

# **CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DO PARANÁ**

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

---

## **DISSERTAÇÃO**

apresentada ao CEFET-PR  
para obtenção do título de

## **MESTRE EM CIÊNCIAS**

por

**ROSANE FALATE**

---

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO**

**PARA APLICAÇÕES EM SENSORIAMENTO**

---

Banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. JOSÉ LUÍS FABRIS

CEFET-PR

Examinadores:

Prof<sup>a</sup>. Dr. ADRIANA LÚCIA CERRI TRIQUES

PUC-RIO

Prof<sup>a</sup>. Dr. MÁRCIA MÜLLER

CEFET-PR

Prof. Dr. HYPOLITO JOSÉ KALINOWSKI

CEFET-PR

**Curitiba, 09 de agosto de 2002.**



**ROSANE FALATE**

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO  
PARA APLICAÇÕES EM SENSORIAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Mestre em Ciências" - Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Curitiba

2002

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Luiz e Eliane,  
minhas irmãs, Simone e Cristiane.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES, pela concessão de bolsa e apoio financeiro a este projeto.

Aos meus pais, Luiz e Eliane, cada um com seu jeito ímpar de ser, presentes em todos os fatos que marcaram a minha vida. Obrigada pelo amor, compreensão, força, ensinamentos e de sempre estarem presente quando eu mais precisei. Obrigada pelo tempo de suas vidas dedicadas a mim.

Às minhas irmãs, Simone e Cristiane, pelas ajudas e apoio quando eu precisei e pela compreensão das vezes que eu não pude estar presente.

Ao meu orientador de mestrado, prof. José Luís Fabris e aos professores Márcia Müller e Hypolito José Kalinowski, pelo conhecimento adquirido com suas experiências, pela paciência, ajuda, incentivo e colaboração para a finalização deste trabalho.

Ao professor Carlos Marcus Gomes da Silva Cruz, pelo auxílio na parte de química deste trabalho, tanto teórico como experimental, por meio da verificação dos cálculos de físico-química, e empréstimos de equipamentos, utensílios e materiais.

Aos amigos da pós-graduação, Rafael, Meire, Jean, Ilda, Pedro, Ana Carolina, e outros, pela oportunidade de compartilhar conhecimentos e alegrias.

Aos professores e funcionários do CEFET-PR que me apoiaram durante o curso.

Ao CEFET-PR, pelas instalações oferecidas para realização desta dissertação.

A Deus, que me deu a oportunidade de viver e que sempre está presente em cada passo de minha vida.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>VI</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
<b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
3.1 FIBRA ÓTICA .....	21
3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS .....	22
3.3 MODOS DE PROPAGAÇÃO EM FIBRAS .....	23
3.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS REDES EM FIBRAS.....	24
3.5 SENSIBILIDADE DAS REDES DE PERÍODO LONGO AO MEIO EXTERNO .....	28
3.6 TÉCNICAS DE ESCRITA DAS REDES DE PERÍODO LONGO .....	31
3.6.1 Técnicas de fabricação ponto-a-ponto e máscara de amplitude .....	31
3.6.2 Técnicas de fabricação com laser de CO <sub>2</sub> e por arco elétrico .....	33
<b>4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>37</b>
4.1 SISTEMA DE LEITURA DE REDES EM FIBRAS.....	37
4.1.1 Leitura de uma rede de Bragg .....	39
4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LPG COM ARCO ELÉTRICO .....	41
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO .....	47
4.3.1 Sensibilidade à temperatura do meio externo.....	47
4.3.2 Sensibilidade ao índice de refração do meio externo .....	53

4.3.3 Sensor de concentração salina .....	56
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>63</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemático de um sensor híbrido FBG/LPG para medida simultânea de temperatura e tensão longitudinal [17].....	9
Figura 2 - (a) Espectro de reflexão e de transmissão das FBG e LPG e (b) montagem experimental para sensoriamento de tensão longitudinal usando uma LPG interrogando um sensor FBG [18].....	10
Figura 3 - (a) Esquema do filtro passabanda com LPG desenvolvido. O bloqueador no núcleo impede toda a luz que passa pelo núcleo. O modulador na casca controla a transmissão do dispositivo. (b) Medida do espectro de transmissão do filtro passa banda. O destaque é o espectro do pico central [57]. .....	16
Figura 4 - Secção transversal e perfil de índice de refração degrau para uma fibra ótica.....	21
Figura 5 - Diagramas que ilustram as condições de casamento de fase necessárias para ocorrer ressonância entre dois modos por um período da rede de $\Lambda$ . As figuras de (a)-(e) e (g)-(h) foram retiradas de [86].....	27
Figura 6 - Montagem experimental de fabricação de LPG, alternável entre o método ponto-a-ponto e máscara de amplitude [89]. .....	32
Figura 7 - Montagem experimental para gravação de LPG com laser de CO <sub>2</sub> [91].....	34
Figura 8 - Esquemático da montagem para a fabricação de redes de período longo usando descarga de arco elétrico [39].....	35
Figura 9 - Sistema de leitura de espectros no infravermelho. ....	38



Figura 10 - Espectros de transmissão da fibra ótica para diferentes resoluções feitos com o sistema de aquisição do laboratório. Na figura superior mostra-se a diminuição da relação sinal/ruído com a melhora da resolução do sistema.....	39
Figura 11 - Comparação entre os espectros feitos com: (a) o OSA e EDFA, (b) o sistema de aquisição do laboratório. ....	40
Figura 12 - Esquema da montagem experimental usada na fabricação de redes de período longo.....	43
Figura 13 - Espectro de transmissão da fibra ótica antes da gravação e após a gravação de 20, 30, 40 e 50 pontos. Os pontos foram gravados com um período de aproximadamente 570 $\mu\text{m}$ mediante a aplicação de um arco elétrico de 12 mA e duração de 0,5 s.....	44
Figura 14 - Espectros da rede de período longo lpgonline12 ( $\Lambda = 570 \mu\text{m}$ ), com a correção da resposta espectral do sistema, para 20, 30, 40, e 50 pontos. ....	44
Figura 15 - Espectros da rede de período longo lpgonline2, com período de interação de 649 $\mu\text{m}$ e 40, 50, e 60 pontos. Verifica-se que depois de 40 pontos a rede começa a re-acoplar para o modo de núcleo, diminuindo a profundidade do pico de atenuação. Espectros com a correção da resposta espectral do sistema. ....	45
Figura 16 - Esquema da montagem experimental usada para verificar a resposta da rede com a mudança de temperatura.....	48
Figura 17 - Deslocamento espectral da rede lpgonline12 ( $\Lambda = 570 \mu\text{m}$ e 50 pontos), para as temperaturas de 21 e 57 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.....	49

Figura 18 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1250 nm para a lpgonline12 ( $\Lambda = 570 \mu\text{m}$ e 50 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos. ....	49
Figura 19 - Deslocamento espectral da lpgonline4 ( $\Lambda = 668 \mu\text{m}$ e 40 pontos), para as temperaturas de 23 e 55 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema. ....	50
Figura 20 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1593 nm para a lpgonline4 ( $\Lambda = 668 \mu\text{m}$ e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos. ....	50
Figura 21 - Deslocamento espectral da lpgonline5 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 40 pontos), para as temperaturas de 21 e 58 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema. ....	51
Figura 22 - Variação da posição dos picos em 1480 nm e 1541 nm para a rede lpgonline5 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos. ....	51
Figura 23 - Deslocamento espectral da lpgonline11 ( $\Lambda = 589 \mu\text{m}$ e 40 pontos), para as temperaturas de 22 e 63 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema. ....	52
Figura 24 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1435 nm para a lpgonline11 ( $\Lambda = 589 \mu\text{m}$ e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da	

temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos. ....	52
Figura 25 - Deslocamento do pico de maior atenuação da rede lpgonline5 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 40 pontos), para ar, água e glicerina como meios circunvizinhos. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema. ....	54
Figura 26 - Variação da posição do pico de maior atenuação da rede lpgonline5 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 40 pontos), para índices de refração variando entre 1,000 e 1,475. ....	55
Figura 27 - Esquema de como a LPG foi presa. ....	56
Figura 28 - Posição do pico de maior atenuação da rede lpgonline13 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 53 pontos), para as concentrações de 198 e 317 g/l. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema. ....	57
Figura 29 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1585 nm para a rede lpgonline13 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$ e 53 pontos), durante os processos de diluição da solução aquosa de NaCl. A linha sólida corresponde ao ajuste linear para esses processos. ....	58
Figura 30 - Esquema de diluição de uma solução. ....	68

## RESUMO

Este trabalho descreve a produção e a caracterização de redes de período longo (LPG) nos laboratórios do CEFET-PR. São abordados aspectos referentes ao desenvolvimento histórico e aos princípios de funcionamento do dispositivo. Apresentamos os resultados obtidos na produção e na caracterização das redes, bem como os sistemas experimentais desenvolvidos para estes fins. O método empregado para a escrita de redes foi o da aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico, sendo produzidas redes com períodos entre 570 e 650  $\mu\text{m}$  operando na terceira janela de transmissão em torno de 1,55  $\mu\text{m}$ . Foram obtidas atenuações de até 4,7 dB no espectro de transmissão, com larguras de banda variando entre 29 e 62 nm. O sistema desenvolvido para a leitura pode também ser utilizado durante o processo de escrita, possibilitando o acompanhamento do processo de formação do dispositivo. As redes foram também caracterizadas em função da variação da temperatura e do índice de refração do meio externo. As sensibilidades obtidas estão entre 0,076 e 0,136  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  para variação de temperatura, entre 21 e 63  $^{\circ}\text{C}$ . Uma resolução média de  $0,0139 (\text{nm})^{-1}$  foi obtida, para índices de refração do meio externo variando entre 1,333 e 1,430. Esses resultados apontam para a possibilidade da utilização das redes de período longo para fins de sensoriamento.

## ABSTRACT

This work describes the production and characterization of long period fiber gratings (LPG) at CEFET-PR laboratories. Aspects concerning both to the historical development and the device working principles are presented. Results from the production and characterization of gratings are shown, besides to the developed experimental setups. In the writing process was used a point-to-point electrical arc discharge application, resulting in gratings with periods between 570 and 650  $\mu\text{m}$  operating in the third transmission window around 1.55  $\mu\text{m}$ . Attenuation up to 4.7 dB in the transmission were obtained, with bandwidths between 29 and 62 nm. The developed reading setup can also be used during the writing process, which allows following the grating growth. The gratings were also characterized for both external temperature and refractive index changes. The sensibilities lie between 0.076 and 0.136  $\text{nm}/^\circ\text{C}$  for temperatures ranging from 21 to 63  $^\circ\text{C}$ . An average resolution of 0.0139  $(\text{nm})^{-1}$  was achieved with external refractive indexes values between 1.333 and 1.430. Those results point out to the prospect of using the written LPG for sensing purposes.



## CAPÍTULO 1

### 1 INTRODUÇÃO

Desde a descoberta da fotosensibilidade em fibras óticas, houve um grande interesse por parte de pesquisadores na fabricação de redes em fibras e em suas aplicações, possibilitando um rápido e contínuo desenvolvimento destes elementos. Esses dispositivos têm revolucionado os campos das telecomunicações e da tecnologia de sensores a fibra. Grande parte desse avanço é devida às características únicas apresentadas por esses sensores, tais como operação eletricamente passiva, imunidade eletromagnética, baixa atenuação, elevado ponto de fusão, baixo peso e dimensão reduzida, além de serem facilmente integrados em enlaces óticos. Ao lado dessas características, pode-se ainda considerar algumas aplicações especiais desses dispositivos, como por exemplo, o monitoramento em ambientes hostis, fornos industriais, linhas de transmissão e ambientes inflamáveis.

Existem duas classes de redes em fibras: as redes de reflexão ou redes de Bragg (FBG – *Fiber Bragg Grating*), e as redes de transmissão que englobam as redes de período longo (LPG – *Long Period Grating*) e os filtros de Rocking. Nas telecomunicações pode-se usar as FBG para a adição e extração de um único canal num sistema WDM (*Wavelength Division Multiplexing* – Multiplexação por Divisão de Comprimento de Onda) e para compensação de dispersão, enquanto que as LPG são freqüentemente utilizadas como filtros seletivos em comprimento de onda, medidas e compensação de dispersão, e equalizadores de ganho. Na

área de sensores, as redes em fibras podem ser usadas para medidas de diversos parâmetros, dentre os quais curvatura, tensão longitudinal, temperatura, pressão e índice de refração.

Em comparação com as redes de Bragg, as LPG oferecem um número de vantagens adicionais. As LPG podem ser escritas com lasers UV (*UltraViolet* – ultravioleta) utilizando uma máscara de amplitude, tornando sua fabricação mais fácil e barata quando comparado com a técnica de escrita com máscara de fase, usada para a gravação das FBG. Além disso, as LPG possuem baixa perda de inserção, baixo nível de reflexão, alta sensibilidade à temperatura, e sensibilidade à variação de índice de refração do meio externo sem a necessidade de acesso ao campo evanescente como no caso das FBG.

O objetivo deste trabalho é a gravação e a caracterização de redes de período longo como sensores de temperatura e de índice de refração. As perturbações periódicas são produzidas na fibra com o auxílio do arco elétrico de uma máquina de emendas, processo este que apresenta como principal vantagem a possibilidade de utilização de fibras monomodo padrão para a gravação. A utilização dessas fibras possibilita a gravação de redes de mais fácil inserção num enlace ótico, além de diminuir os gastos com fibras especiais. Outra vantagem desse método é que a fonte de escrita possui um custo mais reduzido que os lasers UV ou de CO<sub>2</sub>, e a montagem experimental não necessita do uso de componentes especiais, como espelhos e lentes, que operam nestas faixas do espectro.

No segundo capítulo deste trabalho é descrito o estado da arte das redes de período longo, onde é enfatizado o fato de que, embora a tecnologia de fabricação destas redes seja recente, estas já possuem uma vasta aplicação. A fundamentação teórica é encontrada no capítulo 3, onde inicialmente são abordados os conceitos básicos para a compreensão do princípio de funcionamento das LPG. Em seguida é feita uma análise da operação da LPG e de sua sensibilidade ao meio externo. No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos,



com gravações e caracterizações das LPG. Finalmente, as conclusões e as propostas de trabalhos futuros são encontradas no capítulo 5.



## CAPÍTULO 2

### 2 ESTADO DA ARTE

Uma rede em fibra ótica é uma perturbação periódica do índice de refração ao longo do comprimento da fibra. A formação de redes permanentes em uma fibra ótica foi primeiramente demonstrada por HILL *et al* em 1978 [1], durante um experimento utilizando fibras de sílica dopadas com Germânio para estudo de efeitos não-lineares. A radiação de um laser de  $\text{Ar}^+$  (488 nm) era acoplada no interior de uma fibra e, depois de um prolongado tempo de exposição, foi verificado um incremento na atenuação desta luz na saída da fibra. Após essa observação, foi também verificado que a intensidade da luz refletida que retornava da fibra aumentava significativamente com o tempo de exposição. Esse incremento na refletividade era o resultado de uma rede permanente formada no interior da fibra por meio da modulação fotoinduzida no índice de refração do material. Esse efeito não-linear fotorrefrativo nas fibras óticas foi chamado de **fotosensibilidade**. Entretanto, essas redes operavam no comprimento de onda de escrita, na parte visível do espectro, sendo esta característica uma grande limitação para a aplicação nas telecomunicações.

Pesquisas esporádicas com relação a fotosensibilidade foram feitas até 1981, quando LAM e GARSIDE [2] mostraram que a magnitude da modulação fotoinduzida do índice de refração mudava com uma dependência quadrática com a potência da fonte de escrita (um laser de  $\text{Ar}^+$  em 488 nm). Isso sugeriu um processo de dois fótons como possível mecanismo

responsável pela mudança do índice de refração. Até aquele momento, a falta de interesse internacional na fotosensibilidade das fibras foi atribuída ao fato do fenômeno estar presente somente naquelas fibras especiais. As fibras utilizadas possuíam um pequeno diâmetro ( $\sim 2,2 \mu\text{m}$ ) e forte dopagem de Germânio ( $> 10 \text{ mol } \%$ ) no núcleo [3].

Aproximadamente uma década depois, STONE [3] observou que a fotosensibilidade ocorria em diversos tipos de fibras, desde que elas contivessem uma elevada concentração de Germânio (maior que  $8 \text{ mol } \%$ ). Um interesse renovado surgiu somente com a demonstração de uma nova técnica de escrita por MELTZ *et al* [4], cerca de 10 anos depois. A partir dessa descoberta, grupos de pesquisa do mundo inteiro têm buscado métodos de escrita ótica direta, visando obter redes com características adequadas a cada aplicação. Várias técnicas de gravação têm sido usadas para gravar as redes de Bragg como a interferométrica, máscara de fase, e ponto-a-ponto por meio da exposição da fibra à luz ultravioleta (UV) [5].

Em 1996, VENGSARKAR *et al* [6] demonstraram um novo tipo de rede foto-induzida em que o período da rede está na faixa entre  $100$  e  $700 \mu\text{m}$ . Essas redes são conhecidas como redes de período longo. Naquele trabalho, as redes foram escritas em fibras dopadas com Germânio e sensibilizadas numa atmosfera de Hidrogênio, utilizando um laser de KrF com comprimento de onda em  $248 \text{ nm}$  e uma máscara de amplitude. Após a gravação da rede, a fibra foi recozida por 4 horas numa temperatura de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  para estabilizar as propriedades óticas. As redes produzidas mostraram-se mais sensíveis a variações de parâmetros externos do que as FBG, com valores de sensibilidade à tensão longitudinal e à temperatura variando entre  $-0,7$  e  $1,5 \text{ nm/m}\epsilon$ , e de  $0,04$  a  $0,05 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , respectivamente. Os valores esperados de sensibilidade para as FBG com comprimento de onda de ressonância em  $1550 \text{ nm}$  são de aproximadamente  $1,2 \text{ nm/m}\epsilon$  e  $0,0137 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , para tensão longitudinal e temperatura, respectivamente.

As LPG foram inicialmente desenvolvidas para serem usadas como filtros de rejeição de banda [6] e têm sido usadas como equalizador de ganho de um amplificador a fibra dopada com Érbio [7]-[8]. Porém, as LPG apresentam algumas características ímpares como sensores a fibra ótica. Os comprimentos de onda de ressonância da LPG são criticamente dependentes da diferença entre o índice de refração efetivo do núcleo e da casca. Desse modo, qualquer variação causada por temperatura, tensão longitudinal ou alterações no índice de refração externo pode causar grandes deslocamentos do comprimento de onda na ressonância.

Outra característica interessante e única das LPG é a possibilidade de se conseguir valores de sensibilidade diferentes para um mesmo comprimento de onda, tanto para temperatura como para tensão longitudinal, por meio da alteração do período da rede e/ou do tipo de fibra. Isso possibilita a fabricação de sensores com respostas diferenciadas às variações do meio externo, mas que operam com a mesma fonte espectral. A resposta à temperatura e a tensão longitudinal podem ser tanto positivas como negativas, dependendo da resposta diferencial do núcleo e da casca [9]. Como sensores de índice de refração ou concentração de impurezas em fluidos [10]-[11], as LPG possuem a vantagem da manutenção da rigidez e integridade da fibra, o que não acontece quando se trabalha com dispositivos cuja casca é reduzida por corrosão para se ter acesso ao campo evanescente do modo guiado propagante [12], como é o caso das redes de Bragg. Conforme RATHJE *et al* [13] as LPG escritas com laser de Argônio dobrado em frequência ( $\lambda = 244$  nm) possuem sensibilidade dependente da curvatura. Um aumento no ângulo de curvatura deixa a profundidade da ressonância menor e aumenta sua largura de banda. Uma sensibilidade de aproximadamente 0,05 mrad/cm foi registrada, o que corresponde a uma curvatura de 200 m de raio.

A resposta da LPG à mudança de temperatura pode variar de 0,0007 nm/°C [14], para redes projetadas para serem insensíveis a variação deste parâmetro, até 0,80 nm/°C [15]

usando polímeros com resposta adequada à variação de temperatura, de maneira a aumentar a sensibilidade da rede a este parâmetro, colocados externamente a casca da fibra em forma de recobrimento. As respostas observadas para a tensão longitudinal estão na faixa de  $-0,7$  a  $1,5$  nm/m $\epsilon$  [6].

Um ponto interessante para a aplicação da LPG em sensores é que as respostas de duas bandas de ressonância de uma mesma LPG são geralmente diferentes, podendo-se fazer um sensor para múltiplos parâmetros [16]. Assim, um sensor para dois parâmetros pode usar um único elemento transdutor composto por duas ressonâncias de uma mesma LPG, ou dois ou mais elementos associando LPG com redes de Bragg.

Um exemplo de configuração para a determinação simultânea de temperatura e tensão longitudinal é o sensor híbrido FBG/LPG [17], mostrado na figura 1. O sensor consiste de três redes, uma LPG e duas FBG. A configuração do sensor usa as reflexões das duas FBG, com os comprimentos de onda centrais dados por  $\lambda_{b1}$  e  $\lambda_{b2}$ , para descobrir o deslocamento em comprimento de onda apresentado pela ressonância da LPG. O princípio de funcionamento é baseado na medida do deslocamento em comprimento de onda de uma FBG e na mudança de intensidade de  $R_1$  e  $R_2$ , que são monitorados usando um analisador de espectro ótico.

