. O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C. and ALBERT, J. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask. **Applied Physics Letters**, v. 62, n. 10, p. 1035-1037, 1993.

- HILL, K. O. and MELTZ, G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1263-1276, 1997.
- HUMBERT, G. and MALKI, A. Electric-arc-induced gratings in non-hydrogenated fibres: fabrication and high-temperature characterizations. **J. Opt. A: Pure Appl. Opt.**, v. 4, p. 194-198, 2002a.
- HUMBERT, G. and MALKI, A. Characterizations at very high temperature of electric arc induced long-period fiber grating. **Optics Communications**, v. 208, p. 329-335, 2002b.
- JAMES, S. W., TATAM, R. P., TWIN, A., BATEMAN, R. and NOONAN, P. Cryogenic temperature response of fibre optic long period gratings. **Measurement Science and Technology**, v.14, p.1409-1411, 2003.
- JAMES, S. W., TATAM, R. P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. **Measurement Science and Technology**, v. 14, p. R49-R61, 2003.
- JANG, J. N., KIM, H. G., SHIN, S. G., KIM, M. S., LEE, S. B. and KWACK, K. H. Effects of hydrogen molecule diffusion on LP_{0m} mode coupling of long-period gratings. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 259, p. 156-164, 1999.
- JIANG, Y., LI, Q., LIN, C. H., LYONS, E., TOMOV, I. and LEE, H. P. A novel strain-induced thermally tuned long-period fibre grating fabricated on a periodic corrugated silicon fixture. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 14, p. 941-943, 2002.
- JIN, W., MICHIE, C., THURSBY, G., KONSTANTAKI, M. and CULSHAW, B. Simultaneous measurement of strain and temperature: Error analysis. **Optical Engineering**, v. 36, n. 2, p. 589-609, 1997.
- KAKARANTZAS, G., BIRKS, T. A. and RUSSEL, P. S. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers. **Optics Letters**, v.27, p. 1013-1015, 2002.
- KAKARANTZAS, G., DIMMICK, T. E., BIRKS, T. A., LE, R. R. and RUSSELL, P. S.J. Miniature all-fibre devices based on CO₂ microstructuring of tapered fibres. **Optics Letters**, v. 26, p. 1137-1139, 2001.

- KALACHEV, A. I., PUREUR, V. and NIKOGOSYAN, D. N. Investigation of long-period fiber gratings induced by high-intensity femtosecond UV laser pulses. **Optics Communications**, v. 246, p. 107-115, 2005.
- KAMIKAWACHI, R. C., POSSETI, G. R. C., FALATE, R., MULLER, M. and FABRIS, J. L. Influence of surrounding media refractive index on the thermal and strain sensitivities of long-period gratings. **Applied Optics**, v. 46, n. 15, 20 May 2007.
- KAMIKAWACHI, R. C. Dispositivos Sensores em Fibra para uso em Refratometria., 2007. Tese (Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (Orientador) José Luís Fabris.
- KAO, K. C. and HOCKHAM, G. A. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies. **Proc. IEEE**, v.113, p.1151-1158, 1966.
- KAPANY, N. **Fiber Optics: Principles and Applications**. New York, Academic Press, 1967.
- KAPRON, F. P., KECK, D. B. and MAURER, R. D. Radiation Losses in Glass Optical Waveguides, **Applied Physics Letters** 17, p. 423-425, 1970.
- KASHYAP, R. **Fiber Bragg Grating**. San Diego, Academic Press, 1999.
- KASHYAP, R., MCKEE, P. F., CAMPBELL, R. J., WILLIAMS, D. L. Novel Method of Producing All Fibre Photo-Induced Chirped Gratings. **Electronics Letters**, v. 30, p. 996-1107, 1994, citado por (SILVA, 2001).
- KECK, D. B., MAURER, R. D. and SCHULTZ, P. C. On the Ultimate Lower Limit of Attenuation in Glass Optical Waveguides, **Applied Physics Letters** 22, n. 7, p. 307-309, 1973.
- KERSEY, D. A., MICHAEL, A. D., HEATHER, J. P., LE BLANC, M., KOO, K. P. Fiber Grating Sensors, **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, p. 1442-1463, 1997.
- KHALIQ, S., JAMES, S. W. and TATAM, R. P. Enhanced sensitivity fibre optic long period grating temperature sensor. **Measurement Science and Technology**, v.13, p. 792-795, 2002.
- KIM, C. S., HAN, Y., LEE, B. H., HAN, W. T., PAEK U-C and CHUNG, Y. Induction of the refractive index change in B-doped optical fibers through relaxation of the mechanical stress. **Optics Communications**, v. 185, p. 337-342, 2000.

