

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

---

**DISSERTAÇÃO**  
apresentada à UTFPR  
para obtenção do grau de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

por

**FRANCELLI KLEMBA**

---

**SENSORES ÓTICOS A FIBRA APLICADOS  
À ÁREA DE PETRÓLEO**

---

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

**Prof. Dr. José Luís Fabris**

**UTFPR**

Examinadores:

**Prof. Dr. Armando Dias Tavares Jr.**

**UERJ**

**Profa. Dr. Márcia Müller**

**UTFPR**

Curitiba, novembro de 2005.

**FRANCELLI KLEMBA**

**SENSORES ÓTICOS A FIBRA APLICADOS  
À ÁREA DE PETRÓLEO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do grau de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Informática Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Co-orientador: Profa. Dr. Márcia Müller

Curitiba

2005

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

K64s Klemba, Francelli  
Sensores óticos a fibra aplicados à área de petróleo / Francelli Klemba. –  
Curitiba : [s.n.], 2005.  
xi, 67 p. : il. ; 30 cm

Orientador : Prof. Dr. José Luís Fabris  
Co-orientadora : Profª Drª Márcia Muller  
Dissertação (Mestrado) – UTFPR. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2005.  
Bibliografia : p. 65-7

1. Fibras óticas. 2. Redes de Bragg. 3. Redes de período longo. 4. Detectores óticos. 5. Refração. 6. Temperatura. 7. Hidrocarbonetos. I. Fabris, José Luís, orient. II. Muller, Márcia, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD : 621.3692  
CDU : 681.7.068

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, José e Luci,  
e em especial ao meu esposo, Luiz e à minha filha, Renata.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Ao apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR), da CAPES, do CNPq e da Fundação Araucária.

Ao Prof. Dr. José Luís Fabris e à Profa. Dr. Márcia Müller, pela orientação e apoio durante o mestrado.

A todos os colegas do Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações, aos demais amigos, professores e funcionários da UTFPR, pela amizade, apoio e incentivo.

Aos meus familiares, que sempre me incentivaram e me encorajaram ao longo deste trabalho.

E em especial ao meu esposo, Luiz e minha filha, Renata, pelo amor, compreensão, dedicação e pelo tempo de suas vidas dedicadas a mim.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 MOTIVAÇÕES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
<b>CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE</b> .....	5
<b>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	9
3.1 FIBRA ÓTICA.....	9
3.2 PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRA ÓTICA.....	10
3.3 REDES EM FIBRAS ÓTICAS.....	14
3.3.1 Redes de Bragg.....	14
3.3.2 Redes de Período Longo.....	17
3.4 TÉCNICAS DE REALCE DA FOTOSSENSIBILIDADE.....	19
3.5 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA.....	20
3.6 SENSIBILIDADE DAS REDES DE PERÍODO LONGO AO MEIO EXTERNO E À TEMPERATURA.....	21
3.7 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE REDES DE BRAGG.....	23
3.7.1 Técnica Interferométrica.....	23
3.7.2 Técnica com Máscara de Fase.....	24
3.7.3 Técnica Interferométrica com Máscara de Fase.....	26
3.8 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO.....	26
3.8.1 Técnicas com UV Ponto-a-Ponto e com Máscara de Amplitude.....	27
3.8.2 Técnicas com Laser de CO <sub>2</sub> e com Arco Elétrico.....	28

<b>CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA</b> .....	31
4.1 LEITURA E GRAVAÇÃO DE REDES.....	31
4.1.1 LPG Produzida com Arco Elétrico.....	31
4.1.2 FBG Produzida com Interferômetro e Máscara de Fase.....	33
4.1.3 FBG Produzida com Máscara de Fase.....	34
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES.....	36
4.2.1 Redes de Período Longo.....	36
4.2.2 Redes de Bragg.....	38
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS</b> .....	41
5.1 REDES DE PERÍODO LONGO NA IDENTIFICAÇÃO DE FLUIDOS.....	41
5.2 REDES DE BRAGG NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA.....	46
5.3 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG ESTREITAS.....	56
<b>CAPÍTULO 6 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES</b> .....	59
6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS LPG.....	59
6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRATAMENTO TÉRMICO DAS FBG.....	60
6.3 TRABALHOS FUTUROS.....	62
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	65

## LISTA DE FIGURAS

1	Diagrama esquemático de uma fibra ótica.....	9
2	(a) Fibra multimodo de índice degrau; (b) Fibra multimodo de índice gradual; (c) Fibra monomodo de índice degrau.....	10
3	Acoplamento entre os modos co e contra-propagante por uma rede de Bragg com período e índice de modulação constante.....	15
4	Acoplamento entre os modos propagante e co-propagante por uma rede de período longo com período e índice de modulação constante.....	18
5	Técnica interferométrica de escrita de redes de Bragg em fibras óticas.....	24
6	Técnica de escrita de redes de Bragg em fibras óticas, utilizando máscara de fase.....	25
7	Escrita de redes de Bragg em fibras óticas, utilizando a técnica interferométrica com máscara de fase.....	26
8	Sistema de gravação de redes de período longo usando laser UV, que pode ser usado nas técnicas ponto-a-ponto e com máscara de amplitude.....	27
9	Sistema de gravação de LPG com laser de CO <sub>2</sub> .....	28
10	Gravação de LPG com arco elétrico.....	29
11	Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação das LPG.....	31
12	Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG com interferômetro e máscara de fase.....	33
13	Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG com máscara de fase.....	35
14	Suporte ótico do sistema de gravação de FBG com máscara de fase contendo: a fibra, a máscara de fase e a lente cilíndrica.....	35
15	Caracterização da rede de período longo utilizando amostras de hidrocarbonetos.....	37
16	Caracterização térmica das redes de Bragg usando um elemento <i>Peltier</i> .....	38
17	Tratamento térmico da FBG imersa em água.....	39
18	Tratamento térmico das FBG utilizando um forno de laboratório.....	40
19	Espectros de transmissão da fibra obtidos antes do início da gravação (00 pontos), e durante o processo de gravação após 20, 30, 40, 50 e 60 pontos de interação.....	41



20	Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação.....	42
21	Posição do vale de atenuação da LPG ( $\lambda = 595 \mu\text{m}$ , 50 pontos) quando fluem no duto as amostras (1 - álcool, 2 – gasolina, 3 - aguarrás, 4 – tiner, 5 – querosene) em dois ciclos de amostragem.....	43
22	Deslocamento do vale de atenuação da LPG ( $\lambda = 600 \mu\text{m}$ , 60 pontos) quando da presença de amostras de: 1 - álcool, 2 – aguarrás, 3 - tiner, 4 – nafta, 5 – querosene, 6 – gasolina.....	44
23	Deslocamento relativo em comprimento de onda da LPG em função ao índice de refração das amostras.....	45
24	Espectro de reflexão da rede 2.....	47
25	Caracterização da FBG (rede 4) com o <i>Peltier</i> no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento.....	48
26	Comprimento de onda versus temperatura (rede 4), mantida por três horas e vinte minutos em um forno de laboratório, com temperatura variando entre 100 °C e 198 °C.....	49
27	Evolução do comprimento de onda (rede 4) no forno.....	49
28	Desvio no comprimento de onda (rede 2) mantida por uma hora no forno a 190 °C....	50
29	Refletividade em função do tempo (rede 2) no forno.....	51
30	Caracterização da FBG (rede 4) com o <i>Peltier</i> no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento, após a rede ter sido submetida ao tratamento térmico.....	52
31	Análise da histerese para as redes gravadas em fibra SMF antes do tratamento térmico. Os desvios foram medidos a temperatura de 7 °C.....	52
32	Análise do comprimento de onda a temperatura de 7 °C para as redes gravadas em fibra SMF hidrogenada.....	53
33	Espectro de reflexão da rede S2, no interior do forno a 190 °C.....	55
34	Refletividade da rede S2 dentro do forno em função do tempo.....	55
35	Espectros de reflexão das redes A e B gravadas com máscara de fase.....	57
36	Ajuste gaussiano da rede 2, gravada utilizando o interferômetro e a máscara de fase..	58
37	Ajuste gaussiano da rede B, gravada com máscara de fase.....	58

## LISTA DE TABELAS

1	Índice de refração das amostras e correspondentes deslocamentos relativos no comprimento de onda da LPG.....	45
2	Parâmetros das FBG (fibra SMF hidrogenada) utilizadas nos experimentos.....	46
3	Parâmetros das FBG (fibra fotossensível) utilizadas nos experimentos.....	47
4	Comprimento de onda de Bragg das redes.....	54
5	Sensibilidade das redes.....	56
6	Parâmetros das FBG (fibra fotossensível) produzidas com a técnica de máscara de fase.....	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FBG	- Rede de Bragg ( <i>Fiber Bragg Grating</i> )
LED	- <i>Ligth Emission Diode</i>
LPG	- Rede de período longo ( <i>Long Period Grating</i> )
OSA	- <i>Optical Spectrum Analyser</i>
PZT	- Piezoelétrico
SMF	- <i>Single Mode Fiber</i>
UTFPR	- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
UV	- Ultravioleta

## RESUMO

Este trabalho descreve a produção de redes de Bragg e de período longo em fibras óticas, e a caracterização destas redes como dispositivos sensores na detecção de hidrocarbonetos que fluem em polidutos, bem como na monitoração de sua temperatura. O trabalho foi realizado no Laboratório de Laser da UTFPR. As redes de período longo foram produzidas pela aplicação ponto-a-ponto do arco elétrico de uma máquina de emendas de fibras óticas e caracterizadas como sensores de índices de refração de meios exteriores à fibra. Essa caracterização foi realizada usando diferentes amostras de fluidos tais como, álcool, gasolina, aguarrás, tiner, querosene e nafta. O maior deslocamento em comprimento de onda apresentado pela rede foi de 15,57 nm na presença do querosene. A sensibilidade média ao índice de refração da rede foi  $2,6 \times 10^{-6} \text{ pm}^{-1}$  para a região compreendida entre 1,432 (tiner) e 1,448 (querosene). Esta sensibilidade resulta em uma mínima variação de índice de refração de  $2,6 \times 10^{-5}$  que pode ser medida por um analisador de espectros óticos com precisão em comprimento de onda de  $\pm 5 \text{ pm}$ . O tempo de resposta do sensor foi da ordem de 3 segundos. As redes de Bragg foram caracterizadas como dispositivo sensor de temperatura dos fluidos. As redes de Bragg foram produzidas inicialmente em fibras SMF hidrogenadas e posteriormente em fibras fotossensíveis, utilizando a técnica de escrita interferométrica com máscara de fase e laser ultravioleta. Os dispositivos foram caracterizados como sensor de temperatura, tendo sido feito um estudo para estabilização térmica dos mesmos. A sensibilidade das redes variou desde  $10,2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  até  $11,4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . A precisão deste tipo de sensor está intimamente relacionada com a largura de banda espectral da rede, portanto, um sistema de gravação utilizando a técnica de escrita com máscara de fase e laser UV foi implementado, tornando possível a escrita de redes mais longas com menor largura de banda.