Uma vez que o sensor tenha sido calibrado, qualquer tensão longitudinal aplicada e temperatura podem ser simultaneamente determinadas pela medida de  $R_1$ ,  $R_2$ , do valor de  $\lambda_{b2}$ , e usando as calibrações conhecidas para resolver para a tensão longitudinal e temperaturas requeridas. Naquele sistema [17], o deslocamento observado no comprimento de onda da LPG foi sete vezes maior que o das FBG, enquanto que a resposta para a tensão longitudinal foi cerca da metade daquela das FBG.

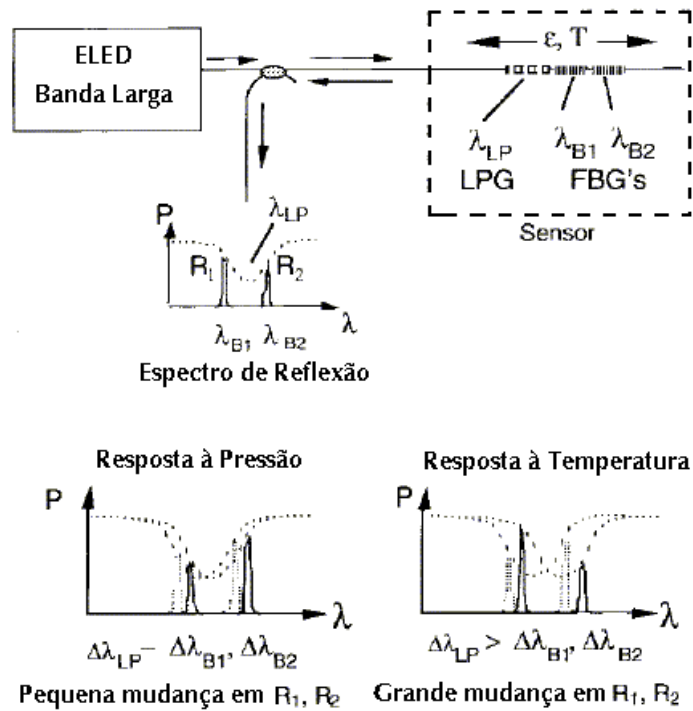


Figura 1 - Esquemático de um sensor híbrido FBG/LPG para medida simultânea de temperatura e tensão longitudinal [17].

Outro exemplo de medida de tensão longitudinal usa uma rede de período longo interrogando um sensor de tensão longitudinal de rede de Bragg [18]. As figuras 2 (a) e 2 (b) mostram os espectros de reflexão e de transmissão da FBG e LPG usadas no experimento, e a montagem experimental utilizada, respectivamente. A luz refletida pela FBG é transmitida pela rede de período longo. A intensidade da luz transmitida diminui (ou aumenta, dependendo de qual lado da rede de período longo está na filtragem) com o deslocamento em comprimento de onda da FBG pela variação de temperatura ou tensão longitudinal. Resultados com e sem modulação da luz são apresentados, sendo o maior valor de sensibilidade (variação de potência pela variação longitudinal de comprimento) obtido para o caso de detecção com sinal modulado. GUAN *et al* utilizaram uma FBG superestrutura e uma LPG para a medida simultânea de temperatura e tensão longitudinal [19].

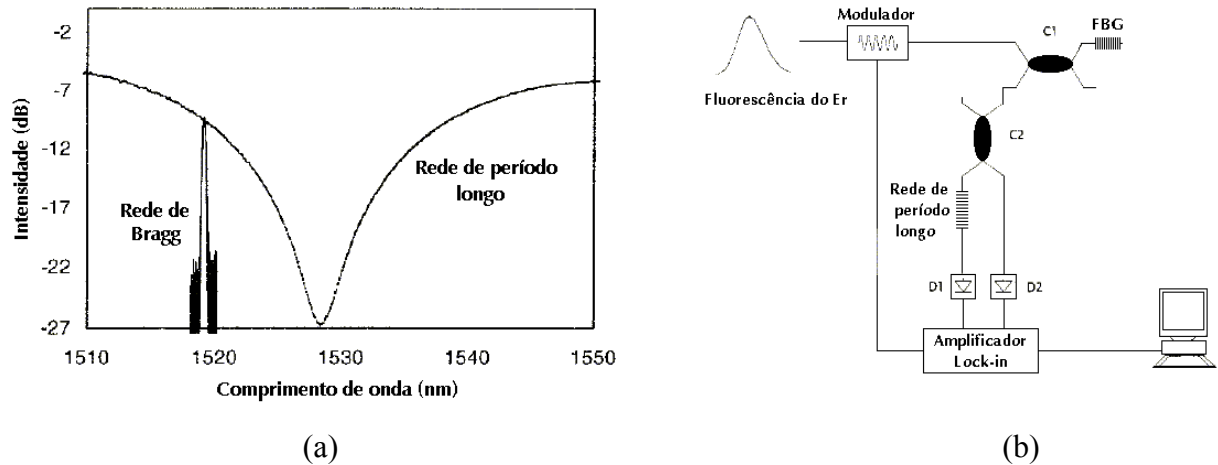


Figura 2 - (a) Espectro de reflexão e de transmissão das FBG e LPG e (b) montagem experimental para sensoriamento de tensão longitudinal usando uma LPG interrogando um sensor FBG [18].

Uma alternativa para a medida de tensão longitudinal independente da temperatura é fabricar LPG insensíveis a variação da temperatura. Respostas à temperatura tão reduzidas quanto  $0,0045 \text{ nm}^\circ\text{C}$  têm sido obtidas em fibras com perfil de índice de refração especialmente traçado [9],  $0,005 \text{ nm}^\circ\text{C}$  em fibras com núcleo co-dopado com boro [20], e  $-0,0018 \text{ nm}^\circ\text{C}$  pelo uso de redes de período mais curto ( $\Lambda = 40 \mu\text{m}$ ) numa fibra padrão [21]. Outra maneira de compensar a temperatura é com o uso de LPG com coeficiente negativo de tensão axial fixadas em placas de metal [22]. A maior sensibilidade a temperatura para essa montagem foi cerca de  $0,02 \text{ nm}^\circ\text{C}$ .

LIU *et al* [23] utilizaram uma LPG como sensor de carga mecânica, baseado na medida da birrefringência induzida por pressão transversal. Quando a pressão foi aplicada a LPG, cada pico de ressonância original se dividiu em dois sub-picos correspondendo aos estados de polarização ortogonais, sendo que houve um acréscimo na separação com o aumento da carga. Assim, a medida da separação espectral dos sub-picos de cada ressonância fornece uma medida ótica da carga transversal aplicada. A sensibilidade obtida foi de



500 nm·mm/kg. Até aquele momento o valor obtido para a sensibilidade era 800 vezes maior que aquele obtido com as FBG. Em outra medida feita por esse grupo [24], a separação da divisão de um modo de ressonância da LPG foi usada para medir a curvatura. Um valor de sensibilidade à curvatura de  $14 \text{ nm/m}^{-1}$  foi conseguido.

Uma medida simultânea de tensão longitudinal e curvatura, com pequena sensibilidade cruzada e compensação de temperatura, usando uma única rede de Bragg em fibra superestrutura foi demonstrada por GWANDU *et al* [25]. Nesse experimento são usadas uma FBG e uma LPG para a medida da tensão longitudinal e de curvatura, respectivamente.

As redes de período longo podem ser fabricadas por outros métodos além da exposição ao UV com uma máscara de amplitude. Dentre os possíveis métodos de gravação estão a corrosão controlada de estruturas periódicas (*etched corrugation structure*) [26], o uso de exposição à radiação próxima ao UV [27] ou à radiação gama [28], o de indução mecânica [29], o de exposição à radiação de um laser de CO<sub>2</sub> [30]-[32], e o de aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico [33]-[37].

As redes fabricadas com laser CO<sub>2</sub> são feitas pelo método de exposição ponto-a-ponto e têm a vantagem de apresentar tamanho reduzido, devido às mudanças de índice efetivo elevadas ( $\Delta n \approx 0,1$ ), deixando mais fácil o encapsulamento, além de não ser preciso o uso de fibras especiais [31], [32]. Esse método permitiu a obtenção de redes com eficiências de acoplamento de 99,6 % (23 dB de atenuação), largura de banda de 48 nm a 3 dB, e perda de inserção menor que 0,3 dB. A rede apresenta uma pequena sensibilidade à polarização devido à tensão induzida, as sensibilidades para temperatura e tensão longitudinal foram de  $0,068 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  e  $-1,2 \text{ nm/m}\epsilon$ , respectivamente [30]. As LPG fabricadas com CO<sub>2</sub> podem também ser projetadas para apresentarem pequena sensibilidade à temperatura. HAN *et al*

[33] obtiveram uma sensibilidade de  $0,002 \text{ nm}^\circ\text{C}$  obtida pela otimização das concentrações de dopantes  $\text{GeO}_2$  e  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Outro destaque para as redes feitas com laser de  $\text{CO}_2$  é a resistência térmica da rede em comparação com as redes convencionais fabricadas com a exposição ao UV e fibra dopada com Germânio. As redes termo-induzidas são estáveis a temperaturas maiores que  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , enquanto que as redes convencionais apresentam uma queda de 3 dB em aproximadamente  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  [34].

Vários tipos de fibras podem ser usadas para a fabricação de redes com arco elétrico. ENOMOTO *et al* [35] mostraram uma rede formada em fibra com núcleo de sílica pura e com relaxação residual de tensão, enquanto KARPOV *et al* fabricaram as redes em fibras com núcleo dopado com Nitrogênio [36]. No entanto, as redes formadas em fibras para telecomunicações [37] são as de maior interesse, principalmente pela não alteração do meio de propagação e pela facilidade para se fazer emendas, uma vez que se trata do mesmo tipo de fibra em cada extremidade. A rede apresentada por aquele grupo possuía 20 períodos de interação e 19 dB de atenuação, não sofrendo degradação espectral aparente para aquecimento até  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Desse modo, a gravação com arco elétrico tem duas grandes vantagens: não requer fibras especiais e nem equipamentos de custo elevado como, por exemplo, lasers. A caracterização e a simulação de redes de período longo fabricadas usando arco elétrico podem ser encontradas nas referências [38]-[39].

Obter um perfil desejado no espectro de transmissão de uma LPG pode ser difícil quando se dispõe de um número limitado de máscaras de amplitude para a gravação. Outro problema é o deslocamento em comprimento de onda dos picos de atenuação da rede durante o processo de escrita. No entanto, muitas vezes o controle de perfil é necessário, como no caso de filtros para WDM e equalização de ganho de amplificadores. Para contornar aqueles problemas, VASILIEV *et al* [40] mostraram que é possível realizar a sintonia dos picos de

atenuação pela redução do diâmetro da casca, mergulhando a fibra em ácido fluorídrico (HF). Esse método tem a vantagem de apresentar uma razoável independência entre a posição do pico e intensidade, mudança espectral induzida permanente, e sintonia dos picos controlada (pela mudança da concentração do HF). Mais tarde [41], foi discutido e verificado que as redes com a casca reduzida possuíam comprimentos de onda de ressonância mais sensíveis ao índice externo do que aquelas sem redução. YIN *et al* [42] mostraram uma LPG com a casca reduzida a aproximadamente 32  $\mu\text{m}$  que apresentou uma larga faixa espectral livre com um único pico de ressonância entre 700 e 1700 nm.

Outra maneira de controlar o perfil de redes de período longo em cascata é pelo uso de um mecanismo atuador piezoelétrico independente para cada rede. Esse mecanismo faz um controle preciso da deformação da curvatura na rede, alterando de maneira desejada o espectro de transmissão tanto na largura de banda e atenuação como no perfil espectral [43].

A sintonia e a modulação dos picos de ressonância da rede pode também ser obtida pelo recobrimento da rede com uma camada de metal. Esse recobrimento permite que a sintonia da rede seja feita eletricamente, através do aquecimento localizado da fibra, e a deixa insensível ao meio externo. Um deslocamento de 11 nm foi obtido com uma eficiência de sintonia de 16,4 nm/W e com poucas mudanças no perfil espectral da rede, com um tempo de resposta de 2 s para um filme de Ti/Pt [44]. Para o cobre, foi verificado um deslocamento no pico de ressonância de aproximadamente 4 nm e potência no resistor próxima de 0,5 W [45].

QUIAN e CHEN mostraram que o perfil do espectro de transmissão da LPG poderia ser controlado pela introdução de um deslocamento de fase na rede, obtido adicionando-se um comprimento de fibra sem perturbação no meio da rede, e aplicaram o método para equalizar uma fonte a fibra superfluorescente de sílica dopada com Érbio [46]. Na literatura são encontradas análises mais detalhadas de como simples [47] e múltiplos deslocamentos de fase

[48] gerados em várias localizações ao longo da LPG interferem no espectro de transmissão das redes de período longo. CHEN [49] mostrou numericamente que as mudanças de fase induzidas podem ser sintonizadas através do controle de uma porção de descontinuidade. Tal descontinuidade pode ser, por exemplo, uma variação localizada de temperatura, levando ao mesmo efeito que uma mudança de fase discreta. A vantagem desse método é ter um controle contínuo do deslocamento de fase.

Múltiplas LPG escritas em série ao longo de uma fibra foram usadas para produzir uma série de filtros corta-faixa de grande finesse [50]. O espectro de transmissão é controlado pela mudança da distância entre as redes e/ou a mudança no número total de redes em cascata. O espectro de transmissão de três LPG em cascata, com separações de 10 e 20 cm, apresentou 3,6 nm de faixa espectral livre e uma finesse de aproximadamente 5. LEE e NISHII [51] também conseguiram um espectro de transmissão senoidal com uma rede LPG que apresentava auto-interferência. Para fazer isso, ao invés de duas redes colocadas em série, eles utilizaram uma LPG e um refletor. Assim, a radiação passa duas vezes através da rede, sendo posteriormente medida. A separação das franjas foi de 4,4 nm e a sensibilidade à temperatura dessa LPG foi de aproximadamente  $0,055 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ , para a faixa entre 75 e  $145^{\circ}\text{C}$ . Outra proposta de filtros de isolamento para WDM usa redes de período longo com gorjeio (*chirp*) concatenadas [52].

GRUBSKY *et al* [53] estudaram o espectro de transmissão da LPG e perceberam que freqüentemente este era contaminado por ressonâncias não esperadas. Eles descobriram que algumas dessas ressonâncias adicionais eram causadas por harmônicos indesejados do período do modo fundamental, devido à grande quantidade de harmônicos contidos no perfil quase sempre retangular da modulação de índice de refração. Para solucionar esse problema, eles estudaram a resposta não-linear da fibra à radiação usada na escrita e então compensaram a

não linearidade com uma exposição otimizada, utilizando um microcomputador para calcular o perfil e fabricar a rede. Foram conseguidos espectros sem as ressonâncias causadas pelos harmônicos.

Outro estudo feito com relação ao espectro de transmissão de LPG em cascata foi apresentado por HARUMOTO *et al* [54]. Eles verificaram que, para fazer uma associação em série de LPG a fim de formar um espectro de transmissão final que seja o produto dos espectros de transmissão de cada rede, deve-se ter o cuidado de não as escrever muito próximas umas das outras, para não haver interação entre as redes. A interação ocorre porque o modo de casca da primeira rede acopla diretamente com a próxima rede, resultando num complicado espectro de transmissão. No caso de várias redes em pedaços de fibra que são emendados, a situação de produto dos espectros de transmissão é satisfeita, porque o modo de casca gerado perde potência na emenda.

Outra maneira de modificar o espectro de transmissão é através do controle da faixa espectral livre dos picos de ressonância nas LPG. Uma grande faixa espectral livre é um requisito necessário para os sistemas de comunicação com ganho de banda larga. JEONG *et al* [55]-[56] alcançaram esse objetivo modificando o material que compõe a casca da fibra, alterando, deste modo, a dispersão do material. Eles conseguiram isolar somente um pico de ressonância na faixa espectral entre 1200 e 2000 nm. A faixa espectral livre estimada foi de 400 nm.

STARODUBOV *et al* [57] sugeriram a associação de redes de período longo para formar um espectro de transmissão contendo picos passa-banda de comprimento de onda. Nesse experimento, eles utilizaram duas LPG, uma para acoplar a luz do núcleo para a casca da fibra e a outra para acoplar a radiação de casca novamente para o núcleo. Entre as duas redes foi usado um bloqueador de passagem de luz pelo núcleo, de modo que somente a luz

que sofreu acoplamento para a casca passasse para a outra rede. Assim, somente aqueles comprimentos de ressonância em comum com as duas redes podem ser visualizados. Um esquemático do dispositivo e seu espectro de transmissão estão mostrados nas figuras 3(a) e 3(b), respectivamente. Para modular a luz transmitida pelo dispositivo foi proposto fazer um contato mecânico na casca da fibra que está entre as duas LPG.

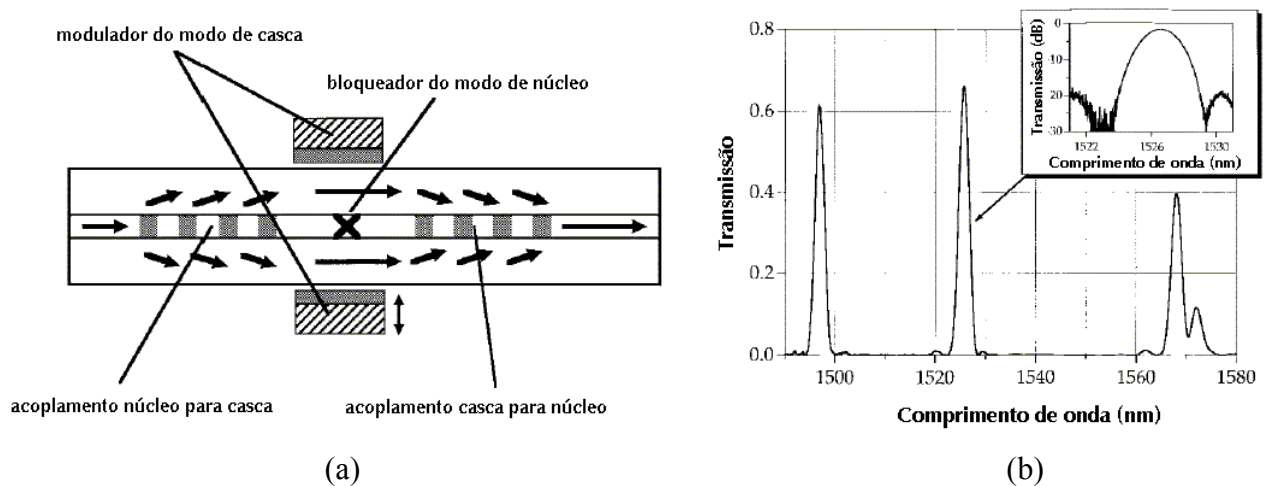


Figura 3 - (a) Esquema do filtro passabanda com LPG desenvolvido. O bloqueador no núcleo impede toda a luz que passa pelo núcleo. O modulador na casca controla a transmissão do dispositivo. (b) Medida do espectro de transmissão do filtro passa banda. O destaque é o espectro do pico central [57].

As redes de período longo podem ser feitas em fibras mantenedoras de polarização, tendo como espectro resultante uma divisão dos picos de atenuação [58]-[59]. Essa divisão corresponde a modos com diferentes polarizações, permitindo a fabricação de filtros de polarização seletivos em comprimento de onda. A separação entre os picos foi de 3,5 nm para uma fibra com birrefringência de aproximadamente  $1,3 \times 10^{-4}$  e período da rede de 200  $\mu\text{m}$  [58]; 10,5 nm para fibra dopada com Germânio e Boro e birrefringência de  $2,6 \times 10^{-5}$ ; e maior que 30 nm para birrefringência de  $1,2 \times 10^{-5}$ . O período dessas duas últimas redes foi de

300  $\mu\text{m}$  [59]. Uma extinção de aproximadamente 30 dB para os dois modos de polarização foi obtida quando a luz era alternadamente polarizada ao longo dos eixos de birrefringência, enquanto que a atenuação do modo de polarização não ressonante foi em torno de 0,5 dB [59]. A divisão dos picos de ressonância de uma LPG também é possível em fibras com baixa birrefringência e sem qualquer foto-sensibilização por meio da hidrogenação. Isso é devido à birrefringência foto-induzida nos locais onde a fibra foi exposta à radiação UV [60]. Além disso, a birrefringência foto-induzida pode atuar nas características de acoplamento da rede, de modo que a mesma não deve ser negligenciada na fabricação da LPG [61].