- KODAMA, Y. and HASEGAWA, A. **Progress in Optics**. v.30, North-Holland, Amsterdam, E. Wolf, Ed., 1992.
- KONDO, Y., NOUCHI K., MITSUYU T., WATANABE M., KAZANSKY P. and HIRAO K. Fabrication of long-period fibre gratings by focused irradiation of infra-red femtosecond laser pulses. **Optics Letters**, v.24, p.646-648, 1999.
- KOSINSKI, S. G. and VENGSARKAR, A. M., Splice-based long period fiber gratings, in Optical Fiber Sensors Conference, OFC 98, paper ThG3, Technical Digest p.278-279, 1998.
- KROHN, D. Market Opportunities and Standards Activities for Optical Fiber Sensors, in 18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2006), FB1.
- LAM, D. K. W. and GARSIDE, B. K. Characterization of single-mode optical fiber filters. **Applied Optics**, v. 20, p.440-445, 1981.
- LEFEBVRE, P., VINCELETTE, A., FICOCELLI, P. ALLARD, S. and CARBONNEAU, S. Reliability characterization of fiber Bragg grating. in 18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2006), MD6.
- LEMAIRE, P. J. Enhanced UV photosensitivity in fibers and waveguides by high-pressure hydrogen loading. in Conference on Optical Fiber Communication (OFC'95), San Diego, California, Technical Digest, p. 162-163, 1995.
- LEMAIRE, P. J. Reability of optical fibers exposed to hydrogen: prediction of long-term loss increases. **Optics Eng.**, v. 30, n.6, p. 780-789, 1991, citado por KASHYAP, 1999.
- LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V., REED, W. A. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO₂ doped optical fibres. **Electronics Letters**, v. 29, n. 13, p.1191-1193, 1993.
- LEMAIRE, P. J., VENGSARKAR, A. M., REED, W. A. and DI GIOVANNI, D. J. Thermally enhanced ultraviolet photosensitivity in GeO₂ and P₂O₅ doped optical fibers. **Applied Physics Letters**, v. 66, n. 16, p. 2034-2036, April 1995.

- LI, J. and WU, S. Two-coefficient Cauchy model for low birefringence liquid crystals. **Journal of Applied Physics**, v. 96, p.170-174, 2004.
- LIMBERGER, H. G., FONJALLAZ, P. Y. and SALATHÉ, R. P. UV induced stress changes in optical fibers, in Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Waveguides: Fundamentals and Applications, v. 22, 1995 **OSA Technical Digest Series** (Optical Society of America, Washington, DC, 1995), p. 56-60.
- LIMBERGER, H. G., FONJALLAZ, P. Y., SALATHÉ, R. P., and COCHET, F. Compaction and photoelastic-induced index changes in fiber Bragg gratings. **Applied Physics Letters**, v. 68, p. 3069-3071, 1996 citado por KASHYAP, 1999.
- LIN, C-Y., CHERN, G-W. and WANG, L. A. Periodical corrugated structure for forming sampled fibre Bragg grating and long-period fibre grating with tunable coupling strength. **Journal of Lightwave Technology**, v.19, p. 1212-1220, 2001.
- LIU, Y., GUO, Z., ZHANG, Y., CHIANG, K. S. and DONG, X. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fibre Bragg grating. **Electronics Letters**, v. 36, n. 6, p. 564-566, March 2000.
- LIU, Y., ZHANG, L. and BENNION, I. Fibre optic load sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre. **Electronics Letters**, v. 35, p. 661-662, 1999.
- LIU, Y., ZHANG, L., WILLIAMS, J. A. R. and BENNION, I. Optical Bend Sensor Based on Measurement of Resonance Mode Splitting of Long-Period Fiber Grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 12, n. 5, 2000.
- LIU, Y., ZHANG, L., WILLIAMS, J. A. R. and BENNION, I. Bend sensing by measuring the resonance splitting of long-period fiber gratings. **Optics Communications**, v. 193, p. 69-72, 2001.
- LÓPEZ-HIGUERA, J. M. (editor) **Optical Sensors**, Stander: Servicio de Publicaciones de La Universidad de Cantabria, 1998.
- MACFARLANE, A., MARTIN, G. A World of Glass. **Science**, v.305, p.1407-1408, 3 September 2004).