## ***ABSTRACT***

This work describes the production of fiber Bragg gratings and long period gratings in optical fibers and their characterization as sensors devices in the detection of hydrocarbons that flow in pipelines, as well as its temperature measurement. The work was accomplished at Laser Laboratory of UTFPR. The long period gratings were produced using the point-to-point electric arc discharge technique from a splice machine and characterized as refractive index sensors of the fiber surroundings. The characterization was accomplished using different samples of alcohol, gasoline, turpentine, thinner, kerosene and naphtha. The biggest wavelength shift presented by the grating was 15.57 nm in the presence of the kerosene. The average refractive index grating sensitivity was  $2.6 \times 10^{-6} \text{ pm}^{-1}$  in the range from 1.432 (thinner) to 1.448 (kerosene). This sensitivity relates to a smallest refractive index variation of  $2.6 \times 10^{-5}$  that can be measured, for an optical spectrum analyzer with wavelength precision of  $\pm 5 \text{ pm}$ . The response time of the sensor was 3 seconds for the different samples used. The fiber Bragg gratings were characterized as temperature sensor devices of the samples. The gratings were produced both in SMF hydrogenated and photosensitive fibers, using an ultraviolet laser and a phase mask interferometer. The devices were characterized as temperature sensors, and a study for thermal stabilization of them was carried out. The obtained sensor sensitivity ranged from  $10.2 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  up to  $11.4 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . As the precision of this type of sensor is related to the bandwidth of the fiber Bragg grating, a writing system technique based on a phase mask and an UV laser was implemented, making possible the writing of long and narrow bandwidth gratings.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 MOTIVAÇÕES

O avanço tecnológico da segunda metade do século XX resultou num interesse crescente por parte dos pesquisadores em alguns campos da ótica. Com os computadores de alta velocidade, ocorreu grande aperfeiçoamento nos projetos de sistemas óticos, e as fibras óticas passaram a substituir os fios condutores metálicos para a transmissão de dados. Além do uso nos sistemas de telecomunicações e transmissão a longa distância, as fibras óticas passaram a ser utilizadas também, no desenvolvimento de dispositivos como sensores, lasers e amplificadores.

Os conceitos de sensores a fibras óticas, constantes das primeiras patentes registradas em meados dos anos 60, foram aplicados em sensores de deslocamento mecânico baseado em feixes de fibras (DAKIN e CULSHAW, 1997), e desde então estes sensores têm despertado um crescente interesse dos pesquisadores.

Dos dispositivos sensores a fibra ótica, os mais utilizados atualmente são as redes de Bragg e as redes de período longo. Os sensores baseados em redes de Bragg têm sido utilizados para a monitoração da variação de temperatura e tensões longitudinais (PATRICK *et al*, 1996), e ainda na detecção de vazamentos de hidrocarbonetos em polidutos e em tanques reservatórios (SPIRIN *et al*, 2000). Por outro lado, os sensores baseados em redes de período longo, além de serem sensíveis à variação de temperatura e tensões longitudinais, são também sensíveis ao índice de refração do meio circunvizinho à rede (BATHIA e VENGSARKAR, 1996 e PATRICK *et al*, 1997) possibilitando, portanto, o seu uso na detecção de substâncias.

Dentre as principais motivações para o desenvolvimento de sensores está a necessidade de acompanhamento das diversas etapas dos processos industriais automatizados. Particularmente no setor de petróleo, é desejável que esses sensores não produzam faíscas elétricas que poderiam resultar em acidentes com produtos inflamáveis.

Os sensores a fibra ótica vêm de encontro a estas necessidades uma vez que as características únicas das fibras óticas tornam os sensores compactos, leves, imunes a interferências eletromagnéticas e possibilitam o monitoramento em tempo real.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é produzir redes de Bragg e de período longo em fibras óticas, caracterizá-las e estudar sua aplicação como dispositivos sensores na detecção de hidrocarbonetos que fluem em polidutos, e na monitoração da temperatura no interior dos polidutos. As redes deverão ser produzidas e caracterizadas no laboratório de Laser da UTFPR. As redes de período longo serão produzidas pela aplicação ponto a ponto do arco elétrico de uma máquina de emendas de fibras óticas. Como a rede de período longo é sensível a variações no índice de refração do meio exterior à fibra, a sua caracterização será feita utilizando diferentes amostras de fluidos tais como, álcool, gasolina, aguarrás, tiner, querosene e nafta. Devido aos diferentes índices de refração destas substâncias deverá ocorrer um deslocamento no comprimento de onda do vale de atenuação da rede quando esta entrar em contato com as diversas amostras, permitindo a construção e calibração de um dispositivo sensor. Além das redes de período longo, deverão ser produzidas e caracterizadas redes de Bragg como dispositivos sensores de temperatura aplicáveis nos polidutos ou em torres de destilação. O sensor de temperatura permitirá não só a monitoração da temperatura dos ambientes nos quais ele será instalado, como também a correção térmica da resposta do sensor de LPG. Esta correção se faz necessária uma vez que as redes de período longo apresentam uma sensibilidade cruzada do índice de refração do meio externo e da temperatura. As redes de Bragg serão produzidas inicialmente em fibras SMF (*single mode fiber*) hidrogenadas e em fibras fotossensíveis, utilizando a técnica de escrita interferométrica com máscara de fase e laser ultravioleta. A eficiência deste tipo de sensor está intimamente relacionada com a largura de banda espectral da rede. Ou seja, quanto mais estreita for essa banda, maior será a precisão na medida do seu comprimento de onda central e conseqüentemente, melhor será o desempenho do dispositivo. Para a produção de redes mais estreitas, deverá ser implementado um novo sistema de gravação

utilizando a técnica de escrita com máscara de fase e laser UV com deslocamento do feixe. Esta técnica torna possível a escrita de redes mais longas e, portanto espectralmente mais estreitas. Visando ainda uma melhor eficiência no desempenho do sensor, será realizado um estudo buscando estabilizar termicamente as redes de Bragg gravadas nas fibras SMF hidrogenadas.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em 6 capítulos. No Capítulo 1 são descritos os principais objetivos e motivações do trabalho. No Capítulo 2 é relatado o estado da arte, onde são citadas as primeiras descobertas sobre fotossensibilidade e algumas aplicações dos sensores à fibra ótica. No Capítulo 3 faz-se uma revisão da literatura sobre o comportamento das redes, assim como sobre os processos de escrita. O Capítulo 4 descreve em detalhes o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. No Capítulo 5 relatam-se os resultados obtidos. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta a discussão dos resultados, as conclusões do trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros.





## CAPÍTULO 2

### ESTADO DA ARTE

Em 1978, durante um experimento utilizando fibras de sílica para estudos de efeitos não-lineares, constatou-se a possibilidade de alterar o índice de refração do núcleo da fibra ótica pela absorção de radiação. No experimento, Hill e sua equipe lançaram radiação de um laser de argônio dentro de uma fibra dopada com germânio e observaram que após uma exposição prolongada, ocorria um aumento na atenuação do sinal transmitido pela fibra (HILL *et al*, 1978). Como consequência desta atenuação a intensidade da luz refletida pela fibra aumentava significativamente com o tempo de duração da exposição. Este aumento na refletividade foi resultado da formação de uma rede de índice de refração permanente fotoinduzida na fibra. Este novo efeito foi chamado de fotossensibilidade e as redes de “*redes de Hill*”. Embora a fotossensibilidade parecesse ser um fenômeno ideal para fabricar redes em fibras óticas, essas redes somente funcionavam em comprimento de onda no visível e próximo do comprimento de onda da luz escrita. Esta limitação foi superada por Meltz e sua equipe que formaram redes que refletiam qualquer comprimento de onda pela iluminação lateral da casca da fibra por meio da interseção entre dois feixes de luz UV. O período entre os máximos de interferência e a consequente periodicidade da mudança de índice eram ajustados pelo ângulo entre os feixes incidentes e pelo comprimento de onda da radiação UV (MELTZ *et al*, 1989).

Inicialmente, achava-se que a fotossensibilidade era um fenômeno associado somente com fibras óticas dopadas com germânio, mas essa também foi observada em diferentes tipos de fibras, muitas das quais não continham germânio como dopante.

Lemaire e colaboradores, em 1993, desenvolveram uma técnica para aumentar a fotossensibilidade em fibras. A técnica consiste em manter a fibra a alta pressão e temperatura em uma atmosfera de hidrogênio por um determinado período de tempo.

Com a descoberta da fotossensibilidade, houve um grande interesse em pesquisas sobre fabricações de redes em fibras óticas e suas aplicações. Uma nova classe de dispositivos em fibras, denominados redes de Bragg (*Fiber Bragg Grating* – FBG), foi

desenvolvida. As redes de Bragg possuem períodos de modulação de índice de refração da ordem de micrometros (JAMES e TATAM, 2003).

Loh e sua equipe publicaram em 1995 um trabalho sobre a escrita de redes utilizando uma máscara de fase, sendo que essa técnica possibilita a produção de redes longas com boa reprodutibilidade. Uma desvantagem é que o período da máscara de fase impõe uma restrição no comprimento de onda da rede. O arranjo experimental é montado de forma que a fibra fotossensível é presa em um estágio de translação piezoelétrico (PZT) controlado por computador. O feixe UV também pode sofrer um deslocamento, permitindo mudanças na fase da rede durante a escrita.

Wang e colaboradores, em 2001 mostraram que com uma modificação no interferômetro de *Talbot*, o comprimento de onda central e a largura de banda da rede podem ser controlados pela translação da fibra ou da máscara de fase. Nesse trabalho ainda foi demonstrada a possibilidade da gravação de redes em fibras hidrogenadas padrão para telecomunicações.

Em 1996, Vengsarkar *et al* demonstraram um novo tipo de rede fotoinduzida em que o período da rede encontrava-se na faixa entre 100 e 700  $\mu\text{m}$ . Estas redes são conhecidas como redes de período longo (*Long Period Grating* – LPG).

Desde então, surgiram novas técnicas para gravar redes de período longo. AKIYAMA *et al*, em 1998, sugeriram a técnica com uso de um laser de  $\text{CO}_2$ , onde a fibra era exposta ao feixe de laser com diâmetro de 100  $\mu\text{m}$  por 3 segundos, sendo deslocada longitudinalmente por um período de 500  $\mu\text{m}$  e então exposta novamente. Em 1999, ZHANG *et al*, gravaram redes de período longo usando uma máscara de amplitude e a técnica de escrita ponto-a-ponto com laser de argônio.