Outro tipo de fibra usada para formar LPG é a fibra micro-estruturada, contendo estruturas ocas dentro da casca. Essas estruturas podem ser preenchidas com um polímero adequado para aumentar a sensibilidade da rede à temperatura, e como elas estão posicionadas internamente à casca há uma maior proteção do polímero, evitando, por exemplo, que a umidade possa alterar suas propriedades. Uma comparação da sensibilidade para uma fibra com dispersão deslocada sem e com recobrimento de polímero sobre a casca e a micro-estruturada mostra que para a primeira, as sensibilidades foram de 0,05 e 0,80  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , e para a segunda, 0,03 e 0,74  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , para o ar e o polímero, respectivamente [15]. A fibra micro-estruturada é praticamente insensível à variação do índice externo quando o anel interno está preenchido com ar [62]. Isso possibilita o recobrimento da LPG sem alteração do espectro de transmissão, o que pode facilitar nos procedimentos de encapsulamento desse dispositivo. Outros tipos de fibras usadas para fazer as LPG são as fibras afiladas (*tapered fibers*) [63] e as fibras com casca rebaixada [64].

Assim como o polímero pode aumentar a sensibilidade da LPG [15], com a escolha apropriada do polímero consegue-se fazer com que sua variação do índice de refração com a temperatura compense a sensibilidade da rede a esta grandeza. JANG *et al* [14], ao usarem

esse procedimento, conseguiram controlar o deslocamento da banda de aproximadamente 5 nm para maiores valores de comprimento de onda com uma variação de temperatura de 100 °C, de uma fibra imersa no ar, para 0,07 nm/100 °C, quando o polímero é utilizado. As LPG fabricadas em fibras co-dopadas com Boro e Germânio também possuem aquela propriedade, podendo ser projetadas para serem insensíveis às variações de temperatura [33] ou altamente sensíveis a esta grandeza. Para obter a elevada sensibilidade, SHU *et al* [65] escolheram apropriadamente um modo de ressonância que apresentasse esta característica. O valor de sensibilidade que eles obtiveram foi de 1,6 nm/°C. Em outra publicação [66], eles relataram sensibilidades médias de 1,44 e 2,25 nm/°C, para as faixas de temperatura de 0 a 80 °C, e 0 a 10 °C, respectivamente. A compensação da temperatura pode também ser feita por curvatura [67], fixando a fibra sobre um material com coeficiente de dilatação térmica escolhido de modo que a curvatura gerada venha a compensar o deslocamento de temperatura do pico de ressonância da LPG. A sensibilidade obtida foi de aproximadamente 0,008 nm/°C e é mostrada a aplicação da rede como sensor de salinidade insensível à variação de temperatura.

Outro material usado para alterar a amplitude do pico de ressonância da LPG [68] ou aumentar a sensibilidade à temperatura [69] é o cristal líquido. Usando uma fibra com casca reduzida para aumentar a sensibilidade ao índice de refração do meio externo, e um cristal líquido com alto efeito termo-ótico e índice de refração próximo ao da casca, consegue-se sintonizar o pico de ressonância da rede pelo controle de temperatura do cristal líquido. A sintonia obtida foi de 2,1 nm/°C. Outra aplicação do cristal líquido proposta por YIN *et al* [70] é a sintonia óptica da LPG. Nesse caso, uma fibra com casca reduzida e um cristal líquido sensível à polarização foram usados para sintonizar a resposta da LPG.



O uso de LPG para formar um interferômetro Mach-Zehnder, e a verificação de seu comportamento com relação à variação do índice para o caso de guiamento fraco foi mostrado por DUHEM *et al* [71]. O artigo faz um estudo teórico e experimental, mostrando que o interferômetro aumenta a sensibilidade ao índice de refração externo, seja ele maior ou menor que o da sílica.

SHU *et al* [72] mostraram a fabricação de redes de período ultralongo, acima de vários milímetros, gravadas com radiação UV. A característica dessas redes é que o espectro de transmissão mostra os acoplamentos do modo de núcleo para o modo de casca fundamental, mais as ordens harmônicas. O grande período deixa a fabricação dessas redes mais fácil, com uma conseqüente redução no custo. Além disso, elas oferecem funcionalidades adicionais no processamento de sinal ótico e sensoriamento por causa dos modos harmônicos. Por exemplo, pode-se usar picos ressonantes de diferentes ordens de difração para realizar medidas simultâneas de dois parâmetros. A caracterização para a temperatura foi efetuada e mostra que, para o mesmo modo de casca LP<sub>01</sub> e diferentes ordens de difração, a faixa de variação para a sensibilidade de temperatura está entre  $-0,303$  e  $-0,298$  nm/°C.

Paralelamente ao desenvolvimento das técnicas de monitoramento, foram sugeridas várias aplicações para as LPG. Um dos locais de utilização das redes como sensor de carga [73] e curvatura [74] seria no controle e análise estrutural. Outra aplicação é a realização de acoplamento entre fibras monomodo usando uma fibra com a extremidade em formato de lente e uma LPG logo em seguida a esta lente [75]. Esse esquema permite uma maior eficiência de acoplamento sobre distâncias de trabalho longas do que aquela obtida sem o uso de LPG, além da grande tolerância transversal. A vantagem desse dispositivo é a facilidade no processo de encapsulamento e a redução da reflexão ótica na extremidade da fibra.

Outra aplicação das LPG é como sensor de índice de refração ou de concentração [76]. SHU *et al* usaram a LPG como sensor de concentração de álcool na água [77] e cana de açúcar na água [78]. Outra aplicação interessante em refinarias de óleos é a detecção de pequenas mudanças em fluidos binários. ALLSOP *et al* [79] utilizaram o sensor de LPG para detectar pequenas variações na concentração de um composto aromático orgânico numa solução de parafina. O mínimo de mudança detectável na concentração volumétrica de um fluido binário foi de 0,4 %. A sensibilidade à variação do meio pode ser utilizada para detectar a presença ou não de um material. O uso dessa resposta binária foi empregado para verificar se um molde estava sendo corretamente preenchido ou não [80]. A importância de se usar uma rede em fibra nesses experimentos reside no fato dela fornecer um meio não invasivo de obter informação em tempo real do preenchimento do molde, abrindo a possibilidade de tomada de decisão da continuidade ou não do processo, evitando muitas vezes desperdício de material ou sobras.

Outro uso de LPG como sensor de meio circunvizinho é na indústria aeroespacial [81]. Nesse caso as redes são usadas para evitar a corrosão, pela detecção da presença de cátions e da entrada e saída da água nas aeronaves. Com esse procedimento pode-se reduzir os custos de manutenção das aeronaves, uma vez que a corrosão é detectada antes da integridade estrutural estar comprometida.

As LPG podem também atuar como compensadores de dispersão [82] ou na medida de dispersão [83]. Como compensador, foi mostrado que as redes podem atuar com valores de dispersão altos com razoável razão de compreensão de pulso e negligenciável ondulação de atraso. Além da característica mostrada, outro destaque é que o filtro proposto trabalha na transmissão, evitando o uso de circuladores óticos de alto custo e a complexidade das redes com gorjeio (*chirp*), facilitando sua implementação em enlaces de comunicação ótica.

## CAPÍTULO 3

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 FIBRA ÓTICA

Em sua forma mais simples, uma fibra ótica consiste em um núcleo cilíndrico de vidro de sílica envolvido por uma casca cujo índice de refração é menor do que aquele do núcleo [84]. Existem vários tipos de perfil de índice de refração que podem ser usados em fibra. No entanto, o mais simples é o **perfil de índice degrau**, cujo nome é por causa da abrupta mudança no índice de refração na interface núcleo-casca [84]. A figura 4 mostra esquematicamente o perfil de índice e a seção transversal desse tipo de fibra.

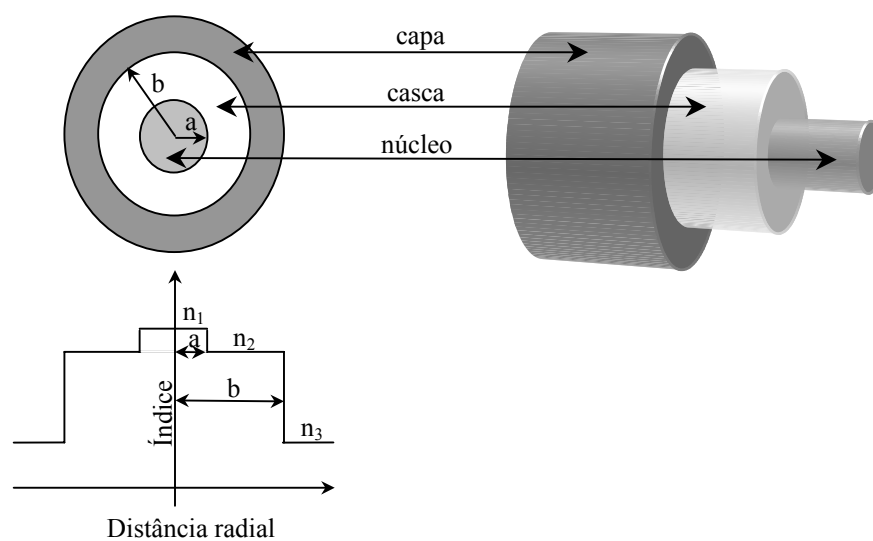


Figura 4 - Seção transversal e perfil de índice de refração degrau para uma fibra ótica.

### 3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS

Como qualquer fenômeno eletromagnético, a propagação do campo ótico em fibras é governada pelas equações de Maxwell. Para um meio não condutor e sem cargas livres, essas equações tomam a forma [84]:

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

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

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

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

onde  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  são os vetores campo elétrico e magnético, respectivamente, e  $\vec{D}$  e  $\vec{B}$  são as correspondentes densidades de fluxo. Para esse caso,  $\vec{D}$  e  $\vec{B}$  são dados por [85]

$$\vec{D} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (5)$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_r \mu_0} \quad (6)$$

onde  $\epsilon_r$  e  $\epsilon_0$  são a permissividade relativa do material e a permissividade no espaço livre, e  $\mu_r$  e  $\mu_0$  são a permeabilidade relativa do material e a permeabilidade no espaço livre, respectivamente. Resolvendo a equação para uma única variável,  $\vec{E}$  ou  $\vec{H}$ , e fazendo  $\psi$  representar uma destas variáveis, chega-se à seguinte equação de onda em coordenadas cilíndricas  $(r, \phi, z)$ , para uma onda propagando-se ao longo do eixo  $z$  [85]:

$$\nabla^2 \psi - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

Nessa equação,  $c = (\epsilon_0\mu_0)^{-1/2}$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $n = (\epsilon_r\mu_r)^{1/2}$  é o índice de refração do material.

### 3.3 MODOS DE PROPAGAÇÃO EM FIBRAS

O conceito de modo é um conceito geral na ótica. Um modo ótico refere-se a uma solução específica da equação de onda (7), que satisfaz as condições de contorno adequadas, e que tem a propriedade de possuir uma distribuição espacial que não é alterada com a propagação [84].

Resolvendo a equação de onda para a fibra ótica de índice degrau, chega-se a seis componentes de campo para a região do núcleo e seis para a região da casca. Essas componentes são  $E_z$ ,  $H_z$ ,  $E_r$ ,  $H_r$ ,  $E_\phi$  e  $H_\phi$ , sendo que as quatro últimas componentes podem ser expressas em termo das duas primeiras, para as duas regiões. Ao aplicar as condições de contorno apropriadas para a interface núcleo-casca, obtém-se a seguinte equação de autovalor [84]:

$$\left[ \frac{J'_v(\kappa a)}{\kappa J_v(\kappa a)} + \frac{K'_v(\gamma a)}{\gamma K_v(\gamma a)} \right] \left[ \frac{J'_v(\kappa a)}{\kappa J_v(\kappa a)} + \frac{n_2^2}{n_1^2} \frac{K'_v(\gamma a)}{\gamma K_v(\gamma a)} \right] = \left[ \frac{2v\beta(n_1 - n_2)}{a\kappa^2\gamma^2} \right]^2 \quad (8)$$

onde  $J_v$  e  $K_v$  são respectivamente as funções de Bessel e de Hankel modificada [85],  $v$  é um número inteiro,  $\beta$  é a constante de propagação,  $a$  é o raio do núcleo,  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do núcleo e da casca, respectivamente. Os termos com o símbolo “ ‘ ” indicam a diferenciação com respeito ao argumento, e as constantes  $\kappa$ ,  $\gamma$  são dadas por

$$\kappa^2 = n_1^2 k_0^2 - \beta^2 \quad \text{e} \quad \gamma^2 = \beta^2 - n_2^2 k_0^2 \quad (9)$$

onde,  $k_0 = \omega/c = 2\pi/\lambda$ , é o número de onda no espaço livre, e  $\lambda$  é o comprimento de onda no vácuo do campo ótico oscilando na frequência  $\omega$ .

Para um dado conjunto de parâmetros  $k_0$ ,  $a$ ,  $n_1$  e  $n_2$ , a equação de autovalor (8) pode ser resolvida numericamente para determinar a constante de propagação  $\beta$ . Em geral, essa equação pode ter múltiplas soluções para cada valor inteiro de  $v$ . Desse modo, é costume enumerar essas soluções em ordem decendente e denominá-las por  $\beta_{v\eta}$  para um dado  $v$  ( $\eta = 1, 2, \dots$ ). Cada valor de  $\beta_{v\eta}$  corresponde a um modo possível de propagação, tendo a distribuição de campo dada pelas equações de  $E_z$ ,  $H_z$ ,  $E_r$ ,  $H_r$ ,  $E_\phi$  e  $H_\phi$ .

Geralmente tanto  $E_z$  como  $H_z$  são diferentes de zero (exceto para  $v = 0$ ), portanto, os modos de fibras são referenciados como modos híbridos e são denotados por  $HE_{v\eta}$  ou  $EH_{v\eta}$ , dependendo se é  $H_z$  ou  $E_z$  o termo dominante nos campos transversais. No caso especial em que  $v = 0$ ,  $HE_{0\eta}$  e  $EH_{0\eta}$  são também descritos por  $TE_{0\eta}$  e  $TM_{0\eta}$ , respectivamente, uma vez que eles correspondem aos modos de propagação transversal elétrico ( $E_z = 0$ ) e transversal magnético ( $H_z = 0$ ). Uma notação diferente,  $LP_{v\eta}$ , é também usada na aproximação de guiamento fraco  $n_1 - n_2 \ll n_1$ , em que tanto  $E_z$  quanto  $H_z$  são próximos de zero [84]. Nesse caso,  $LP_{v\eta}$  denota os modos linearmente polarizados que são as soluções aproximadas de (7), e nesta notação o modo  $HE_{1\eta}$  corresponde ao  $LP_{0\eta}$  [85].

### 3.4 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DAS REDES EM FIBRAS

Uma rede em fibra é uma modulação periódica no índice de refração do núcleo de uma fibra ótica que satisfaz uma condição de casamento de fase entre um modo guiado e os outros modos, sejam eles de núcleo, de casca ou de radiação. Essa condição de casamento de fase é dependente do comprimento de onda e é dada por [10]:

$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (10)$$

onde  $\Lambda$  é o período da rede,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são as constantes de propagação dos modos que estão sendo acoplados, e  $\Delta\beta$  é a diferença entre as constantes de propagação. Para as redes de reflexão ou redes de Bragg convencionais o modo  $LP_{01}$  co-propagante ( $\beta_1 = \beta_{01}$ ) acopla para o modo  $LP_{01}$  contra-propagante ( $\beta_2 = -\beta_{01}$ ). Nesse caso, uma vez que  $\Delta\beta$  é grande, o período da rede é pequeno, tipicamente menor que  $1 \mu\text{m}$ . As redes de período longo acoplam o modo fundamental do núcleo para modos de casca co-propagantes discretos e circularmente simétricos de ordem  $m$  ( $\beta_2 = \beta_{cl}^{(m)} > 0$ ), resultando em períodos para a formação da rede na faixa de dezenas a centenas de micrometros. O comprimento de onda de ressonância aumenta com  $m$ .

Os modos considerados para  $\beta_2$  nas LPG, para simplificação das equações, são aqueles azimutalmente simétricos. Admite-se que a rede possui uma modulação de índice puramente retangular ao longo da fibra e uma estrutura periódica de índice de refração que é perpendicular ao eixo da fibra, isto é, redes sem inclinações. Assim, como um resultado das condições de superposição modal, é verificado que o modo guiado fundamental pode somente acoplar para aqueles modos de casca que são simétricos com relação ao eixo-z e apresentam máxima amplitude de campo no centro da fibra,  $r = 0$  [6], [10].

Outra forma de escrever a condição de casamento de fase de uma rede em fibra, de modo a relacionar índices efetivos do núcleo e da casca ao invés das constantes de propagação, é obtida substituindo na equação (10) os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$  por  $2\pi n_{\text{eff\_co}}/\lambda$  e  $2\pi n_{\text{eff\_cl}}^m/\lambda$  [6], chegando-se à seguinte equação [7]:

$$\lambda_m = [n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m] \Lambda \quad (11)$$

onde  $\lambda_m$  é o comprimento de onda de ressonância correspondente ao  $m$ -ésimo modo de casca, e  $n_{\text{eff\_co}}$  e  $n_{\text{eff\_cl}}^m$  são os índices de refração efetivos do modo de núcleo e do  $m$ -ésimo modo de casca, respectivamente. O índice de refração efetivo é dado por  $\beta/k$  e define o índice de refração para cada modo de propagação, onde  $\beta$  é a constante de propagação do  $m$ -ésimo modo e  $k=2\pi/\lambda_m$ .

A figura 5 mostra alguns diagramas que ilustram a condição de casamento de fase necessária para o acoplamento ressonante entre dois modos de uma rede com período  $\Lambda$ . O eixo horizontal faz referência a constante de propagação ( $\beta$ ), sendo que o lado esquerdo do eixo ( $-\beta$ ) implica em modos viajando no sentido negativo de  $z$ , o eixo de propagação. No eixo vertical está a variação em comprimento de onda, indicado pela seta lateral. Os círculos cheios representam os modos de núcleo, com  $n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$ ; os círculos abertos representam os modos de casca, com  $n_3 < n_{\text{eff}} < n_2$ , onde  $n_3$  representa o índice de refração do material externo à casca; as regiões hachuradas representam os modos de radiação contínuos com  $n_{\text{eff}} < n_3$ . Nesse caso, foi adotada a notação  $n_{\text{eff}}$  para o índice efetivo de qualquer tipo de modo. Os eixos de (a) a (d) exemplificam o funcionamento de uma rede de reflexão. Os dois superiores, (a) e (b), representam o acoplamento do modo de núcleo de menor ordem co-propagante para o modo de núcleo de mesma ordem contra-propagante, e para o modo de



núcleo de maior ordem contra-propagante, respectivamente. Os dois eixos inferiores, (c) e (d), mostram o acoplamento do modo de núcleo de menor ordem co-propagante para o modo de casca contra-propagante, e para os modos de radiação, respectivamente. Os eixos de (e) a (g) mostram os acoplamentos co-propagantes entre o modo de núcleo de menor ordem e os modos de radiação (eixo (e)); o modo de núcleo de menor ordem e o de casca de maior ordem (eixo (f)); e o modo de núcleo de menor ordem e o de casca de menor ordem (eixo (g)). O eixo (h) mostra o acoplamento do modo de núcleo de menor ordem para o modo de núcleo de maior ordem. Nota-se que essas interações são casamentos de fase para modos com comprimentos de onda sucessivamente menores, confirmando que o comprimento de onda de ressonância aumenta com o aumento da ordem do modo de casca [86].

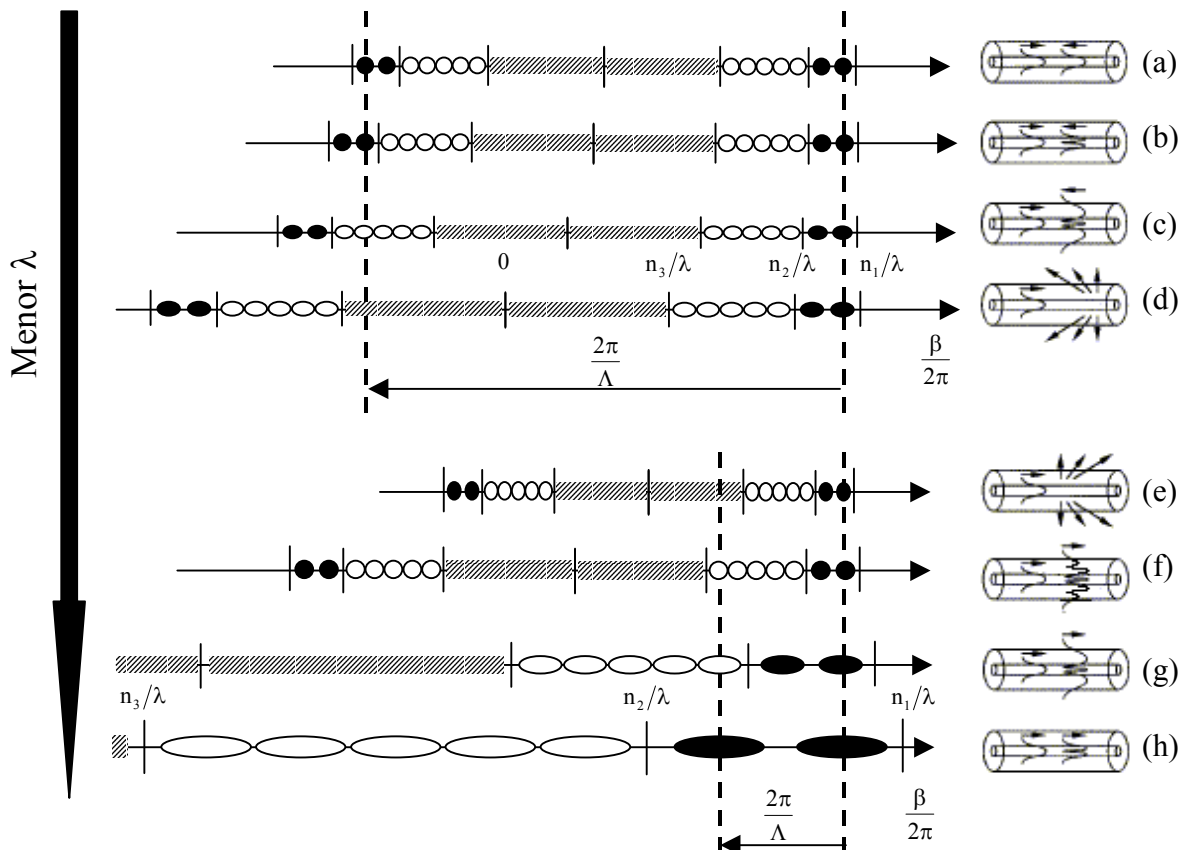


Figura 5 - Diagramas que ilustram as condições de casamento de fase necessárias para ocorrer ressonância entre dois modos por um período da rede de  $\Lambda$ . As figuras de (a)-(e) e (g)-(h) foram retiradas de [86].