- MALO, B., HILL, K. O., BILODEAU, F., JOHNSON, D. C. and ALBERT, J. Point-by-point fabrication of micro-Bragg gratings in photosensitive fibre using single excimer pulse refractive index modification techniques. **Electronics Letters**, v. 29, p. 1668-1669, 1993.
- MARTIN, J. and OUELLETTE, F. Novel Writing technique of long and highly reflective in-fibre gratings. **Electronics Letters**, v. 30, n. 10, p.811-812, May 1994.
- MASUDA, Y., NAKAMURA, M., KOMATSU, C., FUJITA, K., YAMAUCHI, M., KIMURA, M., MIZUTANI, Y., KIMURA, S., SUZAKI, Y., YOKOUCHI, T., NAKAGAWA, K. and EJIMA, S. Wavelength Evolution of Fiber Bragg Gratings Fabricated From Hydrogen-Loaded Optical Fiber During Annealing. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 3, p. 934-940, March 2004.
- MELTZ, G. and MOREY, W. W., Bragg Grating Formation and Germanosilicate Fiber Photosensitivity. **Proc. SPIE**, v.1516, p. 185-192, 1991. citado por (SILVA, 2001).
- MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, p. 823-825, 1989.
- MELTZ, G., MOREY, W. W., HEWLETT, S. J. and LOVE, J. D. Wavelength shifts in fiber Bragg gratings due to changes in the cladding properties. **Proc. OSA Topical Meeting on Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides**, paper PMB4, 225, 1995 in BHATIA, 1996.
- MOREY, W. W., MELTZ, G. and GLENN, W. H. Fiber optic Bragg grating sensor. **Proc. SPIE** 1582, p. 36-44, 1992.
- NARAYANAN, C., PRESBY, H. M. And VENGSARKAR, A. M. Band-rejection fibre filter using periodic core deformation. **Electronics Letters**, v. 33, n. 4, p. 280-281, February 1997.
- OKAMOTO, K. **Fundamentals of Optical Waveguides**. 2nd ed., Oxford, Academic Press, 2006.
- OTHONOS, A. Fiber Bragg Grattings. **Review of Scientific Instruments**, v. 68, p.4309-4341, 1997.
- OTHONOS, A. and KALLI, K. Fiber Bragg Grattings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing. **Artech House**: Norwood, 1999.

- OUELLETTE, F., Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguides. **Optics Letters**, v. 12, p. 847-849, 1987.
- PAL, S., SUN, T., GRATTAN, K. T. V., WADE, S. A., COLLINS, S. F., BAXTER, G. W., DUSSARDIER, B., MONNOM, G. Non-linear temperature dependence of Bragg gratings written in different fibres, optimized for sensor applications over a wide range of temperatures. **Sensors and Actuators A**, v.112, p. 211-219, 2004.
- PALAI, P., SATYANARA, M. N., DAS, M. THYAGARAJAN, K. and PAL, B. P. Characterisation and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge. **Optics Communications**, v. 193, p.181-185, 2001.
- PALAI, P., SATYANARAYAN, M. N., DAS, M., THYAGARAJAN, K., PAL, B. P. Characterization and simulation of long period gratings fabricated using electric discharge. **Optics Communications**, v. 191, p. 181-185, June, 2001 citado em FALATE, 2002.
- PATRICK, H. J., CHANG, C. C. and VOHRA, S. T. Long period fibre gratings for structural bend sensing. **Electronics Letters**, v. 34, n. 18, 1998.
- PATRICK, H. J. Self-aligning, bipolar bend transducer based on long period grating written in eccentric core fibre. **Electronics Letters**, v. 36, n. 21, p. 1763-1764, 2000.
- PATTERSON, D. W. Artificial Neural Network: Theory and Applications. Singapore: **Prentice-Hall**, 1996.
- POOLE, C. D., PRESBY, H. M. and MEESTER, J. P. Two mode fibre spatial-mode converter using periodic core deformation. **Electronics Letters**, v. 30, p. 1437-1438, 1994.
- POSSETTI, G. R. C., CORADIN, F. K., CÔCCO, L. C., YAMAMOTO, C. I., DE ARRUDA, L. V. R., FALATE, R., MULLER, M., FABRIS, J. L. Application of artificial neural networks for conformity analysis of fuel performed with an optical fiber sensor. In: RIAO/OPTILAS 2007: 6th Ibero-American Conference on Optics (RIAO); 9th Latin-American Meeting on Optics, Lasers and Applications (OPTILAS), 2008, Campinas. **AIP Conference Proceedings**, v. 992, p. 265-270, 2008a.
- POSSETTI, G. R. C., CORADIN, F. K., CÔCCO, L. C., YAMAMOTO, C. I., DE ARRUDA, L. V. R., FALATE, R., MULLER, M., FABRIS, J. L. Smart sensors for the