A utilização de sensores baseados em redes de período longo foi demonstrada por Bathia e Vengsarkar em 1996, na medição de tensão, temperatura e índice de refração. As redes foram gravadas com radiação UV, através de uma máscara de amplitude, em fibra hidrogenada. Depois de escritas as redes eram recozidas a 150  $^{\circ}\text{C}$  por 10 horas para remover o hidrogênio ainda existente na fibra e os defeitos instáveis induzidos pelo UV. A sensibilidade à temperatura variou de 0,046  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$  a 0,154  $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ , e a sensibilidade à deformação variou entre -7,27  $\text{nm}/\mu\text{C}$  e 15,21  $\text{nm}/\mu\text{C}$ . As redes de período longo foram imersas em óleo e o maior deslocamento medido no comprimento de onda foi de 62,4 nm.

As sensibilidades variam de acordo com a composição e geometria das fibras e variam com o período de gravação (JAMES e TATAN, 2003). As LPG fabricadas em fibra ótica padrão de telecomunicações possuem sensibilidade a temperatura na ordem de 0,03 a 0,1 nm/°C. A sensibilidade à deformação também está relacionada com o período da rede, uma LPG de período 340  $\mu\text{m}$  possui uma sensibilidade de 0,04 pm/ $\mu\text{C}$  e uma LPG com período de 40  $\mu\text{m}$  exibe uma sensibilidade de -2,2 pm/ $\mu\text{C}$ . Isso possibilita a fabricação de sensores com respostas diferenciadas às variações do meio externo. A resposta à temperatura e à tensão longitudinal pode ser tanto positiva como negativa, dependendo da resposta diferencial do núcleo e da casca (KERSEY *et al*, 1997).

As características mais relevantes das fibras óticas são a baixa atenuação que possibilita enlaces óticos de maiores distâncias, o baixo peso e a pequena dimensão viabilizando aplicações na indústria, onde o espaço é limitado. Ao lado dessas características, ainda podem ser consideradas algumas aplicações especiais dos dispositivos sensores a fibra ótica, como por exemplo, o monitoramento em ambientes hostis, fornos industriais e ambientes inflamáveis, por se tratar de um material dielétrico.

Em processos industriais a utilização de sensores é de grande importância para o acompanhamento das diversas etapas da produção. Particularmente no setor de petróleo, é desejável que estes sensores não produzam faíscas elétricas, que poderiam levar a acidentes com substâncias inflamáveis ou explosivas. Além de apresentar esta característica de passividade elétrica, os sensores a fibra ótica possuem baixa reatividade química e possibilidade de monitoramento em tempo real.

Spirin e colaboradores, em 2000, demonstraram um novo tipo de sensor a fibra ótica baseado em redes de Bragg para detecção de vazamento de hidrocarbonetos. A rede é fixa em um polímero, quando ocorre um vazamento, o polímero incha resultando em tensões na fibra, que podem ser facilmente medidas através dos deslocamentos nos comprimentos de onda de Bragg, com tempo de detecção de 20 minutos.

Nas redes de Bragg, os deslocamentos no comprimento de onda das redes podem ser estabilizados se a FBG passar por um recozimento (MASUDA *et al*, 2004), pois a mudança no comprimento de onda pode ser problemática não somente para aplicações em telecomunicação como também em sensoriamento.

O experimento de Masuda e sua equipe mostra o comportamento de uma FBG com período de 1552 nm colocada em um forno a 140 °C por 80 horas. O comprimento de onda central alcança o valor máximo em aproximadamente 15 minutos e decai para um valor estável depois de 6 horas.

A ascensão do comprimento de onda está relacionado à sensibilidade da rede com a temperatura, que é cerca de 0,01 nm/°C. Os deslocamentos para menores comprimentos de onda em redes de Bragg gravadas em fibra hidrogenada são devidos em parte à depleção do hidrogênio (MALO *et al*, 1994). A presença do hidrogênio no núcleo da fibra aumenta o índice de refração em 0,05%, e quando o hidrogênio difunde para fora da fibra o índice de refração efetivo retorna para menores valores, causando os deslocamentos observados nos comprimentos de onda.

A utilização de uma LPG como dispositivo sensor para detectar a presença de hidrocarbonetos em um meio aquático foi demonstrado por Kamikawachi e seus colaboradores, em 2004. Neste trabalho as variações de temperatura durante o monitoramento do fluxo provocavam deslocamentos no comprimento de onda do vale de atenuação da LPG.

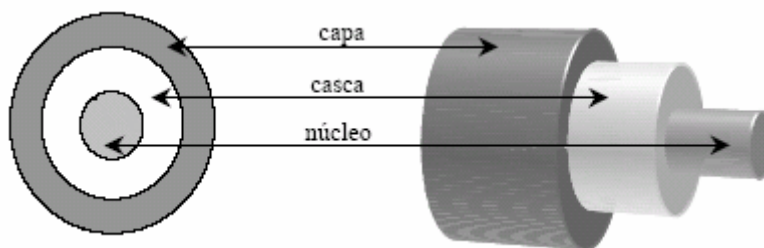
## CAPÍTULO 3

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 FIBRA ÓTICA

Uma fibra ótica é um guia de onda cilíndrico feito de material transparente, usualmente vidro, que conduz luz na região espectral do visível e do infravermelho por longas distâncias. A estrutura de uma fibra ótica consiste em um núcleo de sílica envolvido por uma casca de mesmo material, mas com índice de refração menor que o do núcleo, de forma a garantir que a luz lançada no seu núcleo se propague ao longo do comprimento da fibra com pequenas perdas de intensidade.

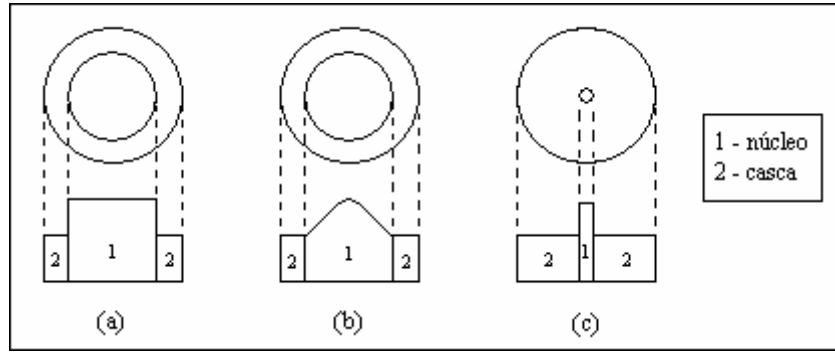
Muitas fibras possuem uma capa protetora sobre a casca (FIGURA 1). Essa capa cujo material geralmente é um polímero, protege a fibra de choques mecânicos sem afetar suas propriedades óticas ou físicas.



**Figura 1:** Diagrama esquemático de uma fibra ótica.

As fibras são classificadas em função do número de modos propagantes e também do perfil de índice de refração do núcleo (FIGURA 2), os tipos mais usuais são:

- Fibra multimodo de índice degrau;
- Fibra multimodo de índice gradual;
- Fibra monomodo de índice degrau.



**Figura 2:** (a) Fibra multimodo de índice degrau; (b) Fibra multimodo de índice gradual; (c) Fibra monomodo de índice degrau (SILVA JÚNIOR, 1990).

Enquanto uma fibra monomodo conduz somente um modo de propagação, as fibras multimodo conduzem muitos modos de propagação. As fibras monomodo têm diâmetro de núcleo menor do que as multimodo, e a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca também é pequena ( $\sim 10^{-3}$ ).

Quanto ao perfil do índice de refração, enquanto uma fibra de índice degrau possui apenas um tipo de material compondo o núcleo de forma a ter um índice de refração constante ao longo de sua seção reta, a fibra de índice gradual tem seu núcleo composto por materiais de diversos índices de refração que diminuem gradualmente a partir do eixo central da fibra em direção a interface núcleo-casca (SILVA JÚNIOR, 1990).

### 3.2 PROPAGAÇÃO DA LUZ EM FIBRA ÓTICA

A fibra ótica é um guia de onda que canaliza a luz em determinados modos, que nada mais são do que ondas com certas distribuições de campos eletromagnéticos definidas matematicamente pelas equações de Maxwell e governadas pela teoria eletromagnética. Sendo assim, a teoria que leva aos modos de propagação inicia-se com as equações de Maxwell que são escritas abaixo na forma diferencial:

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

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

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

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

Nestas equações,  $\vec{E}$  representa o vetor campo elétrico,  $\vec{H}$  o vetor campo magnético,  $\vec{D}$  o vetor densidade de fluxo elétrico e  $\vec{B}$  o vetor densidade de fluxo magnético (SENIOR, 1992). Estas equações estão relacionadas entre si por:

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

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

onde  $\varepsilon$  é a permissividade elétrica e  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio.

Estas equações levam a uma equação de onda para os campos elétrico e magnético que se propagam no meio em questão. A equação de onda para uma única variável,  $\vec{E}$  ou  $\vec{H}$ , representada aqui por  $\Psi$  é escrita na forma abaixo (SENIOR, 1992):

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

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo e  $n$  é o índice de refração do material.

Como as fibras óticas possuem simetria radial, as soluções são expressas em coordenadas cilíndricas  $(r, \varphi, z)$ , para uma onda propagando-se ao longo do eixo  $z$ :

$$\frac{\delta^2 \Psi_z}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta \Psi_z}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 \Psi_z}{\delta \varphi^2} + \kappa^2 \Psi_z = 0 \quad (8)$$

onde  $\kappa^2 = k^2 - \beta^2$ ,  $k$  é o número de onda,  $\beta$  é a constante de propagação,  $r$  é a coordenada radial e  $\varphi$  a coordenada angular.

Usando a técnica de separação de variáveis, podem-se obter soluções para as componentes angular e radial. A componente  $z$  do campo pode ser escrita em termos destas soluções:

$$\Psi_z(\varphi, r) = A\Phi(\varphi)F(r) \quad (9)$$

Com a simetria circular da fibra é possível escolher uma função circular para a componente angular do campo:

$$\Phi(\varphi) = e^{j\nu\varphi} \quad (10)$$

sendo  $\nu$  um número inteiro.

Substituindo a Solução 9 na Equação 8, é possível obter a seguinte equação:

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left( \kappa^2 - \frac{\nu^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (11)$$

A Equação 11 tem a forma da equação de Bessel, que possui soluções conhecidas para dadas condições de contorno:

1. O campo deve ser finito no núcleo da fibra, especialmente em  $r = 0$ .
2. O campo na casca da fibra deve decair exponencialmente para grandes distâncias do centro da fibra.