A existência de um conjunto de picos de atenuação em diferentes comprimentos de onda no espectro de transmissão das redes de período longo pode ser visualizada nos eixos (f) e (g) da figura 5. Esses eixos mostram, de maneira simples, que de acordo com a característica de dispersão do material da fibra e periodicidade  $\Lambda$ , pode-se induzir o acoplamento modal entre um modo guiado fundamental e diferentes modos de casca. Uma vez na casca a luz decai rapidamente devido às perdas na interface casca-meio externo e às curvaturas na fibra, deixando uma série de bandas de atenuação ou ressonâncias no modo guiado, que podem ser visualizadas no espectro de transmissão na saída da fibra [73].

### 3.5 SENSIBILIDADE DAS REDES DE PERÍODO LONGO AO MEIO EXTERNO

A mudança no espectro de uma LPG como resultado de alterações no meio externo pode ser entendida considerando a condição de acoplamento entre o modo de núcleo e os modos de casca co-propagantes, equação (11), com a sensibilidade sendo principalmente função da mudança diferencial induzida entre os dois modos.

O valor de  $n_{\text{eff\_co}}$  é dependente dos índices de refração do núcleo e da casca, enquanto que  $n_{\text{eff\_cl}}^m$  é dependente dos índices do núcleo, da casca e do meio externo [87]. Nessas condições, uma aplicação direta da LPG em sensores é como sensor de índice de refração ou concentração de fluidos. Uma alteração no índice de refração do meio externo irá produzir uma mudança no  $n_{\text{eff\_cl}}^m$ , enquanto que o  $n_{\text{eff\_co}}$  permanece constante. Como aconteceu uma variação na diferença entre índices efetivos, e considerando que não houve mudança no período da rede, o comprimento de onda de ressonância será alterado, para novamente

satisfazer a condição de casamento de fase. Assim, a evolução do pico de ressonância da rede com a variação do índice de refração possibilita sua utilização em sensoriamento. As bandas de atenuação que correspondem ao acoplamento para modos de casca de menor ordem, mais confinados na casca, são menos sensíveis às variações de índice de refração do meio externo à fibra, tanto para índices de refração menores que o do vidro quanto para valores maiores [11].

A análise da sensibilidade da rede à variação de temperatura é feita diferenciando-se a equação (11) com respeito à temperatura T. A relação para a dependência do pico de ressonância com a temperatura é dada por [87]:

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m)}{dT} \right] + (n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m) \left( \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (12)$$

Da equação (12), verifica-se dois fatores que afetam a sensibilidade da rede, deslocando o comprimento de onda com a variação da temperatura. O primeiro é produzido pela mudança nos índices efetivos devido à dependência do índice de refração do material com a temperatura (relacionado ao efeito termo-ótico), e o segundo é a alteração na periodicidade da rede devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra. Os coeficientes de expansão térmica  $\alpha_{\text{Term}}$  e o coeficiente termo-ótico  $\alpha_{\text{TO}}$  são dados por [22]:

$$\alpha_{\text{Term}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (13)$$

$$\alpha_{\text{TO}} = \frac{1}{n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m} \frac{d(n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m)}{dT} \quad (14)$$

O coeficiente termo-ótico da fibra não é uma constante e está relacionado com o período da rede e a ordem do modo de casca acoplado. Seu valor geralmente está entre 2,0 e  $4,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para redes escritas em fibras monomodo padrão (Corning SMF-28) [22]. Como

o coeficiente de expansão térmica da sílica fundida é muito pequeno (aproximadamente  $0,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) [69] em relação ao termo-ótico,  $\alpha_{\text{Term}}$  pode ser muitas vezes ignorado. Como resultado, a sensibilidade da rede será principalmente determinada pela mudança do índice de refração do núcleo e da casca com a variação de temperatura.

As alterações na periodicidade espacial  $\Lambda$  podem também ocorrer por deformações mecânicas, acarretando mudanças no comprimento de onda de ressonância,  $\lambda_m$ . Essas mudanças são obtidas pela diferenciação da equação (11) com respeito à deformação,  $l$ :

$$\frac{d\lambda_m}{dl} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m)}{dl} \right] + (n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m) \left( \frac{d\Lambda}{dl} \right) \quad (15)$$

onde o primeiro termo da equação é a mudança induzida no índice de refração pela deformação da fibra (efeito foto-elástico), e o segundo termo é a alteração da periodicidade da rede como resultado da deformação elástica da fibra [88]. Para as redes escritas em fibras monomodo padrão (Corning), o coeficiente de pressão ( $1+p$ ), onde  $p$  é dado por:

$$p = \frac{1}{n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m} \frac{d(n_{\text{eff\_co}} - n_{\text{eff\_cl}}^m)}{dl} \quad (16)$$

é negativo e tem uma pequena variação (cerca de  $-0,5$  a  $-0,7$ ) com o período da rede e a ordem do modo de casca acoplado [22].

Uma vez que diversos parâmetros externos podem influenciar simultaneamente no espectro de ressonâncias da rede, a medida de cada parâmetro só pode ser realizada utilizando-se simultaneamente dois sensores a fibra cujas repostas aos efeitos são diferentes [5], ou então usar dois comprimentos de ressonância de uma mesma LPG com repostas diferentes às grandezas que estão sendo medidas.

### 3.6 TÉCNICAS DE ESCRITA DAS REDES DE PERÍODO LONGO

Embora numerosas e interessantes técnicas tenham sido relatadas na literatura para a fabricação das LPG, os métodos de escrita direta por bombeamento UV ponto-a-ponto e com o uso da máscara de amplitude são os mais amplamente usados devido à confiabilidade. No entanto, esses métodos de gravação necessitam geralmente de fibras que se tornaram sensíveis à radiação UV devido à adição de dopantes em sua composição, ou de fibras que sofreram algum processo de sensibilização, como por exemplo, a hidrogenação. Além da utilização do bombeamento UV para a gravação das redes de período longo, foram introduzidas outras fontes de escrita como o arco elétrico e o laser de CO<sub>2</sub>.

#### 3.6.1 Técnicas de fabricação ponto-a-ponto e máscara de amplitude

Um diagrama esquemático da montagem experimental para a fabricação de LPG usando um feixe UV é mostrado na figura 6. A montagem pode ser alternada entre o método ponto-a-ponto e o método com a máscara de amplitude. No primeiro é usado um obturador controlado por computador, e um sistema composto por um telescópio e uma lente objetiva, que é responsável pela redução do diâmetro do feixe. Para o segundo método, somente uma máscara de amplitude é colocada na frente da fibra, sem a presença da lente objetiva e da ótica para a redução do diâmetro do feixe (telescópio) [89].

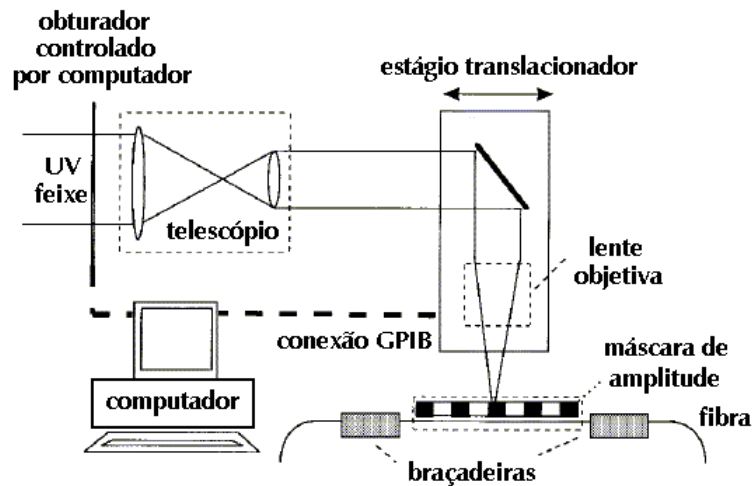


Figura 6 - Montagem experimental de fabricação de LPG, alternável entre o método ponto-a-ponto e máscara de amplitude [89].

No processo de escrita ponto-a-ponto, o feixe UV é focalizado, tendo um diâmetro da ordem de décimos de micrometro, para garantir uma alta resolução espacial. A exposição periódica é realizada pelo obturador controlado por computador, acionado com frequência adequada para o período e perfil espectral desejados. O mesmo computador realiza o deslocamento do estágio translacionador por um período,  $\Lambda$ , após cada exposição. Uma característica atraente dessa técnica é a grande flexibilidade que ela oferece, uma vez que uma rede de período e comprimento arbitrários pode ser facilmente escrita pelo ajuste adequado do obturador e do estágio translacionador [89]. Essa técnica exige um sistema preciso de translação da fibra, além de um tempo maior de fabricação. Além disso, deve-se ter um sistema que controle os erros no espaçamento da rede devido a efeitos térmicos ou a tensões mecânicas na fibra [90].

O processo de escrita realizado com máscara de amplitude para LPG é similar ao processo de escrita com máscara de fase para FBG. Nos dois casos um feixe UV atravessa a máscara e produz uma modulação de índice de refração na fibra. Existe, porém, uma diferença

fundamental entre eles. Na modulação de índice induzida por máscara de amplitude há uma reprodução direta do padrão da máscara, não havendo necessidade da interferência entre os feixes para a gravação. Assim, o período de uma LPG é o mesmo da máscara, enquanto que a periodicidade de uma FBG é a metade daquela da máscara de fase, com um padrão de franjas resultante da interferência entre as ordens de difração  $\pm 1$  da máscara de fase. Apesar da restrição de ser necessária uma máscara diferente para cada LPG, essa técnica oferece maior precisão na resposta espectral quando comparado com o método ponto-a-ponto, o que é um fator crítico para a fabricação de alguns dispositivos, como por exemplo, LPG em cascata [89].

### 3.6.2 Técnicas de fabricação com laser de CO<sub>2</sub> e por arco elétrico

As técnicas de fabricação com laser de CO<sub>2</sub> e por arco elétrico são variações da técnica de escrita ponto-a-ponto com o emprego de laser UV. Entretanto, os mecanismos de formação da rede são diferentes. Isso porque o efeito foto-refrativo, causado pela ação da luz UV sobre os elementos dopantes foto-sensíveis contidos no material da fibra, não ocorre quando se utiliza radiação infravermelha ou arco elétrico. Existem três propostas para explicar as alterações de índice de refração nas redes feitas com o uso de laser de CO<sub>2</sub> e do arco elétrico: a mudança no diâmetro da fibra, a difusão de dopantes, e uma mudança das propriedades do vidro pelo processo de rápido aquecimento e resfriamento local [38].

O sistema experimental usado para a gravação de LPG com o uso de um laser de CO<sub>2</sub> é semelhante ao utilizado na técnica ponto-a-ponto com laser UV, figura 7. O feixe do laser

de  $\text{CO}_2$  é focalizado para aquecer a fibra com núcleo de sílica pura até a temperatura na qual há uma relaxação da tensão residual do núcleo. A fibra ótica é presa ao estágio motorizado através de braçadeiras, e após exposição da fibra um controlador faz o deslocamento do estágio motorizado por um valor igual ao do período  $\Lambda$  da rede [91].

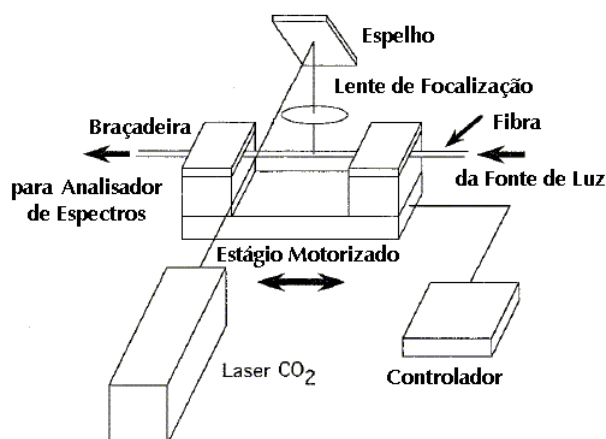


Figura 7 - Montagem experimental para gravação de LPG com laser de  $\text{CO}_2$  [91].

Para o caso de gravação com arco elétrico, o processo de fabricação consiste em posicionar uma fibra sem capa entre os eletrodos de uma máquina de emendas. Uma das extremidades da fibra é presa num estágio translacionador de precisão controlado por computador e à outra extremidade é fixada uma massa para manter a fibra sob tensão longitudinal constante. Uma descarga elétrica é então produzida com corrente e duração temporal adequadas, e em seguida a fibra é deslocada por um comprimento igual ao período da rede. Esse procedimento é repetido várias vezes, originando perturbações periódicas ao longo da fibra resultantes do seu aquecimento local. Um esquema de montagem para esse método de gravação está mostrado na figura 8.



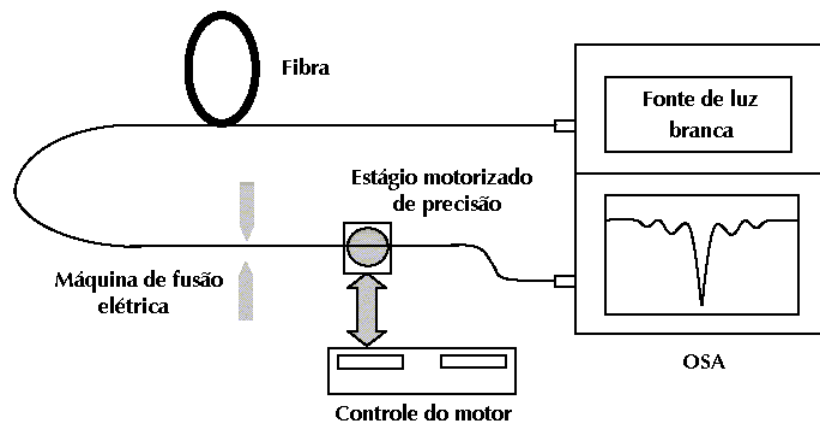


Figura 8 - Esquemático da montagem para a fabricação de redes de período longo usando descarga de arco elétrico [39].

Os três modelos principais que buscam explicar as mudanças de índice de refração nessas redes foram propostos e analisados por REGO *et al* [38]. No entanto, foi verificado que embora a difusão de dopantes para fora do núcleo da fibra não possa ser totalmente excluída, este processo tem pouca colaboração na formação da rede. Isso foi justificado pela capacidade de escrever, com condições similares de arco, redes com espectros e condutas térmicas semelhantes, mesmo em fibras com dopantes diferentes no núcleo (Ge, S e N). Buscando investigar o efeito da mudança do diâmetro da fibra nas alterações de índice de refração nas redes, foi observado que uma maior redução do diâmetro da fibra era conseguida com o aumento da tensão axial da mesma. Isso foi obtido prendendo uma massa em uma das suas extremidades e deixando-a suspensa. No entanto, redes de alta qualidade foram feitas mesmo quando uma pequena tensão era aplicada, indicando que a mudança no diâmetro não é o fator determinante para a mudança de índice de refração. Desse modo, como os dois primeiros fatores contribuem pouco para a formação da rede, acredita-se que o rápido aquecimento e resfriamento local sejam o fator mais importante na escrita. Esse processo recoze periodicamente forças residuais, cria novos pontos de tensão na fibra, e resulta numa mudança

de índice de refração. Além disso, desde que o processo tenha mais que 1000 °C/s de taxa de resfriamento, ele deve resultar numa mudança de temperatura fictícia  $T_f$  [92], [93] e [94] do vidro na região da fibra exposta ao arco. A mudança em  $T_f$  resulta, por sua vez, numa mudança da densidade do vidro, viscosidade, índice de refração e espalhamento Rayleigh. Assim, essas possíveis mudanças nas propriedades dos vidros, criadas pelo rápido e local aquecimento e resfriamento da fibra, seriam as principais razões para as mudanças de índice de refração em tais redes.

## CAPÍTULO 4

### 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

#### 4.1 SISTEMA DE LEITURA DE REDES EM FIBRAS

As características das redes em fibras são muito sensíveis aos parâmetros geométricos e de constituição da fibra, ao processo de fabricação e às condições ambientais, tanto durante a fabricação quanto durante seu uso. Como muitos dos parâmetros da fibra, necessários para se fazer uma simulação ou um cálculo aproximado da resposta espectral da rede são difíceis de conseguir, e o processo de fabricação pode sofrer modificações durante o seu desenvolvimento, o primeiro requisito para se fabricar redes em fibra é obter um sistema de leitura da rede capaz de trabalhar em uma ampla faixa espectral, facilitando a sua detecção em comparação a um sistema com uma estreita faixa de leitura.

O sistema desenvolvido no laboratório para a aquisição de espectros de transmissão das redes na região espectral do infravermelho está esquematizado na figura 9. Tal sistema utiliza a luz de uma lâmpada halógena de 50 W, focalizada sobre a fenda de entrada do monocromador (modelo 9050 da Sciencetech). O feixe de luz que atravessa o monocromador é modulado por um *chopper* e acoplado a fibra com uma lente objetiva de 40x. Após a passagem pela fibra, o feixe de luz é novamente focalizado com uma lente objetiva de 40x

num detector de InGaAs (Thorlabs), e o sinal é processado por um amplificador diferencial *lock-in* (modelo SR830 da Stanford Research Systems). Todo o sistema de aquisição é controlado por um microcomputador [95].

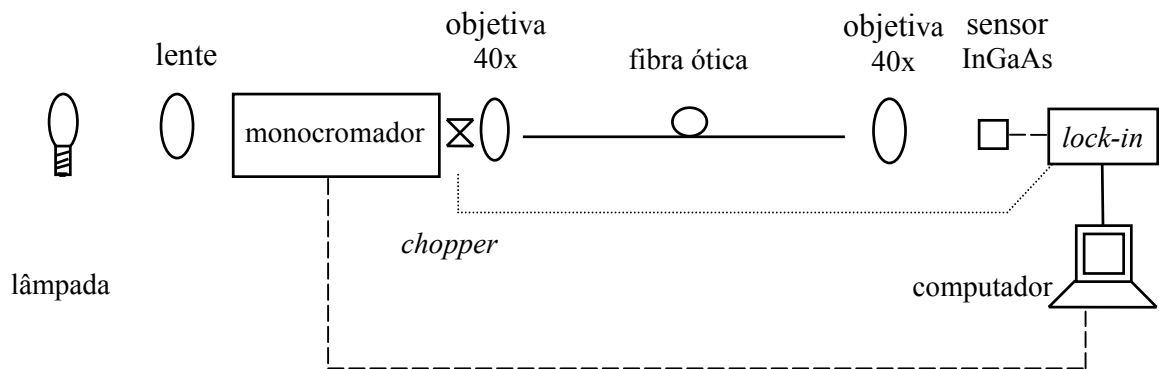


Figura 9 - Sistema de leitura de espectros no infravermelho.

A figura 10 mostra os espectros de transmissão da fibra monomodo padrão da ABCXTal na faixa de 800 a 1800 nm para resoluções de 4,0 nm, 2,5 nm e 1,0 nm, correspondendo a fendas de entrada e saída do monocromador de 470 e 600  $\mu\text{m}$ , 300 e 375  $\mu\text{m}$ , e 200 e 250  $\mu\text{m}$ , respectivamente. A partir desses espectros pode-se verificar que a largura de banda disponível para a leitura da rede é de aproximadamente 1000 nm (800 a 1800 nm). Essa faixa corresponde a faixa de resposta do detetor, possibilitando a leitura de redes que possuam comprimento de onda de ressonância dentro desta banda espectral. Nota-se, em destaque, que na medida em que se melhora a resolução, a relação sinal/ruído diminui, fazendo com que uma otimização destes parâmetros seja necessária.