- petroleum sector based on long period gratings supervised by artificial neural networks. **Proceedings of SPIE**, v. 7004, p. 70045W, 2008b.
- QIN, L., WEI, Z.X., WANG, Q. Y., LI, H. P., ZHENG, W., ZHANG, Y. S. and GAO, D. S. Compact temperature-compensating package for long-period fiber gratings. **Optical Materials**, v. 14, p. 239-242, 2000 citado por FALATE, 2006.
- RAO, Y. J., HU, A. Z. and NIU, Y. C. A novel LPFG gain equalizer written in a bend-insensitive fiber. **Optics Communications**, v. 244, p. 137-140, 2005.
- RAO, Y. J., WANG, Y. P., RAN, Z. L. and ZHU, T. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses. **Journal of Lightwave Technology**, v. 21, n. 5, p. 1320-1327, May 2003.
- RAO, Y. J., ZHU, T., RAN, Z. L., WANG, Y. P., JIANG, J. and HU, A. Z. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication. **Optics Communications**, v. 229, p. 209-221, 2004.
- RATHJE, J., KRISTENSEN, M. and HÜBNER, J. Effects of Fiber Core Concentricity Error and UV Illumination Direction on the Bend Direction Asymmetry of Long-Period Gratings. **Optical Society of America TOPS**, v. 33, p. 210-228, 2000.
- REGO, G., OKHOTNIKOV, O., DIANOV, E. and SULIMOV, V. High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced using an Electric Arc. **J. Lightwave Technol.**, v.19, n.10, p.1574-1579, October 2001.
- REGO, G., FERNANDES, J. R. A., SANTOS, J. L., SALGADO, H. M. and MARQUES, P. V. S. New Technique to mechanically induce long-period fiber gratings. **Optics Communications**, v. 220, p. 111-118, 2003.
- REITZ, J. R., MILFORD, F. J. and CHRISTY, R. W. Fundamentos da Teoria Eletromagnética. Trad. René Balduino Sander e Carlos Duarte, **Editora Campus**, RJ, 1982.
- SAVIN, S., DIGONNET, M. J. F., KINO, G. S. and SHAW, H. J. Tunable mechanically induced long-period fibre gratings. **Optics Letters**, v. 25, p. 710-712, 2000.

- SCEATS, M. G. and KRUG, P. Photoviscous annealing – dynamics and stability of photorefractivity in optical fibers. in **SPIE 2044**, p.113-120, 1993 citado por KASHYAP, 1999.
- SHENG, H. J., FU, M. Y., CHEN, T. C., LIU, W. F. and BOR, S. S. A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating. **IEEE Photonics Technology Letters**, p. 1-3, 2004.
- SHU, X., ALLSOP, T., GWANDU, B., ZHANG, L. and BENNION, I. High-Temperature Sensitivity of Long-Period Gratings in B-Ge Codoped Fiber. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 13, p. 818-820, 2001.
- SILVA, J. C. C. Estudos da Deformação em Cabos Condutores de Alumínio com Alma de Aço Utilizando Redes de Bragg em Fibras Óticas, 2001. Dissertação (Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (orientador) HYPÓLITO JOSÉ KALINOWSKI.
- SILVA JÚNIOR, D. N. Fibras Óticas. **Érica Editora LTDA**, 1990.
- SMITH, D. Y. Dispersion theory, sum rules and their application to the analysis of optical data, in *The Handbook of Optical Constants*, (E. P. Palik Ed.), chapter 3, **Academic Press**, New York, 1985 citado por KASHYAP, 1999.
- SPIEGEL, M. R. Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas. Trad. Roberto Chioccarello, Coleção Schaum, **McGraw-Hill**, 1973.
- STARODUBOV, D. S., GRUBSKY, V., FEINBERG, J., KOBRIN, B. and JUMA, S. Bragg grating fabrication in germanosilicate fibers by use of near-UV light: a new pathway for refractive-index changes. **Optics Letters**, v. 22, n. 14, p. 1086-1088, 1997.
- STARODUBOV, D. S., GRUBSKY, V. and FEINBERG, J. All-Fiber Bandpass Filter with Adjustable Transmission Using Cladding-Mode Coupling. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 10, n.11, November 1998.
- SUN, J., CHAN, C.C., TAN, K.M., DONG, X.Y., SHUM P. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of bending curvature and temperature with long period fiber gratings. **Sensors and Actuators A**, v. 137, n. 2, p. 262–267, 2007.