A condição 1 tem como solução, no núcleo da fibra, a função de Bessel  $J_\nu(\kappa r)$ , portanto:

$$\Psi_z = AJ_\nu(\kappa r)e^{j\nu\varphi} \quad (12)$$



A condição 2 resulta na forma  $e^{-\gamma \bar{r}}$  para o campo na casca. Quando  $\kappa = j\gamma$ , as funções de Hankel modificadas de primeiro tipo descrevem o comportamento do campo na casca:

$$\Psi_z = B H_v^1(j\gamma r) e^{jv\phi} \quad (13)$$

As constantes  $A$  e  $B$  são determinadas através das condições de contorno nas interfaces núcleo-casca e casca-ar. As Equações 12 e 13 descrevem os campos que se propagam no núcleo e na casca.

Nas fibras óticas, a diferença de índice de refração entre núcleo e casca é pequena ( $\Delta n \ll 1$ ), assim as combinações possíveis dos modos podem ser simplificadas. O modo linearmente polarizado (LP) corresponde à superposição de modos de núcleo caracterizados por constantes de propagação próximas.

Os modos de propagação na casca são determinados pela constante  $\gamma$ . Para grandes valores de  $\gamma$  o modo está fortemente confinado no núcleo. A medida que o valor de  $\gamma$  diminui, o modo começa a penetrar na casca. Quando  $\gamma = 0$ , o modo deixa de ser guiado, nesta situação o modo é chamado de modo irradiado. A frequência na qual isto acontece é chamada de frequência de corte,  $\omega_c$ :

$$\omega_c = \frac{\kappa_c}{\sqrt{\mu_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}} \quad (14)$$

onde  $\varepsilon_1$  e  $\varepsilon_2$  são as permissividades do núcleo e da casca, respectivamente.

Quando  $\kappa_c = 0$ , a frequência de corte é nula e apenas um modo pode existir. Este modo é chamado modo híbrido  $HE_{11}$  ou  $LP_{01}$  e esta é a condição para que uma fibra seja monomodo.

Os modos podem ser classificados também como propagantes e contra-propagantes em relação ao sentido ao qual a luz é injetada na fibra.

### 3.3 REDES EM FIBRAS ÓTICAS

Redes em fibra ótica são estruturas periódicas de modulação do índice de refração no núcleo da fibra, produzidas ao longo do seu eixo de propagação de luz. Esta modulação de índice induzida resulta num acoplamento da luz guiada entre modos de propagação/irradiação da fibra, e em conseqüentes alterações no espectro de transmissão da fibra.

#### 3.3.1 Redes de Bragg

As redes de Bragg (FBG - *fiber Bragg grating*) são formadas pela exposição do núcleo da fibra a um padrão de interferência ótico intenso, e apresentam como característica principal a reflexão de parte da potência ótica propagando-se pela fibra. Essa reflexão é baseada na difração do feixe luminoso pela estrutura de modulação do índice de refração, acoplando uma parte do espectro em um modo de núcleo contra-propagante. O acoplamento mais forte ocorre no comprimento de onda de Bragg ( $\lambda_B$ ) dado por:

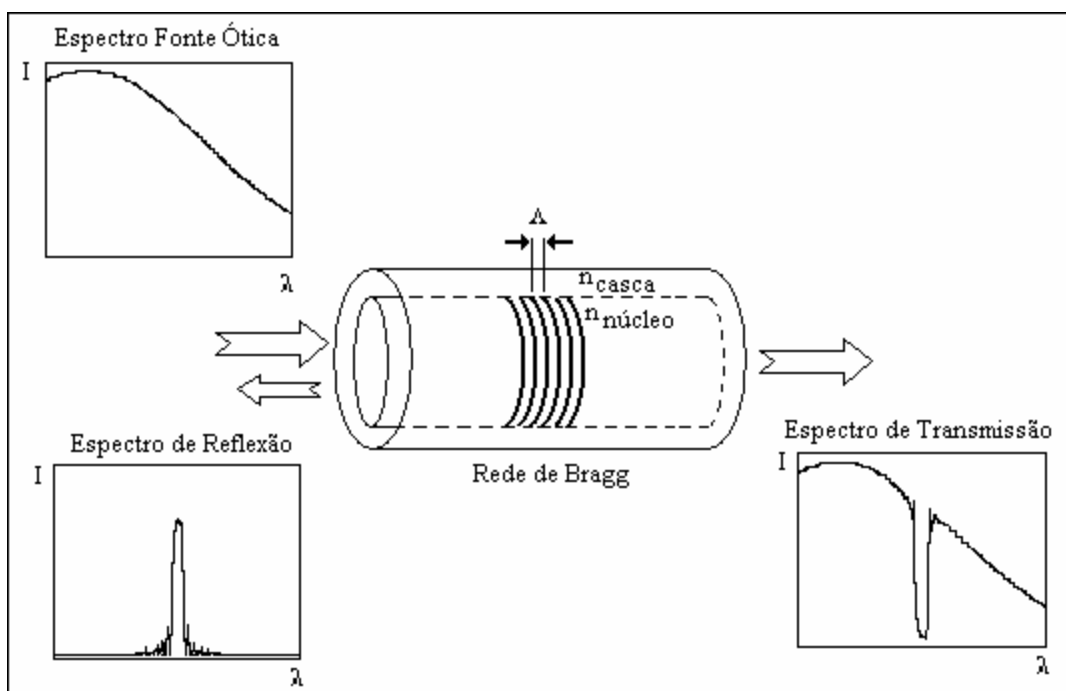
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (15)$$

onde  $n_{eff}$  é o índice de refração efetivo do modo de propagação da luz e  $\Lambda$  é o período espacial da modulação do índice de refração (HILL e MELTZ, 1997). Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida em cada plano subsequente se torna progressivamente fora de fase e pode eventualmente cancelar-se. Quando a condição de Bragg é satisfeita, as contribuições da luz refletida em cada plano da rede contribuem construtivamente na direção contra-propagante formando um pico de reflexão com o comprimento de onda definido pelos parâmetros da rede. Qualquer mudança nas propriedades da fibra, tais como tensão longitudinal ou temperatura, que varie o índice de refração ou o período da rede, mudará o comprimento de onda de Bragg e, portanto o comprimento de onda refletido.

A condição de Bragg requer que sejam satisfeitas tanto a lei da conservação de energia quanto a lei da conservação de momento. A conservação de energia ( $\hbar\omega_f = \hbar\omega_i$ ) requer que a frequência da radiação incidente e da radiação refletida sejam as mesmas. A conservação de momento requer que o vetor da onda incidente,  $\vec{k}_i$ , mais o vetor da rede,  $\vec{K}$ , sejam iguais ao vetor da radiação difratada,  $\vec{k}_f$ .

$$\vec{k}_i + \vec{K} = \vec{k}_f \quad (16)$$

onde o vetor de onda da rede,  $\vec{K}$ , tem a direção normal aos planos da rede e tem magnitude  $2\pi/\Lambda$  ( $\Lambda$  é o período da rede mostrado na Figura 3).



**Figura 3:** Acoplamento entre os modos co e contra-propagante por uma rede de Bragg com período e índice de modulação constante.

O vetor de onda difratado é igual em magnitude e direção ao vetor de onda incidente, porém com sentido contrário. Logo, a condição de conservação de momento torna-se:

$$2 \frac{2\pi n}{\lambda_B} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (17)$$

A Equação 17 pode ser simplificada para a condição de primeira ordem de Bragg, dada pela Equação 15.

Ao considerar uma rede de Bragg formada no núcleo de uma fibra ótica com índice de refração  $n_0$ , o perfil do índice de refração pode ser expresso por (OTHONOS, 1997):

$$n(x) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right) \quad (18)$$

onde  $\Delta n$  é a amplitude da perturbação do índice de refração induzido (geralmente, de  $10^{-5}$  a  $10^{-2}$ ) e  $x$  é a distância ao longo do eixo longitudinal. Usando a teoria de modos acoplados, a refletividade da rede, com amplitude e período de modulação constante, pode ser expressa:

$$R(l, \lambda) = \frac{\Omega^2 \sinh^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)} \quad (19)$$

onde  $R(l, \lambda)$  é a refletividade em função do comprimento da rede  $l$ , e do comprimento de onda  $\lambda$ ,  $\Omega$  é o coeficiente de acoplamento correspondente ao acoplamento entre as ondas co-propagantes e contra-propagantes,  $\Delta k$  representa o descasamento de fase para um dado comprimento de onda da banda espectral da fonte ótica,  $\lambda$ .

O parâmetro  $s$  é dado por:

$$s = \sqrt{\Omega^2 - \Delta k^2} \quad (20)$$

O coeficiente de acoplamento,  $\Omega$ , para uma variação senoidal da perturbação do índice de refração ao longo do eixo da fibra é dado por (OTHONOS, 1997):

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda} \quad (21)$$

Na Equação 21,  $\eta(V) \approx 1-1/V^2$  ( $V \geq 2,4$ ), onde  $\eta$  é função do parâmetro  $V$  que representa a fração da potência do modo contido no núcleo da fibra. Quando  $\Delta k = 0$ , a expressão (19) para a refletividade torna-se:

$$R(l, \lambda) = \tanh^2(\Omega l) \quad (22)$$

Uma expressão geral para largura de banda máxima a meia altura é:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{\Lambda}{l}\right)^2} \quad (23)$$

O parâmetro  $\alpha$  assume valores entre 1, para redes fortes (com reflexão próxima de 100 %), e 0,5, para redes fracas.

As equações 22 e 23 mostram que a refletividade cresce e a largura de banda diminui com o aumento do comprimento da rede, ou seja, a largura de banda espectral é inversamente proporcional ao comprimento da rede e diretamente proporcional à modulação do índice de refração.

### 3.3.2 Redes de Período Longo

As redes de período longo (LPG – *long period grating*) são dispositivos intrínsecos à fibra ótica que têm sua operação fundamentada no acoplamento entre o modo propagante de núcleo e modos co-propagantes de casca. Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são dados pela condição de casamento de fase (VENGSARKAR *et al*, 1996):

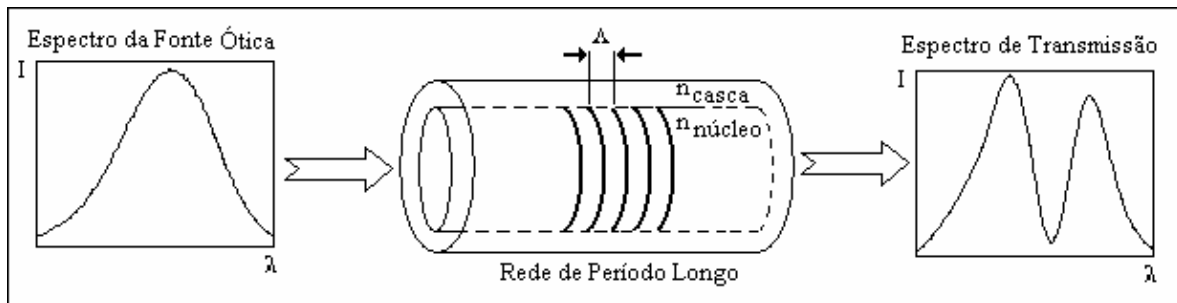
$$\beta_1 - \beta_2 = \Delta\beta = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (24)$$

onde  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são as constantes de propagação dos modos que estão sendo acoplados,  $\Delta\beta$  é a diferença entre as constantes de propagação e  $\Lambda$  é o período da rede.