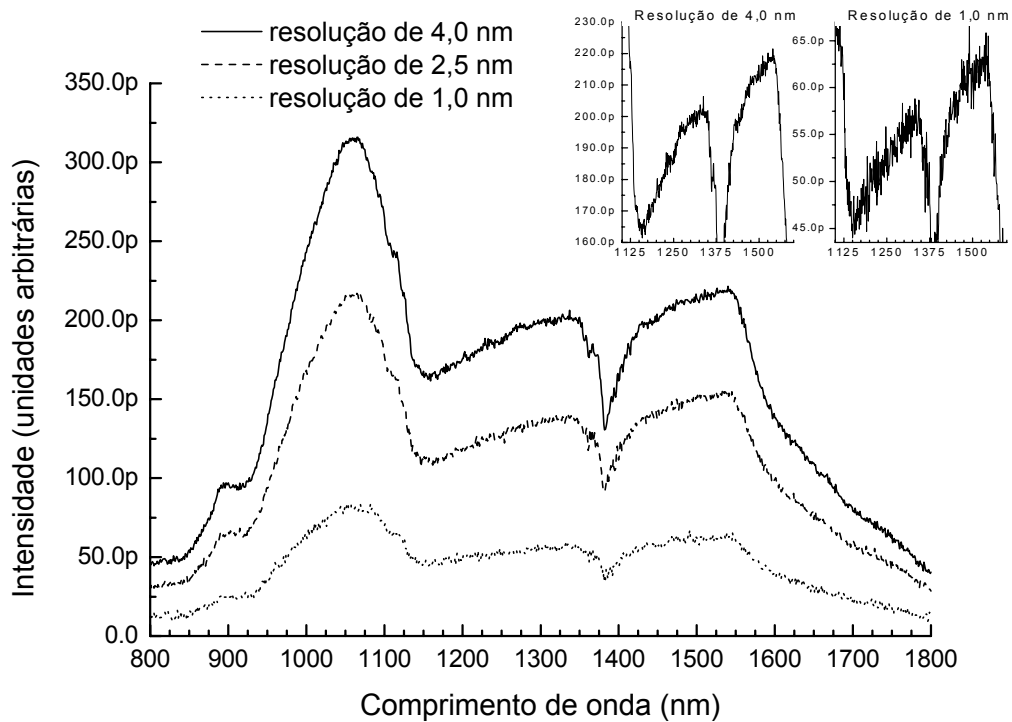


Figura 10 - Espectros de transmissão da fibra ótica para diferentes resoluções feitos com o sistema de aquisição do laboratório. Na figura superior mostra-se a diminuição da relação sinal/ruído com a melhora da resolução do sistema.

#### 4.1.1 Leitura de uma rede de Bragg

Para confirmar a possibilidade de leitura de redes em fibras, foi feito o levantamento do espectro de transmissão de uma rede Bragg existente no laboratório. Essa medida foi comparada com um espectro de transmissão dessa rede feito com o auxílio de um amplificador a fibra dopada com Érbio (EDFA) e um analisador de espectro ótico (OSA) Anritsu MS9710B, que opera na faixa de 600 a 1750 nm com resolução de 0,07 nm e acurácia em comprimento de onda de  $\pm 0,05$  nm, para a faixa de operação de 1530 a 1570 nm.

A figura 11 mostra os espectros obtidos para aqueles sistemas, onde a figura 11 (a) corresponde ao espectro obtido com o conjunto OSA e EDFA e resolução de 0,07 nm e a figura 11 (b) com o sistema de aquisição do laboratório e resolução de 4 nm. A semelhança nas bandas de absorção é evidente. Na figura 11 (a) o vale de maior intensidade está em 1550,4 nm e possui uma largura de banda de 0,3 nm, enquanto que na figura 11 (b) o pico está em 1548,6 nm e largura de banda de 1,4 nm. A queda de intensidade com o aumento no comprimento de onda nesses espectros de transmissão se deve à resposta espectral da fonte de luz, e o desvio em comprimento de onda das bandas de reflexão pode ser causado tanto pela menor resolução do sistema do laboratório quanto por uma alteração na resposta da rede, uma vez que as aquisições foram tomadas em diferentes dias e locais.

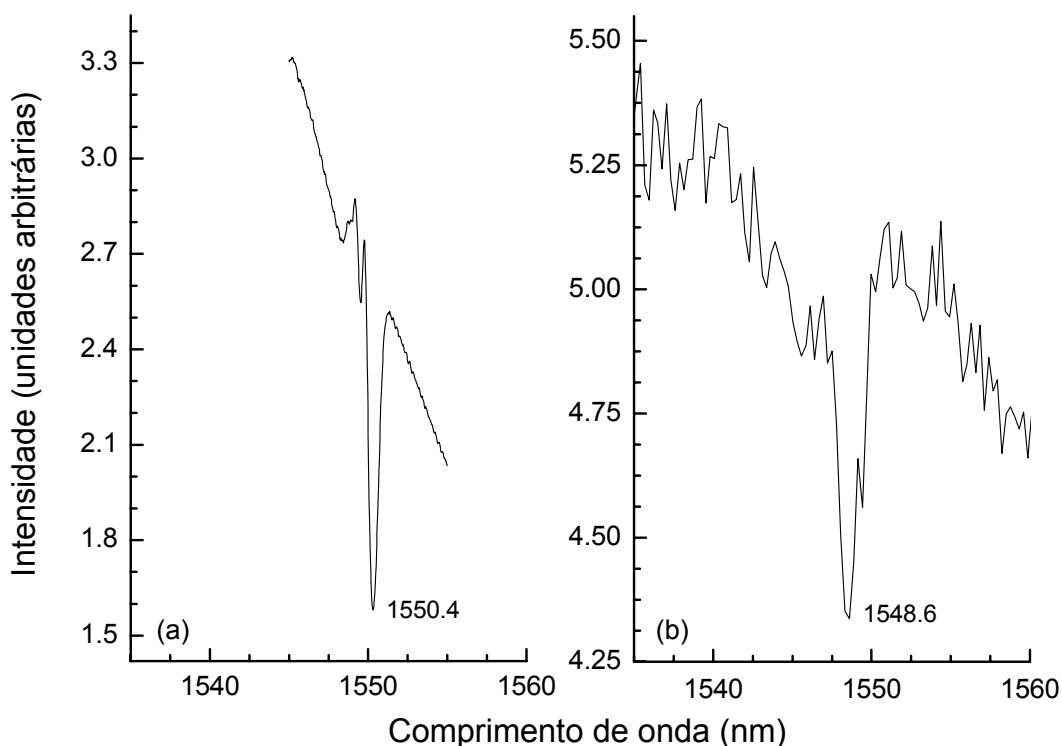


Figura 11 - Comparação entre os espectros feitos com: (a) o OSA e EDFA, (b) o sistema de aquisição do laboratório.

Apesar da grande diferença na relação sinal/ruído e resolução para os sistemas apresentados, aquele que possui maior relação sinal/ruído e resolução é limitado na largura de banda da fonte de luz utilizada, não permitindo que redes que possuem comprimento de onda de ressonância fora desta pequena faixa espectral possam ser caracterizadas. Por outro lado, o sistema com menor relação sinal/ruído e resolução é capaz de detectar, dentro de suas limitações, todas as redes disponíveis no laboratório que trabalham nas proximidades da terceira janela de transmissão.

#### 4.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LPG COM ARCO ELÉTRICO

Para escrever as LPG, foi usada uma técnica semelhante à descrita em [38]. O processo de fabricação consiste em posicionar uma fibra monomodo padrão (SMD da ABCXtal) sem a capa, entre os eletrodos de uma máquina de emendas (modelo S46999-M7-A71 da Siemens). Em uma das suas extremidades, a fibra foi fixada a um estágio translacionador controlado por computador com uma resolução linear de  $5\ \mu\text{m}$  [95]. Uma pequena massa (17,58 g) foi presa à outra ponta da fibra para mantê-la com tensão longitudinal constante. Uma descarga elétrica foi então produzida na máquina de emendas, com uma corrente de 12 mA e duração de 0,5 s. Após a exposição da fibra ao arco elétrico, esta foi deslocada longitudinalmente por um valor que corresponde ao período de rede, repetindo-se o processo de gravação ponto-a-ponto. Usando esse procedimento, foram produzidas redes com períodos entre 450 e 670  $\mu\text{m}$ , com comprimentos variando entre 40 e 67 pontos.

Antes das fibras serem colocadas na máquina de emendas, para efetuar a gravação das redes, estas passaram por um processo de limpeza com álcool isopropílico, com o objetivo de tirar as partículas de pó depositadas sobre a fibra, e que podiam alterar o valor de intensidade do arco elétrico aplicado à fibra.

As primeiras redes foram gravadas no Laboratório de Ótica e Optoeletrônica (LOOP) do CEFET-PR com 50 pontos e períodos de interação na faixa entre 450 e 650  $\mu\text{m}$ . No entanto, a monitoração do processo de gravação usando um analisador de espectros ótico e um amplificador de fibra dopada com Érbio não se mostrou eficiente. A largura de banda da fonte usada na leitura era muito pequena, aproximadamente 40 nm, não sendo possível detectar a gravação das redes. Assim, a verificação de que as redes estavam escritas foi obtida somente quando a leitura foi realizada com o sistema desenvolvido no Laboratório de Laser. A partir de então, por causa da grande largura espectral de leitura oferecida por esse sistema, todo o processo de escrita e leitura passou a ser desenvolvido nesse local. Um esquema dessa montagem está representado na figura 12. Nesse caso, além do computador controlar o deslocamento do monocromador e fazer a leitura do sinal do amplificador *lock-in*, ele também realiza o deslocamento da fibra por um período  $\Lambda$ .

Com esse sistema foi possível fazer um acompanhamento da evolução do espectro de transmissão da rede durante a sua gravação, permitindo verificar as mudanças ocorridas no espectro e o comportamento dos picos de atenuação, de modo a evitar o re-acoplamento para o modo de núcleo. Além disso, o monitoramento durante o processo de gravação permite a escolha de um valor de atenuação desejado para a rede em formação, adequado a cada aplicação em particular.



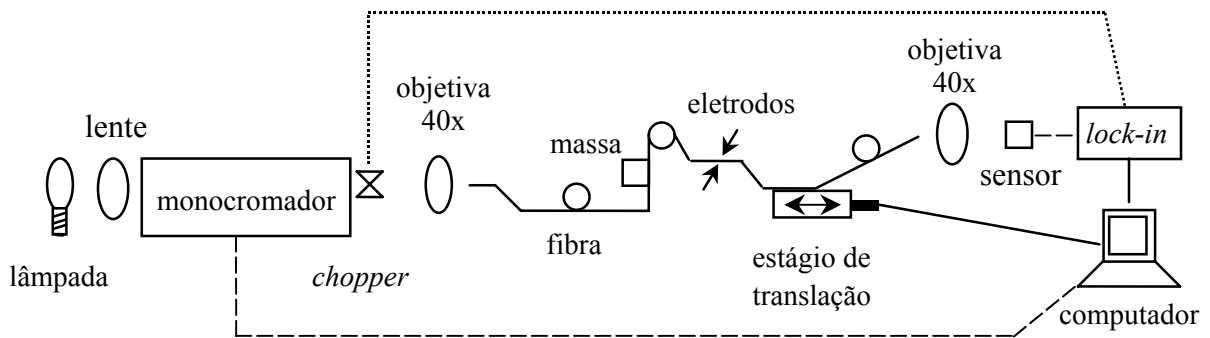


Figura 12 - Esquema da montagem experimental usada na fabricação de redes de período longo.

A figura 13 mostra as mudanças ocorridas no espectro de transmissão de uma fibra submetida à aplicação de arcos com período  $\Lambda$  de 570  $\mu\text{m}$  para 20, 30, 40 e 50 pontos. Todos os espectros foram obtidos com uma resolução de 4 nm. A identificação das mudanças induzidas no espectro de transmissão foi feita com a divisão do espectro da rede por aquele obtido anteriormente ao processo de gravação com a fibra posicionada na máquina de emendas. Essa razão está mostrada na figura 14 para a faixa entre 1100 e 1500 nm e 4 nm de resolução. Pode-se notar o aumento na atenuação do pico principal com o aumento do comprimento de gravação da rede, bem como o surgimento de picos de menor intensidade. Esses picos podem ser causados pelo acoplamento para outros modos de ordem superior ou então por erros no espaçamento da rede durante o processo de fabricação. O maior e o menor vale possuem uma atenuação de 3,3 e 2,1 dB, e largura de banda a meia altura de 32 e 41 nm, respectivamente.

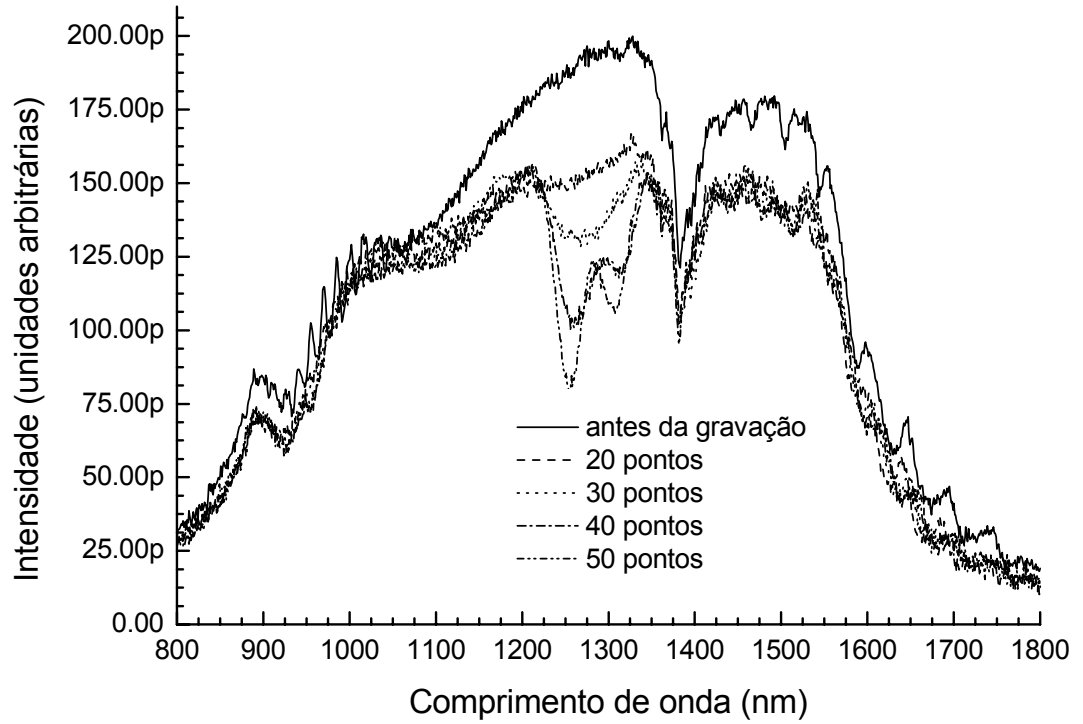


Figura 13 - Espectro de transmissão da fibra ótica antes da gravação e após a gravação de 20, 30, 40 e 50 pontos. Os pontos foram gravados com um período de aproximadamente  $570 \mu\text{m}$  mediante a aplicação de um arco elétrico de 12 mA e duração de 0,5 s.

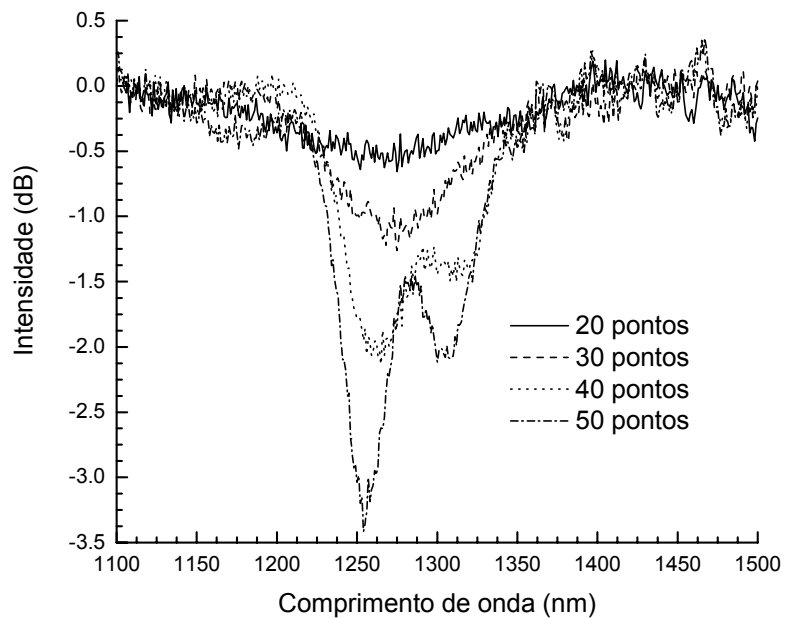


Figura 14 - Espectros da rede de período longo lpgonline12 ( $\Lambda = 570 \mu\text{m}$ ), com a correção da resposta espectral do sistema, para 20, 30, 40, e 50 pontos.

Para esse sistema de gravação, as redes que possuem mais de 50 pontos de interação começam a apresentar um espectro de transmissão distorcido, com a diminuição da amplitude e aumento da largura da banda de maior de atenuação. Esse efeito é causado pelo re-acoplamento do modo de casca para o modo de núcleo. Isso pode ser visualizado na figura 15, onde a rede fabricada com período de 649  $\mu\text{m}$  começou a apresentar uma atenuação menor a partir de 40 pontos, com uma redução considerável na profundidade do pico para 60 pontos. A atenuação máxima obtida antes do re-acoplamento foi cerca de 4 dB e a largura de banda de aproximadamente 60 nm.

Apesar de algumas das redes feitas no LOOP apresentarem mudanças no espectro de transmissão e indicarem que a metodologia adotada para a gravação estava funcionando, estas deixaram de ser analisadas por causa da baixa eficiência, que iria introduzir grandes incertezas nas medidas de caracterização. Além disso, não havia informação sobre a evolução dessas redes durante a gravação, impossibilitando assim prever se essas redes haviam sofrido re-acoplamento ou não.

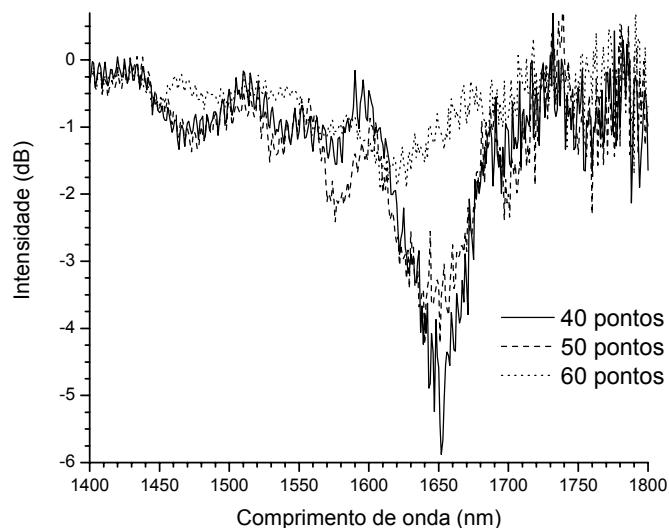


Figura 15 - Espectros da rede de período longo lpgonline2, com período de interação de 649  $\mu\text{m}$  e 40, 50, e 60 pontos. Verifica-se que depois de 40 pontos a rede começa a re-acoplar para o modo de núcleo, diminuindo a profundidade do pico de atenuação. Espectros com a correção da resposta espectral do sistema.

Na tabela 1 são descritas as redes gravadas no Laboratório de Laser, que apresentaram os melhores resultados de eficiência e foram usadas nas caracterizações quanto à influência da temperatura e do índice de refração. A fórmula para a conversão da eficiência  $\eta$  da rede em porcentagem para eficiência em dB é dada por  $\eta[\text{dB}] = 10 \cdot \log[1 - \eta]$ .

TABELA 1 – REDES DE PERÍODO LONGO FABRICADAS NO CEFET-PR

Identificação da rede	Período ( $\Lambda$ , $\mu\text{m}$ )	Eficiência (de 21 °C a 23 °C)	Número de pontos (N)	Observação
lpgonline1	649	-	60	variações de intensidade de arco elétrico durante a gravação e re-acoplamento
lpgonline2	649	39 % (máximo)	60	re-acoplamento após 40 pontos
lpgonline3	649	55 %	40	rompimento durante os experimentos
lpgonline4	668	55 %	40	
lpgonline5	649	63 %	40	arrebentou em experimentos
lpgonline11	589	66 %	40	
lpgonline12	570	44 %	50	
lpgonline13	649	41 %	53	cópia da lpgonline5

A rede lpgonline1, por se tratar da primeira rede gravada quando ainda não se tinha noção de quantos pontos seriam necessários para obter uma boa eficiência, foi formada com 60 pontos. No entanto, após o quadragésimo ponto, partículas de pó ou acoplamento para outros modos de casca ou de núcleo, alteraram seu espectro de transmissão. A confirmação de que um re-acoplamento estava ocorrendo foi feita durante a gravação da rede lpgonline2, quando os vales começaram a se alargar e tornaram-se indefinidos. Desse modo, para evitar re-acoplamento, a terceira rede feita no laboratório (lpgonline3) foi gravada com somente 40 pontos, fornecendo uma eficiência de acoplamento de aproximadamente 55 %. Com essa rede

foram iniciadas as primeiras tentativas de caracterização da LPG que não puderam ser concretizadas uma vez que a fibra se rompeu durante os experimentos.