- SUN, J., CHAN, C.C., DONG, X.Y., SHUM P. Application of an artificial neural network for simultaneous measurement of temperature and strain by using a photonic crystal fiber long-period grating. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. 2943-2948, 2007.
- SWART, P. L., LACQUET, B. M. and CHTCHERBAKOV, A.A. Chirped fiber optic Bragg grating esophageal pressure sensor. **Proc. IEEE**, p. 235-238, 2002.
- TSAI, T.-E., WILLIAMS, G. M. and FRIEBELE, E. J. Index structure of fiber Bragg gratings in Ge-SiO₂ fibers. **Optics Letters**, v. 22, n. 4, p. 224-226, 1997.
- VAN WIGGERREN, G. D, GAYLORD, T. K., DAVIS, D. D., ANEMOGIANNIS, E., GARRETT, B. D., BRAIWISH, M. I. and GLYTSIS, E. N. Axial rotation dependence of resonances in curved CO₂-laser-induced long-period fibre gratings. **Electronics Letters**, v. 36, n.16, p. 1354-1355, August 2000.
- VENG SARKAR, A. M., LEMAIRE, P. J., JUDKINS, J. B., BHATIA, V., ERDOGAN, T., SIPE, J. E. Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. **Journal of Lightwave Technology**, v.14, n.1, p. 58-65, January 1996.
- VENG SARKAR, A. M., PEDRAZZANI, J. R., JUDKINS, J. B., LEMAIRE, P. J., BERGANO, N. S., DAVIDSON, C. R. Long-period fiber-grating-based gain equalizers. **Optics Letters**, v.21, n.5, p. 336-338, March 1996.
- VENG SARKAR, A. M., ZHONG, Q., INNIS, D. REED, W. A., LEMAIRE, P. J. and KOSINSKI, S. G. Birefringence reduction in side-written photoinduced fiber devices by a dual-exposure method. **Optics Letters**, v. 19, n. 16, 1994.
- WALDMAN, H. e YACOUB, M. D. Telecomunicações: Princípios e Tendências, São Paulo, **Editora Érica**, 1997.
- WANG, Y. P. and RAO, Y. J. A Novel Long Period Fiber Grating Sensor Measuring Curvature and Determining Bend-Direction Simultaneously. **IEEE Sensors Journal**, v. 5, n. 5, 2005.
- WANG, Y. P., RAO, Y. J., RAN, Z. L., ZHU, T. and HU, A. Z. A novel tunable gain equalizer based on a long-period fiber grating written by high-frequency CO₂ laser pulses. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 15, n.2, p. 251-253, February 2003.