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 24 os valores de  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , chegando-se à seguinte equação:

$$\lambda_m = (n_{co} - n_{cl}^m)\Lambda \quad (25)$$

onde  $\lambda_m$  é o comprimento de onda central do  $m$ -ésimo modo de casca, para o qual a luz foi acoplada,  $n_{co}$  é o índice de refração efetivo do modo de núcleo,  $n_{cl}^m$  é o índice de refração efetivo do  $m$ -ésimo modo de casca e  $\Lambda$  é o período da rede. A potência ótica que se propaga nos modos de casca decai rapidamente devido às imperfeições da fibra, ou curvaturas, deixando no espectro de transmissão (FIGURA 4) vales de atenuação centrados nos comprimentos de onda dados pela Equação 25.



**Figura 4:** Acoplamento entre os modos propagante e co-propagante por uma rede de período longo com período e índice de modulação constante.

A relação entre o período da rede e os modos acoplados pode ser analisada a partir da Equação 24. Nas redes de período longo o acoplamento ocorre entre o modo fundamental e modos de casca co-propagantes de forma que o valor de  $\Delta\beta$  é pequeno e os valores do período  $\Lambda$  são grandes, tipicamente da ordem de centenas de micrometros.

### 3.4 TÉCNICAS DE REALCE DA FOTOSSENSIBILIDADE

A fotossensibilidade descoberta por Hill *et al* em 1978, consiste numa mudança permanente no índice de refração do núcleo da fibra, como consequência da sua exposição à luz com comprimento de onda e intensidade adequada a cada material. A alteração no índice de refração do meio é resultante da destruição dos defeitos existentes inicialmente na fibra, seguida do rearranjo dos átomos e conseqüente formação de novos defeitos.

O aumento da fotossensibilidade das fibras é de grande interesse, pois permite gravar redes de Bragg sem a necessidade de utilização de um feixe de escrita com alta potência, nem um tempo de exposição longo. Como consequência, é possível usar um laser de menor custo e obter uma melhor eficiência de produção. Algumas técnicas como a introdução de hidrogênio na estrutura vítrea, e a varredura a chama (*flame brushing*) permitem o aumento da fotossensibilidade.

Na técnica de hidrogenação descrita por Lemaire *et al*, 1993, a fibra ótica é mantida em uma atmosfera de hidrogênio por doze dias, com pressões que variam de 20 a 750 atm, e temperaturas no intervalo compreendido entre 20 e 75 °C, ocasionando a difusão de moléculas de hidrogênio para o núcleo da fibra. O hidrogênio difundido na rede evita uma relaxação estrutural subsequente dos defeitos induzidos pela exposição ao UV, aumentando assim a irreversibilidade das mudanças estruturais e conseqüentemente a troca induzida no índice de refração (CANNING *et al*, 2001). As fibras óticas sensibilizadas através de tratamento com hidrogênio frio a alta pressão permanecem fotossensíveis somente enquanto o hidrogênio estiver vinculado à fibra e, assim, devem ser guardadas a baixas temperaturas ou a altas pressões numa atmosfera hidrogenada, para impedir a difusão do hidrogênio para fora da fibra.

A hidrogenação permite a gravação de redes de Bragg em fibras óticas com grande profundidade de modulação ( $\Delta n \gg 10^{-3}$  a  $10^{-2}$ ), usando para tal menores potências óticas de gravação e menor tempo de exposição luminosa.

A técnica de varredura a chama consiste em submeter a fibra a uma chama de oxí-hidrogênio cuja temperatura supera 1700 °C (OTHONOS, 1997). À temperatura elevada o hidrogênio difunde para dentro do núcleo mais rapidamente que à temperatura ambiente e reage com a sílica dopada com germânio produzindo os centros de defeitos Ge-O. Estes

defeitos geram uma forte banda de absorção no núcleo dopado com Ge, deixando-o altamente fotossensível à luz UV. Esse tratamento resulta em uma fibra permanentemente fotossensível, devido às altas temperaturas, e tem a vantagem de fotossensibilizar a fibra localmente devido à pequena dimensão da chama. No entanto, a exposição às altas temperaturas pode tornar a fibra frágil.

### 3.5 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG À DEFORMAÇÃO E À TEMPERATURA

Qualquer alteração na periodicidade espacial ou no índice de refração efetivo de uma rede acarretará numa mudança na posição espectral de reflexão da rede de Bragg. Sendo assim, qualquer perturbação que venha a alterar estas grandezas, como deformação mecânica ou variações de temperatura, afetará o espectro de reflexão da rede. A mudança no comprimento de onda de Bragg da rede é dada por (OTHONOS, 1997):

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - p_e)\varepsilon_z + (\alpha + \eta)\Delta T \quad (26)$$

O primeiro termo à direita da Equação 26 representa o efeito da deformação sobre a rede, que corresponde a uma mudança no espaçamento da rede e à mudança foto-elástica induzida no índice de refração, podendo ser também representado por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\varepsilon_z \quad (27)$$

onde  $\varepsilon_z$  representa a componente de deformação relativa por unidade de comprimento, e  $p_e$  representa a constante foto-elástica efetiva, definida como:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (28)$$



Na Equação 28,  $p_{11}$  e  $p_{12}$  são componentes do tensor foto-elástico e  $\nu$  é o coeficiente de *Poisson*. Para uma fibra ótica de núcleo de sílica  $p_{11} = 0,113$ ,  $p_{12} = 0,252$ ,  $\nu = 0,16$  e  $n_{eff} = 1,482$ . Quando estes parâmetros forem utilizados na Equação 28, a sensibilidade à deformação em aproximadamente 1550 nm é de 1,2 pm, resultante da deformação relativa da rede de Bragg de 1  $\mu\text{C}$  (1  $\mu\text{m/m}$ ) (OTHONOS, 1997).

O segundo termo da Equação 26 representa o efeito da temperatura na rede. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg devido à expansão térmica é resultante das mudanças no espaçamento da rede e no índice de refração. O deslocamento no comprimento de onda de Bragg para uma variação de temperatura  $\Delta T$  pode ser escrito como:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (\alpha + \zeta) \Delta T \quad (29)$$

onde  $\alpha = (1/\lambda)(\partial\lambda/\partial T)$  é o coeficiente de expansão térmica para a fibra (aproximadamente  $0,55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a sílica). A quantidade  $\zeta = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$  representa o coeficiente termo-ótico, que é aproximadamente igual a  $8,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para a fibra de sílica dopada com germânio. Da Equação 29, a sensibilidade para uma FBG com comprimento de onda de Bragg em 1550 nm é de aproximadamente 13,7 pm/ $^\circ\text{C}$  (OTHONOS, 1997).

### 3.6 SENSIBILIDADE DAS REDES DE PERÍODO LONGO AO MEIO EXTERNO E À TEMPERATURA

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 25). O índice de refração efetivo do modo de casca depende dos índices de refração do núcleo, da casca e do meio circunvizinho. Desta forma, uma mudança no meio externo implica em alterar o termo  $n_{cl}^m$  na Equação 25, alterando a condição de casamento de fase, e conseqüentemente o comprimento de onda de ressonância que satisfaz a equação. Portanto, variações no índice de refração do meio circunvizinho a fibra, resultam em deslocamentos nos comprimentos de onda dos vales

existentes no espectro de transmissão da rede, possibilitando sua utilização em sensoriamento.

As redes de período longo mostraram-se mais sensíveis a variações de parâmetros externos do que as redes de Bragg, com valores de sensibilidade à tensão longitudinal e à temperatura variando entre - 0,7 e 1,5 nm/mC, e de 0,04 a 0,05 nm/°C, respectivamente (VENGSARKAR *et al*, 1996). Os comprimentos de onda de ressonância das LPG são criticamente dependentes da mudança nos índices de refração efetivos do núcleo e da casca. Desse modo, qualquer variação nestas grandezas causada por parâmetros como temperatura, tensão longitudinal ou alterações no índice de refração externo pode causar grandes deslocamentos do comprimento de onda na ressonância.

A origem da sensibilidade à temperatura pode ser entendida diferenciando a Equação 25 em relação à temperatura (BATHIA *et al*, 1997):

$$\frac{d\lambda_m}{dT} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{co} - n_{cl}^m)}{dT} \right] + (n_{co} - n_{cl}^m) \left( \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (30)$$

O primeiro termo do lado direito da Equação 30, representa a mudança nos índices de refração, do núcleo e da casca, devido ao efeito termo-ótico. Esta contribuição depende da composição da fibra e da ordem dos modos de casca. O segundo termo representa a alteração na periodicidade da rede devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra. A magnitude e o sinal do termo dependem da ordem dos modos de casca. O coeficiente de expansão térmica da sílica é muito pequeno com relação ao termo-ótico, e como resultado a sensibilidade da rede à temperatura é determinada principalmente pelas mudanças nos índices de refração do núcleo e da casca.

A sensibilidade à tensão nas LPG pode ser avaliada pela diferenciação da Equação 25 em relação a deformação,  $\varepsilon$  (OTHONOS *et al*, 1997):

$$\frac{d\lambda_m}{d\varepsilon} = \Lambda \left[ \frac{d(n_{co} - n_{cl}^m)}{d\varepsilon} \right] + (n_{co} - n_{cl}^m) \left( \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \right) \quad (31)$$

O primeiro termo da equação representa a mudança no índice de refração devido à deformação da fibra (efeito foto-elástico), e o segundo termo é a alteração da periodicidade da rede como resultado da deformação elástica da fibra.

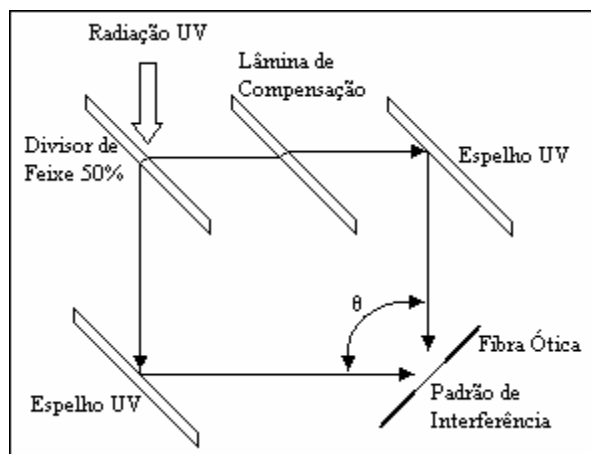
### 3.7 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE REDES DE BRAGG

No final da década de oitenta foi desenvolvida uma técnica por Meltz *et al* que permitiu a escrita de redes por um processo externo à fibra, com a possibilidade de ajuste do comprimento de onda de reflexão. Anteriormente, a técnica de escrita interna utilizada não despertava interesse por limitar o comprimento de onda de operação ao de gravação.