A rede lpgonline4 foi gravada com parâmetros semelhantes à rede lpgonline3 e foi a primeira rede com espectro de transmissão que apresentou poucas perturbações, e um vale mais estreito e destacado com cerca de 55 % de acoplamento entre a faixa de 1100 a 1700 nm. Foram ainda gravadas mais quatro redes, lpgonline5, lpgonline11, lpgonline12, e lpgonline13, cujas eficiências e parâmetros de gravação estão mostrados na tabela 1. Essa tabela indica que a rede que teve maior eficiência de acoplamento, para a faixa de temperatura entre 21 e 23 °C, foi a lpgonline11, com cerca de 66 % de acoplamento. A última rede gravada, lpgonline13, é uma tentativa de cópia da lpgonline5 e foi produzida para os experimentos que envolvem concentração salina de NaCl.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO

#### 4.3.1 Sensibilidade à temperatura do meio externo

Para investigar a conduta térmica das LPG foi utilizada uma resistência para seu aquecimento. As temperaturas utilizadas variaram entre 21 e 63 °C e os espectros de transmissão foram feitos com uma resolução de 1 nm, após um tempo de estabilização da temperatura de aproximadamente 10 minutos.

Um esquema da vista frontal da montagem utilizada está representado na figura 16 (a). A fibra ótica fica apoiada sobre uma placa de vidro, e é mantida aproximadamente reta e com liberdade de deslocamento longitudinal introduzindo suas extremidades em dois tubos de

plástico posicionados em cada um dos lados da rede. Um termômetro é deixado fixo sobre o vidro e próximo a LPG, e a resistência é posicionada de forma a ficar no centro da rede, paralela a bancada e na mesma altura. Isso foi feito para tentar padronizar as medidas de temperatura feitas para as diferentes redes. Na figura 16 (b) é mostrada a vista superior, sem o tubo de vidro e a resistência, indicando o local do termômetro e a colocação dos tubos de plástico nas extremidades da fibra.

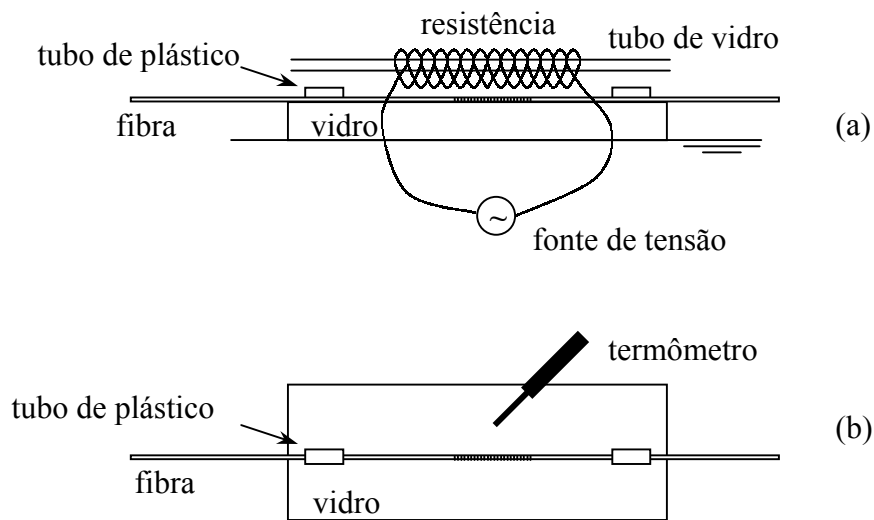


Figura 16 - Esquema da montagem experimental usada para verificar a resposta da rede com a mudança de temperatura.

A figura 17 mostra o deslocamento espectral da rede lpgonline12 (período de interação de  $570 \mu\text{m}$  e 50 pontos) para as temperaturas de 21 e  $57^\circ\text{C}$ . Nessa figura pode-se verificar o deslocamento do comprimento de onda de ressonância para menores energias com o acréscimo da temperatura. No processo de redução da temperatura ocorre o processo inverso sem histerese significativa. As curvas de ajuste no gráfico correspondem a Gaussianas que, além de terem sido usadas para auxiliar na medida do deslocamento do espectro com a temperatura e então determinar a sensibilidade da rede, foram as que melhor ajustaram ao espectro de transmissão da rede.

A figura 18 mostra a evolução do pico de maior atenuação ( $\lambda = 1250$  nm) durante os processos de aumento e diminuição de temperatura. As sensibilidades obtidas para a faixa de temperaturas indicada foram de  $0,121 \pm 0,025$  e  $0,136 \pm 0,031$  nm/ $^{\circ}$ C, para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente.

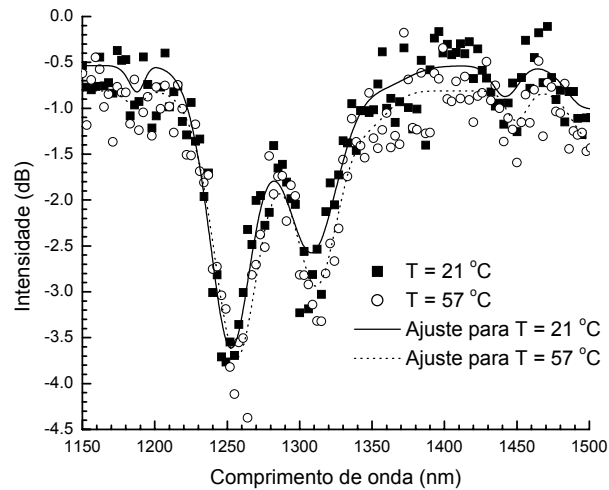


Figura 17 - Deslocamento espectral da rede lpgonline12 ( $\Lambda = 570$   $\mu$ m e 50 pontos), para as temperaturas de 21 e 57  $^{\circ}$ C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

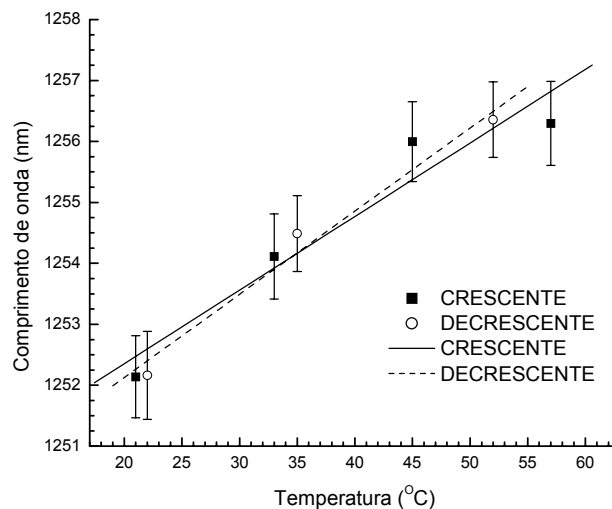


Figura 18 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1250 nm para a lpgonline12 ( $\Lambda = 570$   $\mu$ m e 50 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos.

Foram feitas também as análises para a temperatura para as redes lpgonline4, lpgonline5, e lpgonline11. Os resultados para a lpgonline4 estão mostradas nas figuras 19 e 20. Nesse caso, a faixa de temperatura usada foi de 23 a 55°C, e as sensibilidades para essa rede no pico de maior atenuação ( $\sim 1593$  nm) foram de  $0,076 \pm 0,025$  e  $0,094 \pm 0,018$  nm/°C, para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente.

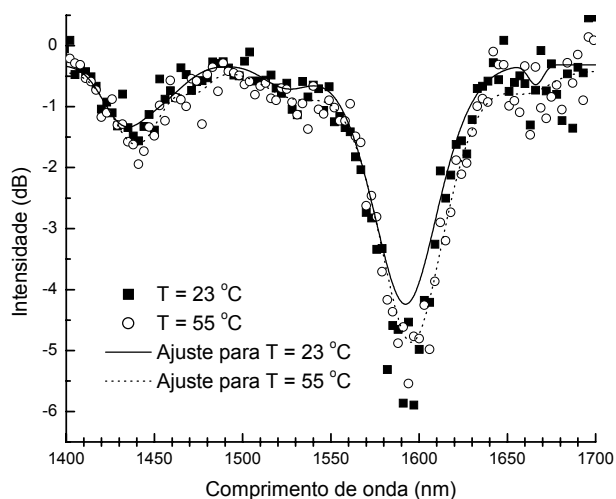


Figura 19 - Deslocamento espectral da lpgonline4 ( $\Lambda = 668$   $\mu\text{m}$  e 40 pontos), para as temperaturas de 23 e 55 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

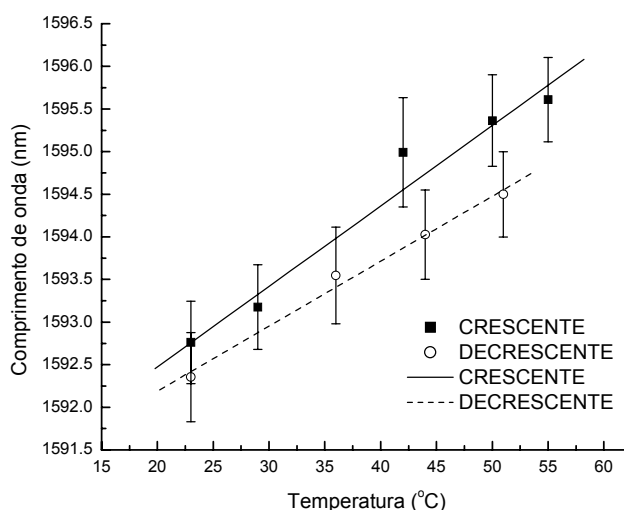


Figura 20 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1593 nm para a lpgonline4 ( $\Lambda = 668$   $\mu\text{m}$  e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos.



Os resultados para a rede *lpgonline5* ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 pontos) são mostrados nas figuras 21 e 22. Os extremos de temperatura nesse caso foram 21 e 58 °C, e as sensibilidades obtidas para o pico em 1480 nm e para o pico de maior atenuação ( $\sim 1541 \text{ nm}$ ), para a faixa de temperaturas indicada, foram de  $0,081 \pm 0,074$  e  $0,106 \pm 0,080 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , e  $0,098 \pm 0,016$  e  $0,081 \pm 0,022 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente.

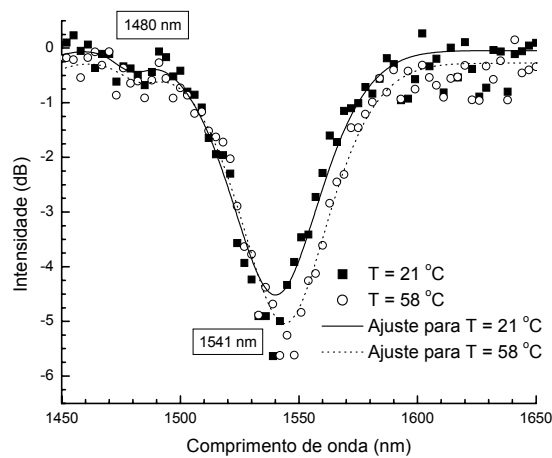


Figura 21 - Deslocamento espectral da *lpgonline5* ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 pontos), para as temperaturas de 21 e 58 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

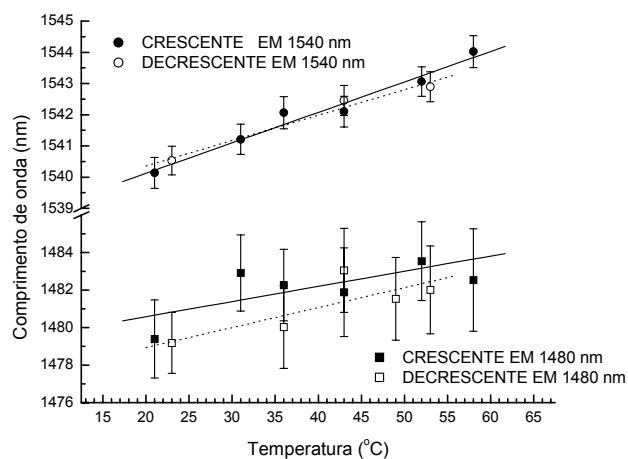


Figura 22 - Variação da posição dos picos em 1480 nm e 1541 nm para a rede *lpgonline5* ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos.

Os resultados para a rede lpgonline11 ( $\Lambda = 589 \mu\text{m}$  e 40 pontos) são mostrados nas figuras 23 e 24. Para essa medida, a faixa de temperatura utilizada foi entre 22 e 63 °C. As sensibilidades obtidas para o pico de maior atenuação ( $\sim 1435 \text{ nm}$ ), para a faixa de temperaturas indicada, foram de  $0,102 \pm 0,020$  e  $0,078 \pm 0,037 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ , para os processos de aumento e diminuição de temperatura, respectivamente.

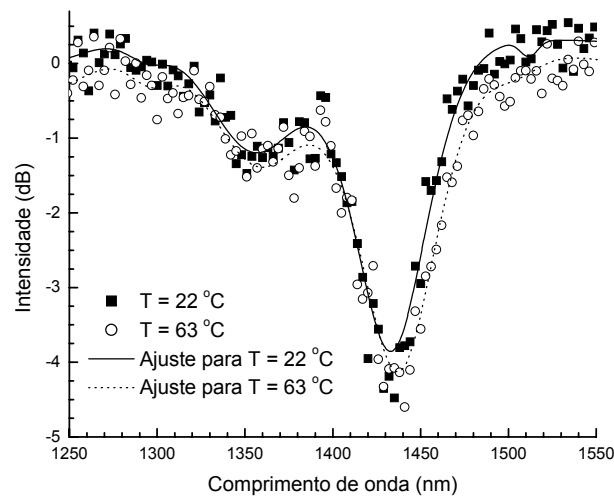


Figura 23 - Deslocamento espectral da lpgonline11 ( $\Lambda = 589 \mu\text{m}$  e 40 pontos), para as temperaturas de 22 e 63 °C. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

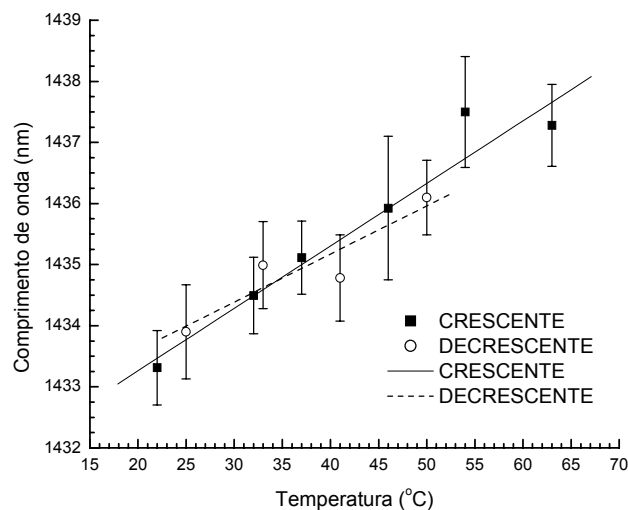


Figura 24 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1435 nm para a lpgonline11 ( $\Lambda = 589 \mu\text{m}$  e 40 pontos), durante os processos de aumento e diminuição da temperatura. As linhas sólida e tracejada correspondem a ajustes lineares para esses processos.

A tabela 2 resume os valores obtidos de sensibilidade à temperatura para as diferentes LPG. Para as redes analisadas, os valores de sensibilidade com a temperatura obtidos estão de acordo com aqueles apresentados na literatura [10], [38] e [96].

TABELA 2 – VALORES DE SENSIBILIDADE À TEMPERATURA PARA AS LPG.

Identificação da rede	Pico de atenuação (nm) em ~ 33 °C	Sensibilidade (nm/°C)
lpgonline4	1593	Crescente: 0,076 ± 0,025 Decrescente: 0,094 ± 0,018
lpgonline5	1480	Crescente: 0,081 ± 0,074 Decrescente: 0,106 ± 0,080
lpgonline5	1541	Crescente: 0,098 ± 0,016 Decrescente: 0,081 ± 0,022
lpgonline11	1435	Crescente: 0,102 ± 0,020 Decrescente: 0,078 ± 0,037
lpgonline12	1254	Crescente: 0,121 ± 0,025 Decrescente: 0,136 ± 0,031

#### 4.3.2 Sensibilidade ao índice de refração do meio externo

Para caracterizar as LPG como um sensor de índice de refração circunvizinho ( $n_3$ ), foram feitas medidas do espectro de transmissão da rede quando a mesma era mergulhada em fluidos com índices de refração diferentes (ar, água, álcool e glicerina).

A montagem para a leitura da rede permaneceu a mesma descrita anteriormente, sendo que neste caso a rede esteve imersa em um fluido. Todas as medidas foram feitas com

temperatura controlada ( $\pm 1$  °C), para evitar que os deslocamentos em comprimento de onda, devido a variações de temperatura, pudessem alterar a caracterização. Desvios de comprimento de onda devidos à deformação da rede foram evitados mantendo a fibra sempre em repouso no suporte de vidro e esticada, utilizando os tubos de plástico como guias. Os valores de índices de refração foram estimados a partir dos dados para  $\lambda = 589$  nm a temperatura de 20 °C [97], e considerando-se as proporções utilizadas nas misturas.

A figura 25 mostra a evolução do espectro para a fibra imersa no ar (a), água (b) e glicerina (c), para temperatura ambiente variando entre 20 e 21 °C e uma resolução de 1 nm. Após cada levantamento do espectro para o qual o meio circunvizinho era um líquido, foi realizada a limpeza da fibra com água destilada e a secagem desta com papel absorvente. Para confirmar a não existência de resíduos sobre a mesma, um novo espectro era adquirido e comparado com aquele obtido inicialmente para a fibra imersa no ar. Todos os espectros para  $n_3 = 1,000$  apresentaram grande semelhança, o que mostra que o filtro também possui uma histerese pouco significativa para a variação de índice de refração.

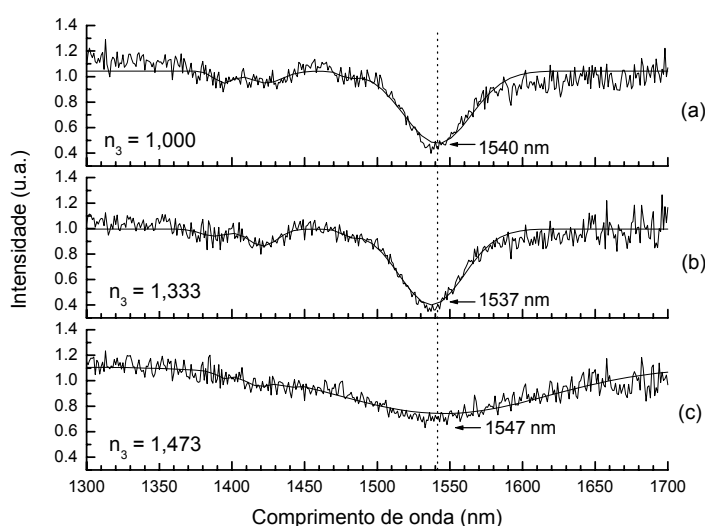


Figura 25 - Deslocamento do pico de maior atenuação da rede Ipgonline5 ( $\Lambda = 649$   $\mu\text{m}$  e 40 pontos), para ar, água e glicerina como meios circunvizinhos. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

A figura 26 mostra a curva da variação do comprimento de onda de pico de maior atenuação para diferentes índices de refração do meio externo (a linha ligando os pontos é apenas uma referência para visualização). O comportamento é similar ao observado em LPG produzidas por fotoexposição [11]. Nota-se o deslocamento do comprimento de onda de ressonância para menores valores de comprimento de onda quando o índice circunvizinho à fibra aproxima-se do índice de refração da casca ( $n_2 \approx 1,445$ , para fibras de sílica). Verifica-se ainda o aumento da sensibilidade da rede à mudança de índice de refração quando a variação de índice do meio externo aproxima-se daquele da casca. Para os dados obtidos, a rede apresentou uma variação de 7 nm no comprimento de onda de pico, o que corresponde a uma resolução média de  $0,0139 \text{ (nm)}^{-1}$  para índices entre 1,333 e 1,430.