- WANG, Y. P., RAO, Y. J., RAN, Z. L., ZHU, T. and ZENG, X. K. Bend-insensitive long-period fiber grating sensors. **Optics and Lasers Engineering**, v. 41, p.233-239, 2004.
- WANG, Z., HEFLIN, J. R., STOLEN, R. H. and RAMACHANDRAN, S. Analysis of optical response of long period fiber gratings to nm-thick thin-film coatings. **Optics Express**, v. 13, n. 8, p. 2808-2813, 2005.
- WILLIAMS, D. L., AINSLIE, B. J., ARMITAGE, R. KASHYAP, R. and CAMPBELL, R., Enhanced UV photosensitivity in boron codoped germanosilicate fibres. **Electronics Letters**, v. 29 (1), p. 45-47, 1993.
- WILLIAMS, D. L., AINSLIE, B. J., KASHYAP, R., MAXWELL, G. D., ARMITAGE, J. R., CAMPBELL, R. J. and WYATT, R. Photosensitivity index changes in germania-doped silica fibres and waveguides, **SPIE**, v. 2044, p. 55-68, 1993.
- WYSOCKI, P. F., JUDKINS, J. B., ESPINDOLA, R. P., ANDREJCO, M. and VENGSARKAR, A. M. Broadband Erbium-Doped Fiber Amplifier Flattened Beyond 40 nm Using Long-Period Grating Filter. **IEEE Photonics Technology Letters**, v.9, n.10, p.1343-1345, October 1997.
- XU, M. G., REEKIE, L., CHOW, Y. T. and DAKIN, J. P. Optical in-fibre grating high pressure sensor. **Electronics Letters**, v. 29, n.4, p. 398-399, 1993.
- YIN, S., CHUNG, K. W. and ZHU, X. A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure. **Optics Communications**, v. 188, p.301-305, February 2001 citado por FALATE, 2006.
- YOKOUCHI, T., SUZAKI, Y., NAKAGAWA, K., YAMAUCHI, M., KIMURA, M., MIZUTANI, Y., KIMURA, S. and EJIMA, S. Thermal tuning of mechanically induced long-period fiber grating. **Applied Optics**, v. 44, p. 5024-5028, 2005.
- ZALVIDEA, D., DIEZ, A., CRUZ, J. L. e ANDRÉS, M. V. Wavelength multiplexed sensor based on palladium-coated fibre taper and Bragg grating. **Electronics Letters**, v. 40, n. 5, p.301-302, 2004.
- ZHANG, B. and KAHRIZI, M. High-Temperature Resistance Fiber Bragg Grating Temperature Sensor Fabrication. **IEEE Sensors Journal**, v. 7, n. 4, April 2007.

- ZHANG, L., LIU, Y. and BENNION, I. High reflectivity single-and multiple-grating fabrication of Bragg and long-period structures using 255 nm UV light from a frequency-doubled copper vapour laser. Proc. Int. Conf. On Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides, Sept. 1999, p. 66-68, ThE7.
- ZHANG, L., LIU, Y., EVERALL, L., WILLIAMS, J. A. R. and BENNION, I. Design and Realization of Long-Period Gratin Devices in Conventional and High Bifringence Fibers and Their Novel Applications as Fiber-Optic Load Sensors. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 5, n. 5, p. 1373-1378, September/October 1999 citado em FALATE, 2002.
- ZHANG, S., LEE, S. B.; FANG, X. and CHOI, S. S. In-fiber grating sensors. **Optics and Lasers in Engineering** , v.32, p. 405-418, 1999.
- ZHANG, Y., FENG, D., LIU, Z., GUO, Z., DONG, X., CHIANG, K. S. and CHU, B. C. B. High-Sensitivity Pressure Sensor Using a Shielded Polymer-Coated Fiber Bragg Grating. **Proc. IEEE Photonics Technology Letters**, v. 13, n. 6, p. 618-619, June 2001.
- ZHAO, W., SHEN, Y., SUN, T. and GRATAN, K.T.V. FBGs in Bi-Ge Co-doped Photosensitive Fibre for High Temperature Measurement up to 1000°C. in 18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest (Optical Society of America, Washington, DC, 2006), TuE86.
- ZHAO, D., CHEN, X., ZHOU, K. ZHANG, L., BENNION, I., MACPHERSON, W. N.,, BARTON, J. S. and JONES, J. D. C. Bend sensors with direction recognition based on long-period gratings written in D-shaped fiber. **Applied Optics**, v. 43, n. 29, 2004.
- ZHAO, C. L., YANG, X., DEMOKAN, M. S.E. and JIN, W., Simultaneous Temperature and Refractive Index Measurement Using a 3° Slanted Multimode Fiber Bragg Grating, **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 2, p.879-883, 2006.
- ZHOU, K., CHEN, X., ZHANG, L. and BENNION, L., Low Thermal Sensitivity Grating Devices Based on ex-45° Tilting Structure Capable of Forward-Propagating Cladding Modes Coupling, **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, p. 5087-5094, 2006.