A partir do trabalho de Meltz *et al*, uma grande variedade de técnicas de escritas, conhecidas como técnicas externas de gravação foram desenvolvidas.

#### 3.7.1 Técnica Interferométrica

A técnica interferométrica (MELTZ *et al*, 1989) foi a primeira técnica de gravação externa de redes de Bragg em fibras fotossensíveis. Nesta técnica, um feixe de radiação UV é dividido em dois feixes iguais que são posteriormente recombinados para formar um padrão de interferência. A rede é produzida posicionando a parte descascada de uma fibra ótica na região do padrão (FIGURA 5). O período,  $\Lambda$ , do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão,  $\lambda_B$ , da rede escrita.



**Figura 5:** Técnica interferométrica de escrita de redes de Bragg em fibras óticas (KASHYAP, 1999).

Nesta montagem, a luz lançada na fibra ótica terá um comprimento de onda refletido pela rede,  $\lambda_B$ , determinado pelo ângulo de cruzamento,  $\theta$ , entre os feixes e pelo comprimento de onda do feixe de escrita.

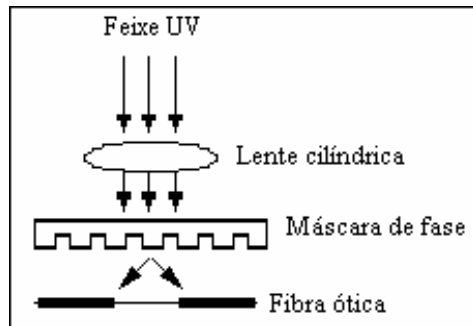
Esta técnica, que posteriormente ficou conhecida como técnica holográfica se mostrou mais eficiente do que o processo de gravação interna devido a diferentes aspectos. O primeiro foi o de possibilitar gravar redes de Bragg em praticamente qualquer comprimento de onda no visível e infravermelho próximo. O segundo aspecto foi de reduzir a potência ótica necessária para fotossensibilizar a fibra.

Uma desvantagem na utilização desta técnica é a suscetibilidade da montagem às vibrações mecânicas e às correntes de ar, podendo causar uma não-periodicidade da rede de Bragg e um conseqüente alargamento de banda.

### 3.7.2 Técnica com Máscara de Fase

É uma técnica externa de gravação de redes de Bragg no núcleo de uma fibra ótica fotossensível. Nesta técnica, como indicado na Figura 6, o feixe de luz UV sob incidência normal a máscara é difratado pela máscara de fase sendo separado nas ordens  $m = 0$  e  $m = \pm 1$ . A superposição espacial dos feixes de ordem  $m = \pm 1$  resulta num padrão de

interferência. Na região deste padrão é posicionada a fibra ótica. Uma lente cilíndrica é posicionada antes da máscara de fase, para criar uma linha focal sobre a região do núcleo da fibra ótica, produzindo uma modulação do índice de refração da fibra com metade do período da máscara.

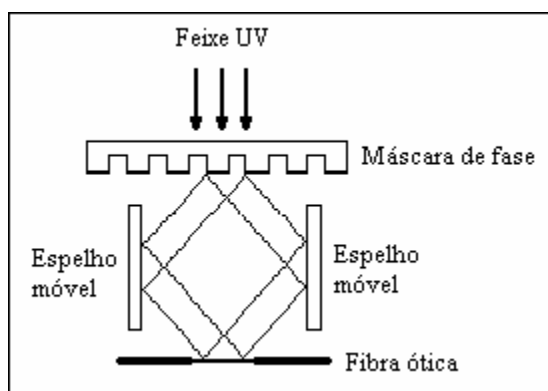


**Figura 6:** Técnica de escrita de redes de Bragg em fibras óticas, utilizando máscara de fase (KASHYAP, 1999).

A técnica de gravação com máscara de fase apresenta vantagens por se tratar de um elemento compacto, fácil de alinhar, e que apresenta pouca sensibilidade a vibrações mecânicas. Conseqüentemente, as redes produzidas apresentam um alto grau de reprodutibilidade. Esta técnica permite ainda a gravação de redes longas apenas movendo o feixe de luz ao longo da máscara, ou mesmo a gravação de redes com *chirp* (gorgeio) onde o feixe percorre uma máscara de fase com múltiplas seções, cada uma com período espacial diferente. No entanto, a técnica possui a desvantagem de só permitir gravar redes com um dado período limitado pelo período da máscara. Para que redes com diferentes períodos sejam gravadas é preciso substituir a máscara de fase por outra com período adequado. Uma outra limitação da técnica diz respeito à densidade de potência máxima que pode ser lançada na máscara (normalmente menor do que  $1 J/cm^2$ , segundo especificações das máscaras).

### 3.7.3 Técnica Interferométrica com Máscara de Fase

Esta técnica consiste na junção das técnicas interferométrica e de máscara de fase. Possui a vantagem de permitir a mudança dos parâmetros da rede produzida. A Figura 7 mostra esquematicamente a montagem experimental utilizada nessa configuração.



**Figura 7:** Escrita de redes de Bragg em fibras ópticas, utilizando a técnica interferométrica com máscara de fase (KASHYAP, 1999).

Nesta montagem o feixe UV é difratado pela máscara de fase e as ordens  $m = \pm 1$  são recombinadas via reflexão em dois espelhos móveis, formando um padrão de interferência luminosa no núcleo da fibra. O período espacial do padrão formado determina o comprimento de onda de reflexão,  $\lambda_B$ , da rede escrita. Quando os espelhos são girados ocorre uma variação no ângulo de cruzamento das ordens  $m = \pm 1$  e conseqüentemente uma alteração no comprimento de onda de Bragg da rede escrita. Nesta montagem, uma lente cilíndrica pode ser utilizada para focalizar os feixes UV e, portanto o padrão de interferência sobre a fibra.

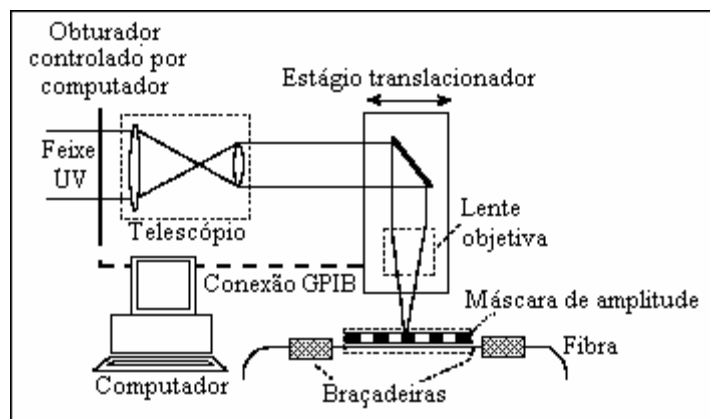
### 3.8 TÉCNICAS DE FABRICAÇÃO DE REDES DE PERÍODO LONGO

Para a fabricação de LPG podem ser utilizadas técnicas que envolvem ou não a incidência de radiação UV. Nas técnicas de produção que não envolvem a exposição à radiação UV, a mudança no índice de refração ocorre por mudanças periódicas no diâmetro

da fibra, pela difusão de dopantes para o núcleo da fibra ou pela mudança nas propriedades do vidro no processo de aquecimento e resfriamento (REGO *et al*, 2001).

### 3.8.1 Técnicas com UV Ponto-a-Ponto e com Máscara de Amplitude

A fabricação de LPG usando um feixe UV é mostrada na Figura 8, esta montagem experimental pode ser alternada entre o método ponto-a-ponto e o método com a máscara de amplitude.



**Figura 8:** Sistema de gravação de redes de período longo usando laser UV, que pode ser usado nas técnicas ponto-a-ponto e com máscara de amplitude (ZHANG *et al*, 1999).

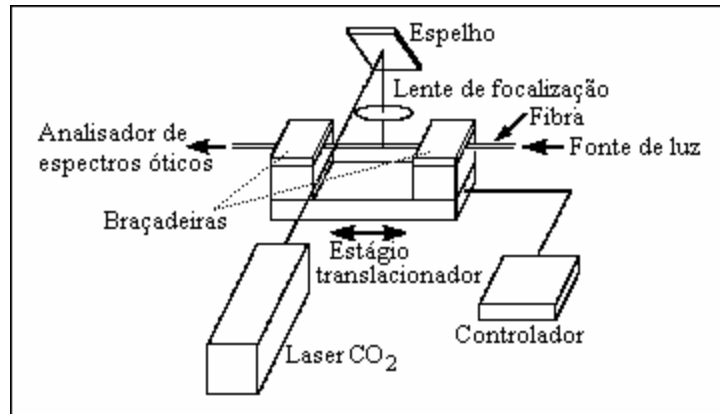
No processo de escrita ponto-a-ponto, o feixe UV tem suas dimensões reduzidas por um telescópio para garantir uma alta resolução espacial. Uma lente objetiva acoplada a um estágio de translação focaliza o feixe sobre a fibra ótica desencapada (nesta montagem a máscara de amplitude não é usada). A exposição periódica é realizada pelo obturador controlado por computador, acionado com frequência adequada para o período e perfil espectral desejados.

Uma grande vantagem desta 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 de translação (ZHANG *et al*, 1999). Essa técnica exige um sistema preciso de movimentação da fibra, além de um tempo maior de fabricação.

No processo de escrita realizado com máscara de amplitude o feixe UV de dimensões reduzidas atravessa a máscara e produz uma modulação de índice de refração na fibra com o mesmo padrão da máscara. Apesar do período da LPG ser limitado pelo período da máscara, essa técnica oferece maior precisão na resposta espectral quando comparado com o método ponto-a-ponto.

### 3.8.2 Técnicas com Laser de CO<sub>2</sub> e com Arco Elétrico

As redes produzidas com estas técnicas resultam de um processo de aquecimento e resfriamento periódico do material da fibra ao longo do seu comprimento. Este processo produz alterações periódicas nas características da sílica que são responsáveis pelo acoplamento entre os modos.