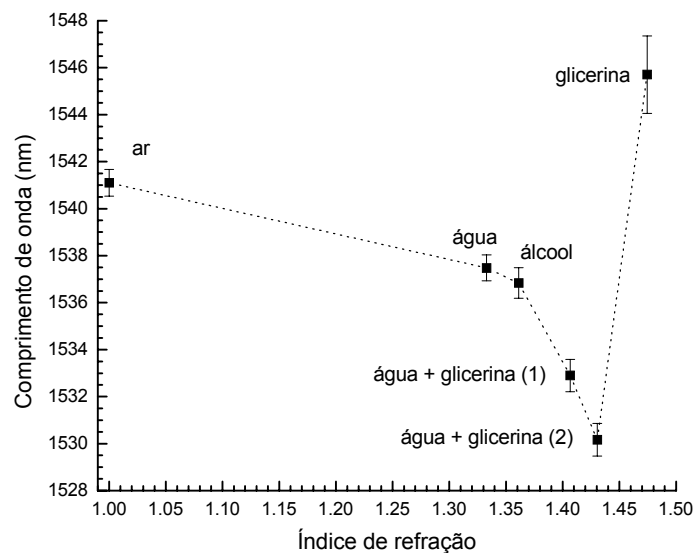


Figura 26 - Variação da posição do pico de maior atenuação da rede lpgonline5 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 40 pontos), para índices de refração variando entre 1,000 e 1,475.

#### 4.3.3 Sensor de concentração salina

Para caracterizar uma LPG como um sensor de concentração salina foram feitas medidas com solução aquosa de cloreto de sódio. A montagem de leitura da rede permaneceu a mesma que a anteriormente citada, com a diferença de que a rede agora esteve mergulhada na solução aquosa. Prevendo-se que a variação de índice de refração para mudanças na concentração salina é menor, foi elaborado um suporte rígido de vidro para a fixação da fibra, veja o esquema na figura 27. Com esse suporte, foi possível evitar que medidas cruzadas de outras grandezas físicas, como curvatura e tensão longitudinal, alterassem o espectro de transmissão da rede. A fibra foi colada com adesivo instantâneo universal e a temperatura foi controlada externamente.

Os valores de concentração foram calculados com base em tabelas contendo as propriedades de soluções aquosas como função da concentração [98] e nos seguintes parâmetros:

- a) volume de água inicial e massa do soluto ou;
- b) volume inicial da solução saturada e volume de água adicionado.

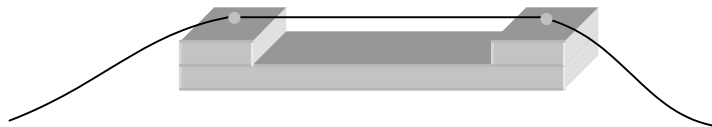


Figura 27 - Esquema de como a LPG foi presa.

A solução aquosa saturada de NaCl foi obtida a partir de um valor base no valor de solubilidade do soluto e, para assegurar que a solução estava saturada, era acrescentado soluto até verificar que o corpo de fundo aumentava em quantidade. Após esse procedimento, essa solução era passada para um outro recipiente, tomando-se cuidado para que o material depositado permanecesse no primeiro recipiente. A solução foi então separada em diferentes recipientes com volumes iguais de amostra. Para variar a concentração, foi acrescentado um volume conhecido de solvente. Com esse procedimento, obteve-se dez concentrações diferentes a serem medidas, com a concentração variando entre 317 e 198 g/l.

A figura 28 mostra os espectros de transmissão da rede lpgonline13 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 53 pontos) para os valores extremos de concentração. Essas medidas foram feitas com resolução de 1 nm. Pode-se notar que nesse caso a variação do pico de atenuação é bastante reduzida para os valores de concentração medidos.

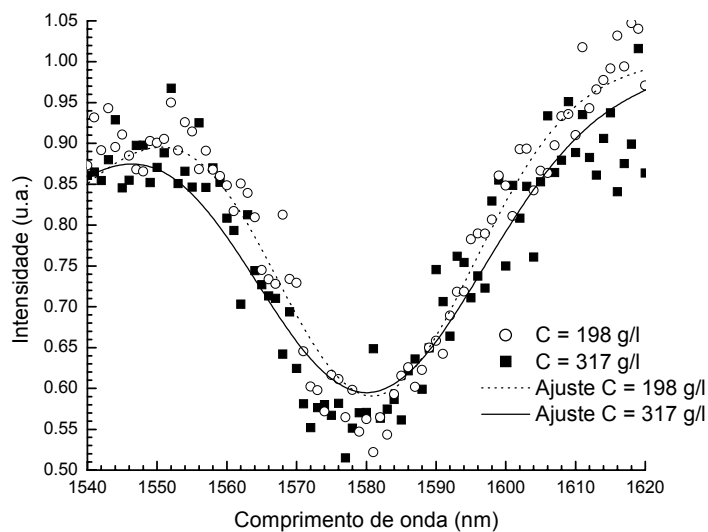


Figura 28 - Posição do pico de maior atenuação da rede lpgonline13 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 53 pontos), para as concentrações de 198 e 317 g/l. Espectro obtido com a correção da resposta espectral do sistema.

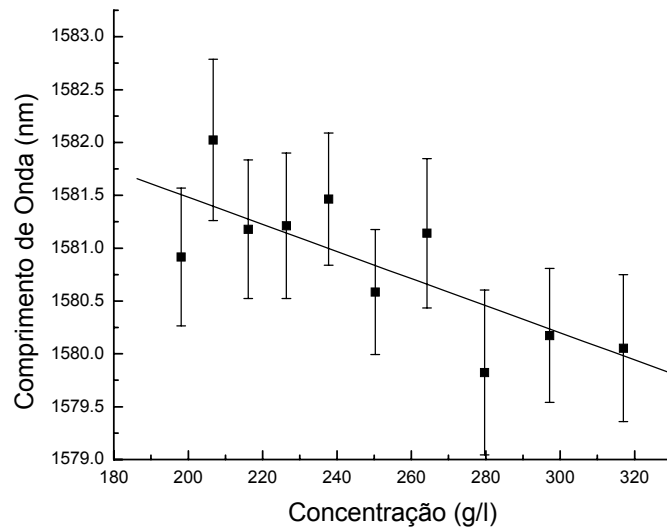


Figura 29 - Variação da posição do pico de maior atenuação em 1585 nm para a rede lpgonline13 ( $\Lambda = 649 \mu\text{m}$  e 53 pontos), durante os processos de diluição da solução aquosa de NaCl. A linha sólida corresponde ao ajuste linear para esses processos.

A figura 29 mostra que variação do pico de maior atenuação, quando a diluição da concentração salina é efetuada, pode ser ajustada por uma reta, para a faixa de medida adotada. O valor de sensibilidade obtido para essa rede é de  $-0,013 \pm 0,006 \text{ nm}\cdot\text{l}/\text{g}$ .



## CAPÍTULO 5

### 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentados, pela primeira vez a nível nacional, os resultados da gravação e caracterização de LPG em fibras óticas. A maior sensibilidade à variação de parâmetros externos em comparação com as FBG, possibilita a construção de dispositivos transdutores mais eficientes, como mostram os resultados aqui apresentados. O sistema de leitura usado possibilitou a caracterização de redes em fibra com ressonâncias no infravermelho, entre 0,8 e 1,7  $\mu\text{m}$ . O funcionamento e a eficiência desse sistema foram verificados com a caracterização de uma rede de Bragg comercial, sendo posteriormente empregado nos processos de fabricação e caracterização de redes de período longo (LPG).

As gravações das LPG foram realizadas utilizando-se a técnica ponto-a-ponto com aplicação de um arco elétrico. O emprego desse método de escrita nos laboratórios do CEFET-PR (Laboratório de Laser e LOOP) possibilitou a produção de redes com períodos entre 570 e 670  $\mu\text{m}$ , com uma banda de atenuação máxima de aproximadamente 4,7 dB e larguras de banda entre 29 e 62 nm.

As redes foram caracterizadas em função da variação da temperatura e do índice de refração do meio externo. As sensibilidades das diversas LPG produzidas estão entre 0,076 e 0,136  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , para temperaturas entre 21 e 63  $^\circ\text{C}$ , e apresentaram uma resolução média de

$0,0139 \text{ (nm)}^{-1}$  para índices de refração entre 1,333 e 1,430. Os resultados obtidos mostram que a conduta das LPG para essas grandezas está de acordo com a das encontradas na literatura. As redes também exibem aproximadamente a mesma resposta espectral para variações crescentes ou decrescentes de temperatura sem histerese significativa. Comportamento semelhante também foi obtido na caracterização em função da variação do índice de refração do meio externo. Também foi determinada a resposta das redes com a variação da concentração de uma solução aquosa de NaCl. Para esse caso, foi obtida uma sensibilidade à variação da concentração de aproximadamente  $-0,013 \text{ nm}\cdot\text{/g}$ . Esses resultados apontam para a possibilidade da utilização das LPG fabricadas no CEFET-PR como sensores de concentração, sensores industriais e/ou químicos.

Os resultados mostrados para as LPG indicam que estas redes exibem um grande potencial para sensoriamento em aplicações como medida de temperatura em fornos industriais, detecção de falhas no preenchimento de moldes, determinação de elementos de corrosão em aeronaves, monitoramento de elementos químicos presentes em fluidos usados nas refinarias de óleos, entre outras.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma caracterização mais precisa da sensibilidade da rede ao meio externo. Isso poderá ser conseguido com a utilização de fontes de luz mais eficientes na região de interesse (LED – *Light Emission Diode* – Diodo Emissor de Luz), e que permitam um melhor aproveitamento da radiação emitida e conseqüentemente uma melhora na relação sinal/ruído das medidas, resultando em caracterizações mais acuradas dos sensores. Outra possibilidade é a análise da sensibilidade das redes a curvaturas e tensões mecânicas, o que pode resultar na proposta de utilização dessas LPG como sensores de estruturas na construção civil, ou no monitoramento de linhas de transmissão de energia elétrica.

Outra possibilidade é a fabricação de redes, com o uso de arco elétrico ou com radiação UV, para obtenção de larguras de bandas mais estreitas e com maior atenuação. Essas redes possibilitariam uma detecção mais precisa da variação do comprimento de onda com relação às mudanças do meio externo, e facilitariam a caracterização, uma vez que há uma maior relação sinal/ruído. Além da melhoria na eficiência de acoplamento inter-modal na rede, sugere-se a fabricação de redes associadas em cascata e com deslocamento de fase, o que pode resultar no desenvolvimento de novos dispositivos fotônicos. A fabricação de redes com larguras de banda mais estreitas seria possível aprimorando o método de escrita, de modo a aumentar a eficiência de acoplamento, ou com a utilização de outras fibras, uma vez que o espectro de transmissão da LPG é bastante dependente do material que constitui a fibra. O desenvolvimento de dispositivos fotônicos poderá ser possível com a aquisição de máscaras de fase e bombeamento UV, ou pela escrita ponto a ponto destes elementos.

Utilizando-se da mesma técnica de escrita usada neste trabalho, sugere-se a gravação de redes em fibras birrefringentes. Uma vantagem resultante é a obtenção de picos de ressonância seletivos com a polarização, levando à possibilidade de se usar esse dispositivo como filtro de polarização seletivo em comprimento de onda com baixa perda de inserção. A separação entre os picos de ressonância, resultante da birrefringência intrínseca da fibra, poderia ainda ser utilizada para sensoriamento de tensões transversais. A mesma técnica de escrita ponto-a-ponto pode ser empregada na gravação de redes em fibras poliméricas. Isso pode resultar em dispositivos mais resistentes à tensão longitudinal, ou em sensores com maior sensibilidade às variações dos parâmetros externos.

Finalmente, sugere-se o estudo teórico das redes fabricadas, através de simulações, para caracterizar os dispositivos em função dos parâmetros estruturais da fibra e das alterações realizadas durante o processo de gravação. Essa caracterização possibilitará um

estudo mais detalhado do comportamento da rede às mudanças do meio externo, permitindo a exploração de novos potenciais dos dispositivos.

## ANEXO

### SOLUÇÕES

O estado físico mais simples é o gasoso. Os gases são formados por moléculas independentes umas das outras e com pouca, ou nenhuma, interação entre si. No estado condensado, sólido e líquido, as moléculas situam-se num espaço confinado, mantendo-se em contato contínuo com suas vizinhas através das forças intermoleculares.

Muitas vezes, quando dois ou mais compostos no estado condensado são misturados, as forças intermoleculares são alteradas, havendo uma tendência de alcançar um estado de máxima desordem. Isso faz com que as moléculas se distribuam de maneira homogênea por todo o sistema, isto é, todo o sistema adquire a mesma composição. Essa mistura homogênea denomina-se **solução** e o processo de mistura de **dissolução**. Geralmente uma solução é constituída por um componente em maior quantidade, o solvente, e um ou mais componentes denominados solutos [99].

### CONCENTRAÇÃO DO SOLUTO

Quando um soluto é dissolvido progressivamente em um solvente, a tendência de dissolução das suas moléculas vai diminuindo gradualmente até atingir um grau de saturação. Uma solução pode ser denominada, arbitrariamente, de diluída, concentrada ou saturada, dependendo da quantidade de soluto dissolvido. Diz-se que uma solução é **diluída** quando ela contém uma pequena quantidade de soluto ( $10^{-2}$  a  $10^{-5}$  mol. $l^{-1}$ ) e **concentrada** quando esta quantidade é elevada (superior a 1 mol. $l^{-1}$ ). Quando a massa do soluto dissolvido permanecer constante por mais que este seja adicionado, a solução é dita **saturada**.

A massa do soluto que pode ser dissolvida num determinado solvente e numa determinada temperatura para produzir uma solução saturada é denominada **solubilidade** do composto em estudo. A solubilidade varia de soluto para soluto e de solvente para solvente. Caso uma solução tenha uma quantidade de soluto maior que a permitida, a uma determinada temperatura e pressão, diz-se que a solução é **supersaturada**. Nesse caso, uma simples agitação pode provocar a precipitação do excesso de soluto [99].

## CONCENTRAÇÃO DAS SOLUÇÕES E OUTRAS GRANDEZAS QUÍMICAS

A quantidade de uma substância contida numa solução é expressa numa grandeza denominada **concentração da substância**. De acordo com o tipo de trabalho a ser efetuado, a concentração de uma solução pode ser expressa de várias maneiras, dentre as quais destacam-se a molaridade, a molalidade, a fração molar e a normalidade. Nas fórmulas a seguir será adotado o subscrito *s* para o soluto e *sv* para o solvente, sendo relativos à solução quando não houver sub-índices [99].

❖ Massa atômica e massa molecular (M)

A massa atômica é a massa de um átomo de um elemento expresso em unidades de massa atômica,  $u$ . A massa molecular ou peso molecular é a soma das massas atômicas de todos os átomos presentes na fórmula desta substância. O valor de  $u$  é dado pela seguinte relação [99]:

$$1 u = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

❖ Número de mols ( $n$ )

O número de mols de uma substância molecular é dado pela razão entre a massa da substância e o peso ou a massa molecular da mesma [99].

$$n = \frac{\text{massa}}{\text{peso molecular}}$$

Desse modo, o número de mols de um soluto é dado por:

$$n_s = \frac{m_s}{M_s}$$

1 mol =  $6,02 \cdot 10^{23}$  moléculas de uma substância.

❖ Porcentagem em massa (P)

A porcentagem massa é a massa do soluto, em gramas, que foi dissolvida em 100 g de solução [100].

$$P = 100 \frac{m_s}{m}$$

## ❖ Concentração comum (C)

A concentração comum é a relação entre a massa do soluto e o volume da solução [100].

$$C = \frac{m_s}{V}$$

❖ Molaridade ( $\mathfrak{M}$ )

A molaridade,  $\mathfrak{M}$ , é definida como sendo o número de mols do soluto por litro de solução. Essa unidade tem a desvantagem de ser dependente da temperatura [99].

$$\mathfrak{M} = \frac{n_s}{V}$$

## ❖ Molalidade (W)

A molalidade, W, de uma solução é dada como o número de mols de soluto que foi dissolvido em 1 kg de solvente. A molalidade é independente da temperatura [99].

$$W = \frac{n_s}{m_{sv}}$$

## ❖ Fração molar (X)

A fração molar de um solvente numa solução é dada como o número de mols,  $n_{sv}$ , deste componente dividido pelo número total de mols da solução (solutos e solventes). Por exemplo, numa solução de dois componentes, um solvente e um soluto, (solução binária), a fração molar do solvente,  $X_{sv}$  é dada por:



$$X_{sv} = \frac{n_{sv}}{n_{sv} + n_s}$$

e do soluto por

$$X_s = \frac{n_s}{n_{sv} + n_s}$$

A fração molar de uma solução representa a parte da solução que corresponde a um componente. Desse modo, a soma de todas as frações molares de uma determinada solução é sempre igual à unidade. A fração molar também é independente da temperatura [99].

#### ❖ Normalidade (N)

O número de equivalentes gramas de um soluto por litro de solução é denominado normalidade. Tal como a molaridade, essa unidade é útil no tratamento quantitativo das reações químicas que ocorrem em solução.

$$N = \frac{n_{Es}}{V}$$

No caso de um sal, o equivalente grama ( $E_{sal}$ ) é dado pela razão entre a massa molecular ou molécula-grama do sal e a carga total de todos os cátions do sal. O número de equivalentes grama de soluto ( $n_{Es}$ ) é definido pela razão entre a massa molecular do soluto ( $m_s$ ) e o seu equivalente grama ( $E_s$ ) [99].

## DILUIÇÃO DE SOLUÇÃO

A diluição de uma solução consiste em adicionar a uma solução solvente puro, figura 30. Como o número de mols não é alterado com a adição de solvente puro, obtém-se a seguinte relação:

$$n_s \text{ inicial} = n_s \text{ final} \quad \Rightarrow \quad \mathfrak{S}.V = \mathfrak{S}'.V'$$

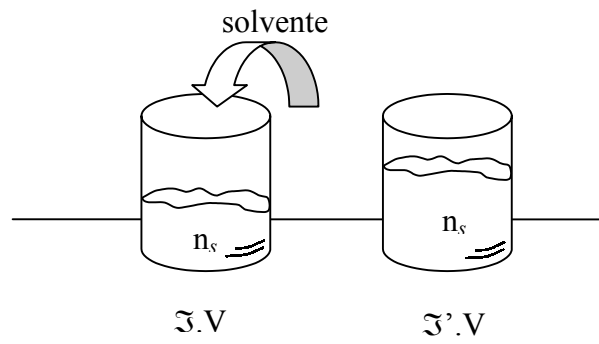


Figura 30 - Esquema de diluição de uma solução.

Desse modo, tendo-se o valor de concentração inicial da solução, do volume inicial e do volume final, consegue-se encontrar o novo valor de concentração da solução diluída [100].

## REFERÊNCIAS

---

- 1 HILL, K. O.; FUJII, Y.; JOHNSON, D. C., and KAWASAKI, B. S. “Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication”, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 32, no. 10, 647-649, May 1978.
- 2 LAM, D. K. W.; GARSIDE, B. K. “Characterization of single-mode optical fiber filters”, *Appl. Opt.*, vol. 20, 1981, p. 440-445.
- 3 STONE, J. “Photorefractivity in GeO<sub>2</sub>-doped silica fibers”, *Journ. Appl. Phys.*, vol. 62, 1987. p. 4371-4374.
- 4 MELTZ, G.; W. W. MOREY and W. H. Glenn. “Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method”, *Optics Letters*, vol. 14, 1989, p. 823-825.
- 5 OTHONOS, A.; KALLI, K. “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”, Artech House : Norwood, 1999.
- 6 VENGSARKAR, A. M.; LEMAIRE, P. J.; JUDKINS, J. B.; BATHIA, V.; ERDOGAN, T.; and SIPE, J. E. “Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters”, *Journal of Lightwave Technology*, vol. 14, no. 1, Jan. 1996.
- 7 VENGSARKAR, A. M.; PEDRAZZANI, J. R.; JUDKINS, J. B.; LEMAIRE, P. J.; BERGANO, N. S.; and DAVIDSON, C. R. “Long-period fiber-grating-based gain equalizers”, *Optics Letters*, vol. 21, no. 5, 336-338, March 1996.

- 
- 8 WYSOCKI, P. F.; JUDKINS, J. B.; ESPINDOLA, R. P.; ANDREJCO, M.; VENGSARKAR, A. M. "Broad-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Flattened Beyond 40 nm Using Long-Period Grating Filter", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 9, no. 10, 1343-1345, October 1997.
  - 9 KERSEY, A. D.; DAVIS, M. A.; PATRICK, H. J.; LEBLANC, M.; KOO, K. P.; ASKINS, C. G.; M. A. PUTNAM, FRIEBELE, E. J. "Fiber Grating Sensors", Journal of Lightwave Technology, vol. 15, no. 8, 1442-1463, August 1997.
  - 10 BHATIA, V.; VENGSARKAR, A. M. "Optical fiber long-period grating sensors", Optics Letters, vol. 21, no. 9, 692-694, May 1996.
  - 11 PATRICK, H. J.; KERSEY, A. D.; BUCHOLTZ, F. "Analysis of the Response of Long Period Fiber Gratings to External Index of Refraction", Journal of Lightwave Technology, vol. 16, no. 9, 1606-1612, September 1998.
  - 12 MELTZ, G.; MOREY, W. W.; HEWLET, S. J.; and LOVE, J. D. "Photosensitivity and Quadratic Nonlinearity in Glass Waveguides: Fundamentals and Applications", OSA Technical Digest Series, PMB4, vol. 22, 1995.
  - 13 RATHJE, J.; SVALGAARD, M.; HÜBNER, J.; KRISTENSEN, M. "Sensitivity of a long-period optical fiber gratings bend sensor", in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC'98, Technical Digest, p. 238-239, 1998.
  - 14 JANG, J.-N.; KIM, S. Y.; KIM, S.-W. and KIM, M.-S. "Temperature insensitive long-period fibre gratings", Electronics Letters, vol. 35, no. 24, November 1999.
  - 15 ABRAMOV, A. A.; HALE, A.; WINDELER, R. S. and STRASSER, T. A. "Widely tunable long-period gratings", Electronics Letters, vol. 35, no. 1, 81-82, January 1999.

- 
- 16 BHATIA, V.; BURFORD, M. K.; MURPHY, K. A.; VENGSARKAR, A. M. “Long-period fiber grating sensors”, in *Optical Fiber Communications*, 1996, OFC’96, p. 265-266.
- 17 PATRICK, H. J.; WILLIAMS, G. M.; KERSEY, A. D.; PEDRAZZANI, J. R.; VENGSARKAR, A. M.; “Hybrid Fiber Bragg Grating/ Long Period Fiber Grating Sensor for Strain/Temperature Discrimination”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, no. 9, 1223-1225, September 1996.
- 18 ZHANG, L.; FALLON, R.; EVERALL, L. A.; WILLIAMS, J. A. R.; BENNION, I. “Large-dynamic-range and high-resolution from a strain sensing system using long-period grating interrogating FBG strain sensor”, in *24<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication*, 1998, ECOC 1998, vol. 1, p. 609-610.
- 19 GUAN, Bai-Ou; MAN, Wai-Sing; TAM, Hwa-Yaw; TAO, Xiao-Ming; DONG, Xiao-Yi. “Cladding Mode Effect in Superstructure Fiber Bragg Gratings and Its Applications in Simultaneous Strain and Temperature Measurement”, *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, 2001, OFC 2001, vol. 3, WDD79-WD1-3.
- 20 SHIMA, K.; HIMENO, K. SAKAI, T.; OKUDE, S.; WADA, A.; YAMAUCHI, R. “A novel temperature-insensitive long-period fiber grating using a boron-codoped-germanosilicate-core fiber”, in *Conference on Optical Fiber Communication*, 1997, OFC 97, p. 347-348.
- 21 BHATIA, V.; CAMPBELL, D. K.; D’ALBERTO, T.; EYCK, G. A. T.; SHERR, D.; MURPHY, K. A.; CLAUS, R. O. “Standart optical fiber long-period gratings with

- 
- reduced temperature sensitivity for strain and refractive index-sensing”, in Conference on Optical Fiber Communication, 1997, p. 346-347.
- 22 QIN, L.; WEI, Z. X.; WANG, Q. Y.; LI, H. P.; ZHENG, W.; ZHANG, Y. S.; GAO, D. S. “Compact temperature-compensating package for long-period fiber gratings”, *Optical Materials*, vol. 14, 239-242, 2000.
- 23 LIU, Y.; ZHANG, L. and BENNION, I. “Fibre optic clad sensors with high transverse strain sensitivity based on long-period gratings in B/Ge co-doped fibre”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 8, April 1999.
- 24 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*, vol. 12, no. 5, 531-533, May 2000.
- 25 GWANDU, B. A. L.; SHU, X. W.; LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, L.; BENNION, I. “Simultaneous measurement of strain and curvature using superstructure fibre Bragg gratings”, *Sensors and Actuators A*, vol. 96, 133-139, 2002.
- 26 LIN, C. Y. and WANG, L. A. “Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 21, 1872-1873, October 1999.
- 27 DIANOV, E. M.; STARODUBOV, D. S.; VASILIEV, S. A.; FROLOV, A. A.; MEDVEDKOV, O. I., “Near-UV photosensitivity of germanosilicate glass: application for fiber grating fabrication”, in Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting, 1996, LEOS 96, IEEE, vol. 1, p. 374-375.
- 28 VASILIEV, S. A.; DIANOV, E. M.; GOLANT, K. M.; MEDVEDKOV, O. I.; TOMASSHUK, A. L.; KARPOV, V. I.; GREKOV, M. V.; KURKOV, A. S.; LECONTE,

- 
- B.; NIAY, P. "Performance of Bragg and Long-Period Gratings Written in N- and Ge-Doped Silica Fibers under  $\gamma$ -Radiation", IEEE Transactions on Nuclear Science, vol. 45, no. 3, 1580-1583, June 1998.
- 29 SAVIN, S.; DIGONNET, M. J. F.; KINO, G. S. and SHAW, H. J. "Tunable mechanically induced long-period fiber gratings", Optics Letters, vol. 25, no. 10, 710-712, May 2000.
- 30 NARAYANAN, C.; PRESBY, H. M.; VENGSARKAR, A. M. "Band-rejection fiber filter using periodic core deformation", Electronics Letters, vol. 33, no. 4, 280-281, February 1997.
- 31 DAVIS, D. D.; GAYLORD, T. K.; GLYTSIS, E. N.; KOSINSKI, S. G.; METTLER, S. C.; VENGSARKAR, A. M. "Long-period fibre grating fabrication with focused CO<sub>2</sub> laser pulses", Electronics Letters, vol. 34, no. 3, 302-303, February 1998.
- 32 DAVIS, D. D.; GAYLORD, T. K.; GLYTSIS, E. N.; METTLER, S. C. "CO<sub>2</sub> laser induced long-period fibre gratings: spectral characteristics, cladding modes and polarization independence", Electronics Letters, vol. 34, no. 14, 1416-1417, July 1998.
- 33 HAN, Y. G., PARK, H. S.; HAN, W. T.; LEE, B. H.; PAEK, U. C.; CHUNG, Y.; KIM, C. S. "Temperature stability and mechanical strength of long-period fiber gratings fabricated with CO<sub>2</sub> laser", in Conference on Optical Fiber Communication, 2000, vol. 1, p. 26-28.
- 34 DIANOV, E. M.; KARPOV, V. I.; GREKOV, M. V.; GOLANT, K. M.; VASILIEV, S. A.; MEDVEDKOV, O. I.; KHRAPKO, R. R. "Thermo-induced long-period fibre gratings", in 11<sup>th</sup> International Conference on Integrated Optics and Optical Fibre Communications, and 23<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication (Conf. Publ. no. 448), vol. 2, p. 53-56, 1997.

- 
- 35 ENOMOTO, T.; SHIGEHARA, M.; ISHIKAWA, S.; DANZUKA, T.; KANAMORI, T. "Long-period fiber grating in a pure-silica fiber written by residual stress relaxation", in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC'98, Technical Digest, 1998, p. 277-278.
- 36 KARPOV, V. I.; GREKOV, M. V.; DIANOV, E. M.; GOLANT, K. M.; VASILIEV, S. A.; MEDVEDKOV, O. I.; KHRAPKO, R. R. "Mode-field converters and long-period gratings fabricated by thermo-diffusion in nitrogen-doped silica-core fibers", in Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998, OFC'98, Technical Digest, 1998, p. 279-280.
- 37 GODBOUT, N.; DAXHELET, X.; MAURIER, A. and LACROIX, S. "Long-period fiber grating by electrical discharge", in 24<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, 1998, vol. 1, p. 397-398.
- 38 REGO, G.; OKHOTNIKOV, O.; DIANOV, E. and SULIMOV, V. "High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced Using an Electric Arc", Journal of Lightwave Technology, vol. 19, no. 10, 1574-1579, October 2001.
- 39 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, vol. 191, 181-185, June 2001.
- 40 VASILIEV, S. A.; DIANOV, E. M.; VARELAS, D.; LIMBERGER, H. G.; and SALATHÉ, R. P. "Postfabrication resonance peak positioning of long-period cladding-mode-coupled gratings", Optics Letters, vol. 21, no. 22, 1830-1832, November 1996.



- 
- 41 CHIANG, K. S.; LIU, Y.; NG, M. N. and DONG, X. "Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 11, 966-967, May 2000.
- 42 YIN, Shizhuo.; LEONOV, O.; CHING, Kun-Wook; KURTZ, P.; REICHARD, K.; LIU, K.; ZHANG, Q. "Wavelength tuning range enhancement single resonant band fiber filter using a long period grating (LPG) with ultra thin cladding layer", in *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, vol. 1, p. 23-25.
- 43 XU, M. G.; MAASKANT, R.; OHN, M. M.; ALAVIE, A. T. "Independent tuning of cascaded long period fibre gratings for spectral shaping", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 22, 1893-1894, October 1997.
- 44 COSTANTINI, D. M.; LIMBERGER, H. G.; SALATHE, R. P.; MULLER, C. A. P.; VASILIEV, S. A. "Tunable loss filter based on metal coated long period grating", in *24<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication*, 1998, vol. 1, p. 391-392.
- 45 DUHEM, O.; DACOSTA, A.; HENNINOT, J. F. and DOUAY, M. "Long period copper-coated as an electrically tunable wavelength-selective filter", *Electronics Letters*, vol. 35, no. 12, 1014-1016, June 1999.
- 46 QIAN, J. R. and CHEN, H. F. "Gain flattening fibre filters using phase-shifted period fibre gratings", *Electronics Letters*, vol. 34, no. 11, 1132-1133, May 1998.
- 47 LIU, Y.; WILLIAMS, J. A. R.; ZHANG, L.; BENNION, I. "Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings", *Optics Communications*, vol. 164, 27-31, June 1999.

- 
- 48 KE, H.; CHIANG, K. S. and PENG, J. H. “ Analysis of Phase-Shifted Long-Period Fiber Gratings”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 10, no. 11, 1596-1598, November 1998.
- 49 CHEN, L. R. “Phase-shifted long-period gratings by refractive index-shifting”, Optics Communications, vol. 200, 187-191, December 2001.
- 50 LEE, B. H.; NISHII, J. “Notch filters based on cascaded multiple long-period fibre gratings”, Electronics Letters, vol. 34, no. 19, September 1998.
- 51 LEE, B. H. and NISHII, J. “Self-interference of long-period fibre grating and its application as temperature sensor”, Electronics Letters, vol. 34, no. 21, 2059-2060, October 1998.
- 52 DAS, M. and THYAGARAJAN, K. “Wavelength-division multiplexing isolation filter using concatenated chirped long period gratings”, Optics Communications, vol. 197, 67-71, September 2001.
- 53 GRUBSKY, V.; SKORUCAK, A.; STARODOBOV, D. S. and FEINBERG, J. “Fabrication of Long-Period Gratings with No Harmonics”, IEEE Photonics Technology Letters, vol. 11, no. 1, 87-89, January 1999.
- 54 HARUMOTO, M.; SHIGEHARA, M.; KAKUI, M.; KANAMORI, H. and NISHIMURA, M. “Compact long-period grating module with multi-attenuation peaks”, Electronics Letters, vol. 36, no. 6, 512-514, March 2002.
- 55 JEONG, H. and OH, K. “Enhancement of free spectral range in the resonance peaks in a long-period fiber grating by controlling clad mode material dispersion”, in Conference on Lasers and Electro-Optics, 2000, CLEO 2000, p. 430-432.

- 
- 56 JEONG, H. and OH, K. "Enhancement of free spectral range of the resonance peaks in a long-period fiber grating by controlling material dispersion of cladding modes", *Optics Communications*, vol. 199, 103-110, November 2001.
- 57 STARODUBOV, D. S.; GRUBSKY, V.; and FEINBERG, J. "All-Fiber Bandpass Filter with Adjustable Transmission Using Cladding-Mode Coupling", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 11, 1590-1592, November 1998.
- 58 KURKOV, A. S.; DOUAY, M.; DUHEM, O.; LELEU, B.; HENNIOT, J. F.; BAYON, J. F.; and RIVOALLAN, L. "Long-period fibre grating as a wavelength selective polarisation element", *Electronics Letters*, vol. 33, no. 7, 616-617, March 1997.
- 59 ORTEGA, B.; DONG, L.; LIU, W. F.; SANDRO, J. P.; REEKIE, L.; TSYPIA, S. I.; BAGRATASHVILI, V. N.; LAMING, R. I. "High-Performance Optical Fiber Polarizers Based on Long-Period Gratings in Birefringent Optical Fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 9, no. 10, 1370-1372, October 1997.
- 60 KURKOV, A. S.; DOUAY, M.; DUHEM, O.; LELEU, B.; HENNIOT, J. F.; BAYON, J. F.; RIVOALLAN, L. "Conception of an all-fibre wavelength selective polarizer using a long-period grating", in *IEE Colloquium on Optical Fibre Gratings (Digest no. 1997/037)*, 1997, p. 8/1 a 8/5.
- 61 DUHEM, O. and DOUAY, M. "Effect of UV-induced birefringence on long-period-grating coupling characteristics", *Electronics Letters*, vol. 36, no. 5, 416-417, March 2000.
- 62 ESPINDOLA, R. P.; WINDELER, R. S.; ABRAMOV, A. A.; EGGLETON, B. J.; STRASSER, T. A. and DIGIOVANNI, D. J. "External refractive index insensitive air-

- 
- clad long period fibre grating”, *Electronics Letters*, vol. 35, no. 4, 327-328, February 1999.
- 63 KAKARANTZAS, G.; ROUX, R. L.; BIRKS, T. A. “Transmission filters based on periodically micro-tapered fibers”, in *Conference on Lasers and Electro-Optics, 2000, CLEO 2000*, p. 574-575.
- 64 DONG, L.; REEKIE, L. and CRUZ, J. L. “Long period gratings formed in depressed cladding fibres”, *Electronics Letters*, vol. 33, no. 22, 1897-1898, October 1997.
- 65 SHU, X.; ALLSOP, T.; GWANDU, B.; ZHANG, L. and BENNION, I. “Room-temperature operation of widely tunable loss filter”, *Electronics Letters*, vol. 37, no. 4, 216-218, February 2001.
- 66 SHU, X.; ALLSOP, T.; GWANDU, B.; ZHANG, L. and BENNION, I. “Thermally tunable optical fiber loss filter with wide tuning range”, in *Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics, 2001, CLEO 2001, Technical Digest*, p. 126-127.
- 67 NG, M. N.; CHEN, Z.; CHIANG, K. S. “Temperature Compensation of Long-Period Fiber Grating for Refractive-Index Sensing With Bending Effect”, *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 3, 361-362, March 2002.
- 68 DUHEM, O.; HENNINOT, J. F.; WARENGHEM, M.; DOUAY, M.; RIVOALLAN, L. “Long period fiber gratings modulation by liquid crystal cladding”, in *6<sup>th</sup> Conference on Telecommunications, 1998, Conf. Public. no. 451*, p. 195-197, April 1998.

- 
- 69 YIN, S.; CHUNG, K.-W., ZHU, X. "A highly sensitive long period grating based tunable filter using a unique double-cladding layer structure", *Optics Communications*, vol. 188, 301-305, February 2001.
- 70 YIN, S.; CHUNG, K.-W.; ZHU, X. "A novel all-optic tunable long-period grating using a unique double-cladding layer", *Optics Communications*, vol. 196, 181-186, September 2001.
- 71 DUHEM, O.; HENNINOT, J. F.; DOUAY, M. "Study of in fiber Mach-Zehnder interferometer based on two spaced 3-dB long period gratings surrounded by a refractive index higher than of silica", *Optics Communications*, 255-262, June 2000.
- 72 SHU, X.; ZHANG, L. and BENNION, I. "Fabrication and characterization of ultra-long – period fibre gratings", *Optics Communications*, vol. 203, 277-281, March 2002.
- 73 VRIES, M.; BHATIA, V.; D'ALBERTO, T.; ARYA, V. and CLAUS, R. O. "Photoinduced gratings-based optical fiber sensors for structural analysis and control", *Engineering Structures*, vol. 20, no. 3, 205-210, 1998.
- 74 PATRICK, H. J.; CHANG, C. C. and VOHRA, S. T. "Long period fibre gratings for structural bend sensing", *Electronics Letters*, vol. 34, no. 18, 1773-1775, September 1998.
- 75 CHEN, W. T. and WANG, L. A. "Optical coupling between singlemode fibres by utilising long-period fibre gratings", *Electronics Letters*, vol. 35, no. 5, March 1999.
- 76 FALCIAI, R.; MIGNANI, A. G.; VANNINI, A. "Long period gratings as solution concentration sensors", *Sensors and Actuators B*, vol. 74, 74-77, 2001.

- 77 SHU, X.; ZHU, X.; JIANG, S.; SHI, W. and HUANG, D. "High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes", *Electronics Letters*, vol. 35, no. 18, September 1999.
- 78 SHU, X. and HUANG, D. "High sensitive chemical sensor based on the measurement of separation of dual resonant peaks in a 100- $\mu\text{m}$ -period fiber grating", *Optics Communications*, vol. 171, November 1999.
- 79 ALLSOP, T.; ZHANG, L.; BENNION, I. "Detection of organic aromatic compound in paraffin by a long-period fiber grating optical sensor with optimized sensitivity", *Optics Communications*, vol. 191, 181-190, May 2001.
- 80 KUEH, S. R. M.; PARNAS, R. S.; ADVANI, S. G. "A methodology for using long-period gratings and mold-filling simulations to minimize the intrusives of flow sensors in liquid composite molding", *Composites Science and Technology*, vol. 62, 311-327, 2002.
- 81 COOPER, K. R.; ELSTER, J.; JONES, M. and KELLY, R. G. "Optical Fiber-Based Corrosion Sensor Systems for Health Monitoring of Aging Aircraft", *AUTOTESTCON Proceedings*, 2001, IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2001, p. 847-856.
- 82 DAS, M. and THYAGARAJAN, K. "Dispersion compensation in transmission using uniform long period fiber gratings", *Optics Communications*, vol. 190, 159-163, April 2001.
- 83 LEE, Byeong Ha; CHUNG, Youngjoo; HAN, Won-Taek, and PAEK, Un-Chul. "Dispersion measurement using fiber gratings", in *Optical Fiber Communication Conference*, 2000, vol. 2, pg. 34-36.

- 
- 84 AGRAWAL, G. P. "Fiber-Optic Communication Systems". John Wiley & Sons : New York, 2 nd. Edition, 1997, p. 24-34.
- 85 GOWAR, J. "Optical Communication Systems". Prantice Hall International: London, 1984, p. 130 e 534-536.
- 86 ERDOGAN, T. "Cladding-mode resonances in short- and long- period fiber grating filters", J. Opt. Soc. Am. A, vol. 14, no. 8, 1760-1773, August 1997.
- 87 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", vol. 11, no. 4, 445-447, April 1999.
- 88 OTHONOS, A. "Fiber Bragg gratings", Rev. Sci. Instrum., vol. 68, no. 12, 4309-4341, December 1997.
- 89 ZHANG, L.; LIU, Y.; EVERALL, L.; WILLIAMS, J. A. R. and BENNION, I. "Design and Realization of Long-Period Grating Devices in Conventional and High Birefringence Fibers and Their Novel Applications as Fiber-Optic Load Sensors", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 5, no. 5, 1373-1378, September/October 1999.
- 90 HILL, K.O., MALO, B., BILODEAU, F., JOHNSON, D.C., "Photosensitivity in Optical Fibers", Ann. Ver. Mater. Sci., vol. 23, 125-157, 1993.
- 91 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, 1998, p. 276-277.
- 92 SAKAGUCHI, S. "Evaluation of the critical cooling rate in glass-forming materials based on viscosity", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 185, 268-273, 1995.
- 93 SAKAGUCHI, S.; TODOROKI, S.; MURATA, T. "Rayleigh scattering in silica glass with heat treatment", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 220, 178-186, 1997.
- 94 SAKAGUCHI, S.; TODOROKI, S. "Viscosity of silica core optical fiber", *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 244, 232-237, 1999.
- 95 FABRIS, J. L.; GÓES, R. E.; FALATE, R. e MÜLLER, M. "Sistema Integrado para Caracterização Ótica de Materiais", *Rev. Fis. Aplic. e Instr.*, vol. 14, no. 2, 38-44, June 1999.
- 96 HWANG, I. K.; YUN, S. H.; GENTZSCH, E., and KIM, B. Y. "Profile-controlled long-period fiber gratings based on period microbends", in *Optical Fiber Communication Conference, 1999, and the International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, OFC/IOOC '99, Technical Digest*, vol. 4, 177-179, 1999.
- 97 TIPLER, P. "Luz", em *Física para cientistas e engenheiros*, vol. IV, Eds. Guanabara Koogan S.A.: Rio de Janeiro, 1991, pp. 41.
- 98 LIDE, D. R. *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC press, version 2001. [<http://www.hbcnetbase.com/hbcp/default.jsp>]. (20 Jun. 2002).
- 99 BUENO, W.; BOODTS, J. F. C.; DEGREVE, L.; LEONE, F. A. "Soluções", em *Química Geral*, Ed. McGraw-Hill do Brasil: São Paulo, 1978, pp. 29-32, 307-315.



---

100 O'CONNOR, R. "Soluções Aquosas", em Fundamentos de Química, Ed. Harper & Row do Brasil: São Paulo, 1977, pp. 215-226.