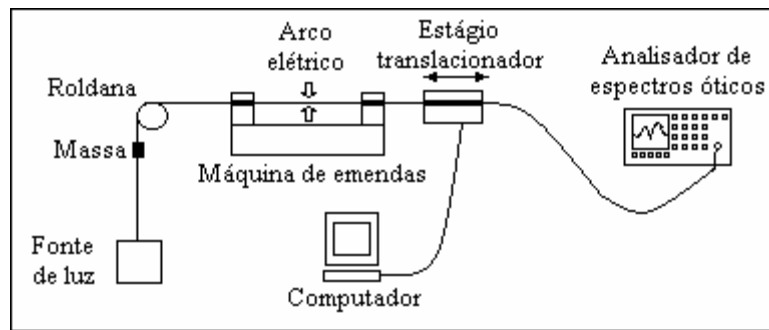


**Figura 9:** Sistema de gravação de LPG com laser de CO<sub>2</sub> (AKIYAMA *et al*, 1998).

O sistema experimental usado para a gravação de LPG com o uso de um laser de CO<sub>2</sub> (FIGURA 9) é semelhante ao utilizado na técnica ponto-a-ponto com laser UV. O feixe do laser de CO<sub>2</sub> é focalizado por uma lente convergente sobre um ponto na fibra. A fibra óptica 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 e o processo é repetido (AKIYAMA *et al*, 1998).

A Figura 10 mostra a montagem experimental para a gravação de LPG com arco elétrico.





**Figura 10:** Gravação de LPG com arco elétrico.

A fibra é inserida entre os eletrodos de uma máquina de emendas de fibras ópticas. Uma das extremidades da fibra passa por uma roldana, e é presa a uma massa para mantê-la sob tensão longitudinal constante. A outra extremidade é fixada em um estágio de translação de precisão controlado por computador. Um arco elétrico é então aplicado, e em seguida a fibra é deslocada por um comprimento igual ao período da rede e um novo arco é aplicado. Este procedimento é então repetido várias vezes gerando a alteração periódica no índice de refração da fibra que caracteriza a LPG.



## CAPÍTULO 4

### METODOLOGIA

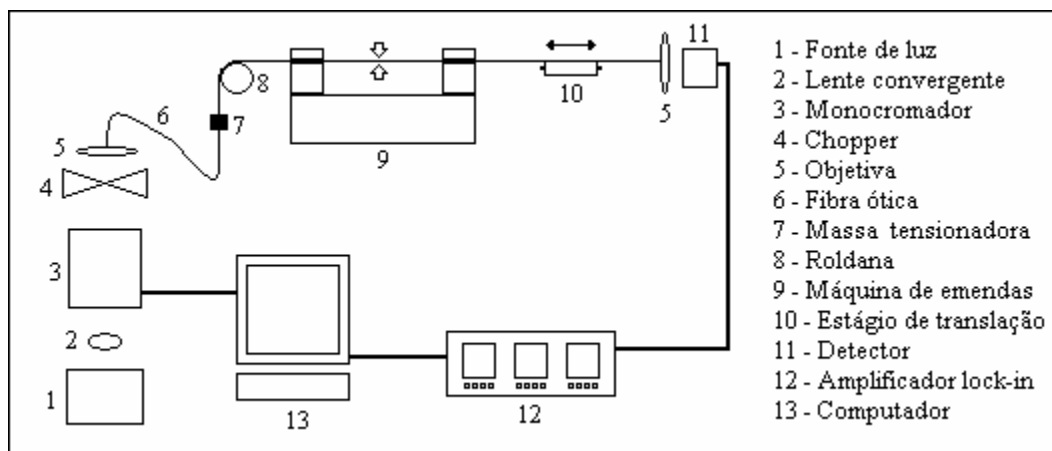
#### 4.1 LEITURA E GRAVAÇÃO DE REDES

Todo o processo de leitura e gravação das redes de Bragg e das redes de período longo foi realizado no laboratório de Laser da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelo Grupo de Dispositivos Fotônicos e Aplicações. O sistema de hidrogenação das fibras utilizado também foi construído pelo Grupo.

##### 4.1.1 LPG Produzida com Arco Elétrico

O sistema de gravação das LPG permite que o espectro de transmissão da rede seja obtido durante o processo de gravação, tornando possível acompanhar o espectro da rede e o surgimento dos picos de atenuação.

A Figura 11 mostra um diagrama esquemático do sistema utilizado para a leitura e gravação das redes de período longo em fibra ótica.



**Figura 11:** Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação das LPG.

O sistema de leitura utiliza uma lâmpada halógena de 50 W, cuja luz é acoplada a um monocromador (modelo 9050, *Sciencetech*) através de uma lente convergente. A luz selecionada pelo monocromador é modulada por um *chopper* e acoplada à fibra ótica por meio de uma lente objetiva. A luz transmitida pela fibra é focalizada por outra lente objetiva em um detector de InGaAs (*Thorlabs*) e o sinal é processado por um amplificador *lock-in* (modelo SR830, *Stanford Research Systems*). Todo este sistema é controlado por um computador. O sistema de gravação usa o método similar ao descrito por Rego *et al*, 2001, com algumas modificações.

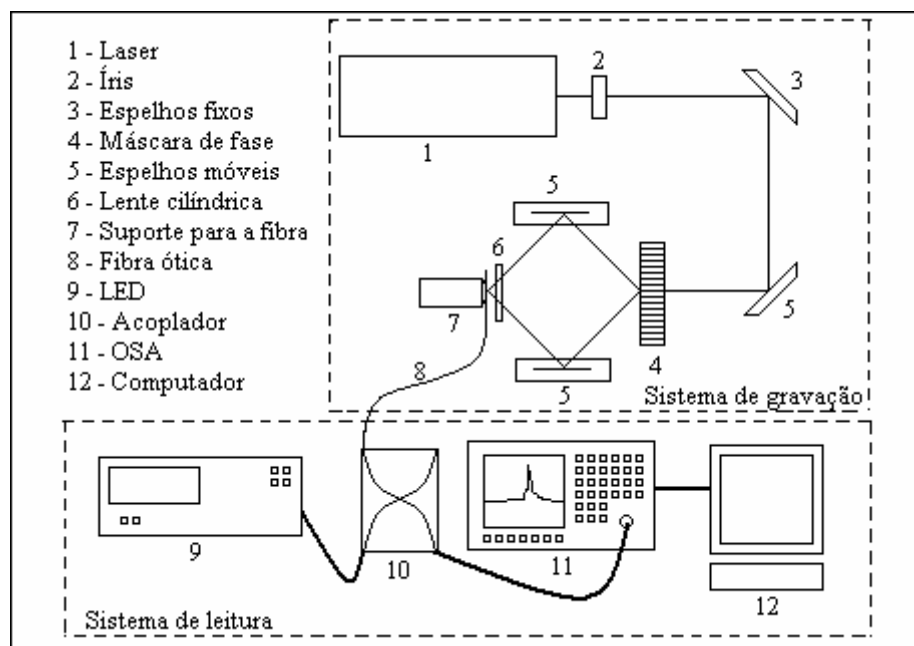
A fibra, sem a capa é inserida entre os eletrodos de uma máquina de emendas de fibras óticas (*Siemens*, modelo S46999-M7A-71). Uma das extremidades da fibra passa por uma roldana, e uma massa de 17,52 g é presa a esta para mantê-la sob tensão longitudinal constante. A outra extremidade é fixada em um estágio de translação, com uma resolução linear de 5  $\mu\text{m}$ , controlado por computador. Um arco elétrico de corrente de 12 mA e duração temporal de 0,5 s é então aplicado a fibra. Em seguida a fibra é deslocada por um comprimento igual ao período da rede e um novo arco é aplicado. Este procedimento é então repetido várias vezes gerando a alteração periódica no índice de refração da fibra que caracteriza a LPG. Usando este procedimento, foram produzidas redes com período de 595  $\mu\text{m}$  e 600  $\mu\text{m}$  contendo 40 a 60 pontos de interação.

Antes da fibra ser posicionada na máquina de emendas para efetuar a gravação das redes, esta passa por um processo de limpeza com álcool isopropílico, com o objetivo de tirar possíveis partículas de pó depositadas sobre a sua superfície que poderiam alterar os parâmetros do arco elétrico aplicado.

Para a gravação das LPG foi utilizada fibra ótica padrão de telecomunicações. Como as redes possuem grande sensibilidade a parâmetros externos, a temperatura foi monitorada por um termômetro e mantida aproximadamente constante, através de um aparelho de ar condicionado mantido ligado durante todo o experimento.

#### 4.1.2 FBG Produzida com Interferômetro e Máscara de Fase

A Figura 12 apresenta um diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de redes de Bragg inicialmente utilizado no laboratório.



**Figura 12:** Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG com interferômetro e máscara de fase.

O sistema de leitura utiliza como fonte de luz um LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2*), que opera na faixa de 1445 nm a 1645 nm. A luz acoplada à fibra e refletida pela FBG é analisada pelo analisador de espectros óticos (OSA - *Optical Spectrum Analyser, Anritsu, MS9710B*), operando com uma resolução de 0,1 nm, estabilidade de comprimento de onda de  $\pm 5$  pm, e os dados são enviados para um computador.

A gravação consiste na junção das técnicas interferométrica e de máscara de fase (KASHYAP, 1999), onde a luz ultravioleta de um laser (*New Wave, Tempest-20, Nd YAG*) é difratada pela máscara de fase e recombinada após reflexão em dois espelhos móveis com resolução angular de  $0,001^\circ$ , controlados por computador. Uma lente cilíndrica focaliza os feixes UV, formando um padrão de interferência luminosa na posição da fibra. O período espacial do padrão formado pode ser alterado mudando o ângulo dos espelhos, e determina o comprimento de onda de reflexão,  $\lambda_B$ , da rede escrita. A leitura do espectro de reflexão da

rede durante o processo de gravação permite acompanhar o processo de formação da rede fornecendo a sua largura de banda e a refletividade, e assim possibilitando a produção de uma rede que seja adequada a cada aplicação em particular.

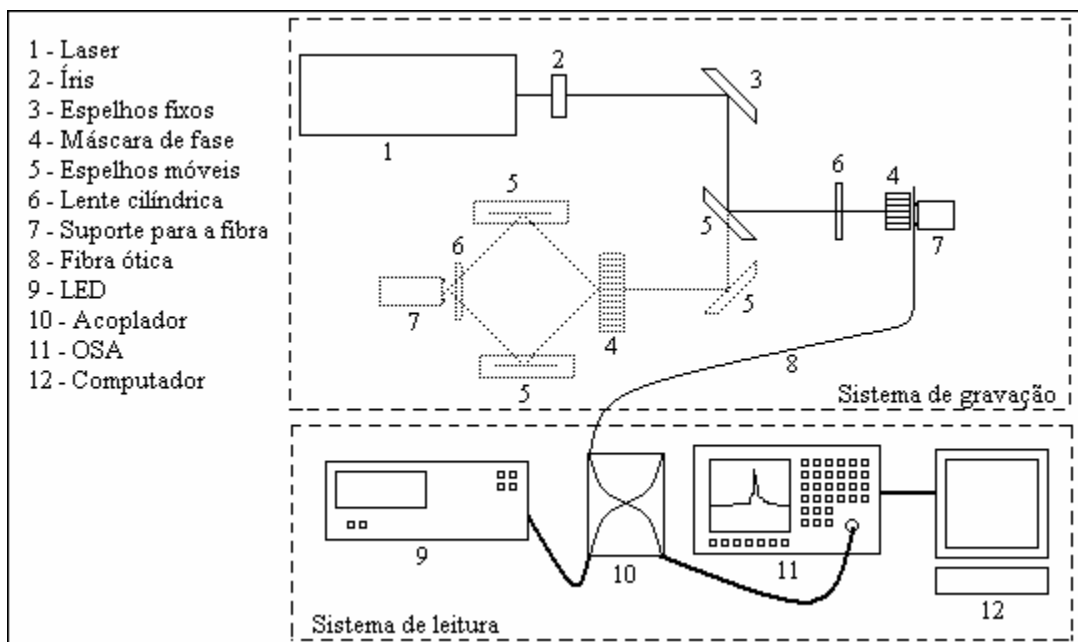
Para a gravação das FBG foram utilizadas fibra SMF hidrogenada e fibra fotossensível. Como as redes possuem grande sensibilidade à temperatura, esta foi monitorada por um termômetro durante a gravação e mantida aproximadamente constante, através de um aparelho de ar condicionado.

Antes da gravação, as fibras SMF passaram pelo processo de hidrogenação, permanecendo em uma atmosfera de hidrogênio por no mínimo duas semanas ( $150 \text{ Kg/cm}^2$ ). As fibras permanecem fotossensíveis somente enquanto o hidrogênio estiver vinculado a ela, deste modo, as fibras que não eram utilizadas na gravação, eram mantidas em um freezer, minimizando a difusão do hidrogênio para fora da fibra.

#### 4.1.3 FBG Produzida com Máscara de Fase

Para gravação de redes com largura de banda estreita e alta refletividade, foi implementada uma modificação no sistema de gravação (FIGURA 13) que permite a gravação das redes tanto pela técnica de máscara de fase quanto pela técnica interferométrica com máscara de fase. O projeto e execução desta unidade de gravação foram parte integrante deste trabalho.

Um sistema composto por um espelho montado sobre um estágio de translação movido por motor de precisão foi adicionado à montagem anterior (FIGURA 12). Este espelho redireciona a luz do laser fazendo-a incidir sobre a montagem ótica contendo uma lente cilíndrica, a máscara de fase e a fibra ótica (FIGURA 14). As ordens difratadas pela máscara formam um padrão de interferência sobre a fibra ótica. Com a translação do espelho em velocidade constante, o feixe UV, focalizado pela lente cilíndrica, faz uma varredura na máscara de fase e o padrão de interferência se desloca ao longo do comprimento da fibra. Com este sistema é possível produzir redes mais longas do que com o sistema anterior, sendo o comprimento destas redes limitado pelas dimensões da máscara de fase (1 cm).



**Figura 13:** Diagrama esquemático do sistema de leitura e gravação de FBG com máscara de fase. Os pontilhados referem-se ao sistema de gravação com a técnica interferométrica com máscara de fase.



**Figura 14:** Suporte ótico do sistema de gravação de FBG com máscara de fase contendo: a fibra, a máscara de fase e a lente cilíndrica.

A monitoração da gravação de redes de Bragg em fibra é feita em tempo real, podendo ser observada por um analisador de espectro ótico (OSA). O sistema de leitura

permite que a medida seja feita no tempo de aquisição e amostragem do sinal pelo equipamento. A saída do OSA é monitorada pelo computador, permitindo analisar a evolução do processo, assim como, o armazenamento posterior de todos os dados referentes à gravação como, por exemplo, comprimento de onda de Bragg, refletividade e largura de banda.

É importante que as extremidades das fibras que não estejam sendo usadas, sejam imersas em líquido casador de índice de refração, de forma a minimizar as reflexões de Fresnel, o que induziria sinais espúrios na medida realizada.

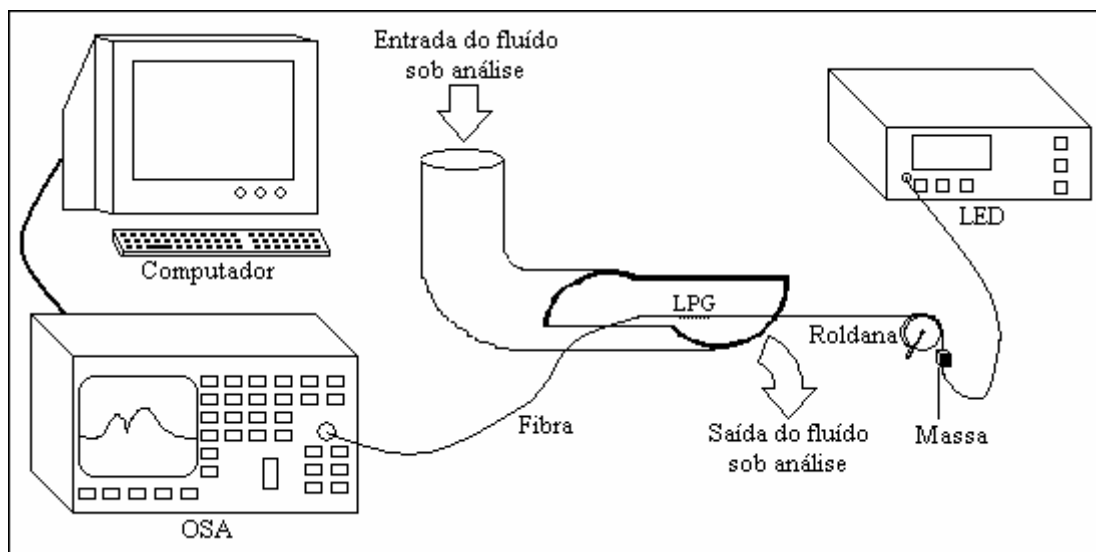
## 4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES

As FBG produzidas foram caracterizadas quanto a variações de temperatura e as LPG quanto a variações de índice de refração do meio externo a fibra.

### 4.2.1 Redes de Período Longo

A caracterização da LPG a pequenas mudanças do índice de refração, a fim de demonstrar a possibilidade da identificação de hidrocarbonetos fluindo em um duto, foi feita posicionando a rede no interior de um tubo de PVC através do qual foi provida a passagem controlada do fluido sob análise. Como as LPG são sensíveis a outros parâmetros externos como curvaturas e temperatura (VENGSARKAR *et al*, 1996), alguns cuidados foram tomados para que estes parâmetros fossem mantidos constantes durante os experimentos. A rede foi colada na parede interna do tubo e uma massa de 17,52 g foi presa à fibra para mantê-la sob tensão longitudinal constante (FIGURA 15). Durante a realização das medidas a temperatura do ambiente foi monitorada com um termômetro, mantendo-se na faixa de  $19\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ .





**Figura 15:** Caracterização da rede de período longo utilizando amostras de hidrocarbonetos.

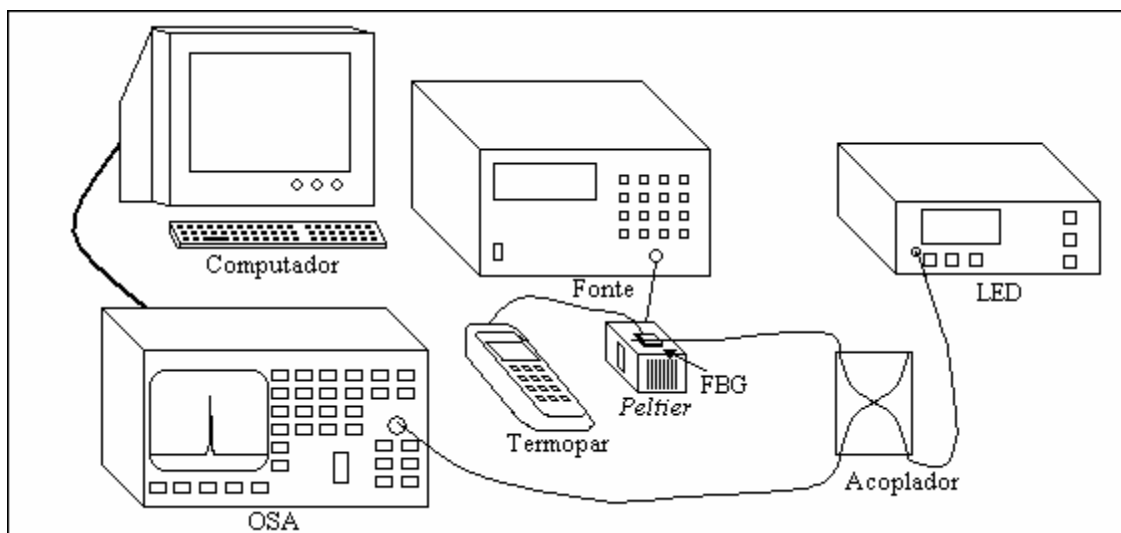
Uma das extremidades da fibra contendo a rede foi conectada a um LED superluminescente, utilizado como fonte de luz. A outra extremidade da fibra foi conectada a um analisador de espectros óticos (OSA), operando com resolução de 0,1 nm e estabilidade de comprimento de onda de  $\pm 5$  pm, utilizado para medir o comprimento de onda do vale de atenuação da LPG. No sistema, os dados coletados são enviados a um computador, e analisados por um programa em *Labview* que mostra os resultados no monitor na forma de gráfico.

O procedimento adotado para as medidas consiste em monitorar o comprimento de onda do vale de atenuação sob influência de um fluxo de hidrocarbonetos. Em um primeiro momento foram utilizados álcool, gasolina, aguarrás, tiner e querosene, em dois ciclos de amostragem. A LPG utilizada foi escolhida de tal forma que excursão do vale de atenuação caísse dentro da banda de emissão do LED para toda a faixa de variação de índices de refração das amostras utilizadas. Num segundo momento se utilizou álcool, aguarrás, tiner, nafta, querosene e gasolina como amostras e uma LPG diferente, fazendo dois ciclos de amostragem.

A utilização de diferentes hidrocarbonetos tem como objetivo comparar os deslocamentos do comprimento de onda do vale de atenuação da LPG devido aos diferentes índices de refração das amostras utilizadas.

#### 4.2.2 Redes de Bragg

A Figura 16 mostra um esquema da montagem experimental utilizada para caracterizar as redes de Bragg quanto a variações de temperatura. As redes utilizadas nesta etapa do trabalho foram produzidas usando o sistema de gravação descrito no item 4.1.2.



**Figura 16:** Caracterização térmica das redes de Bragg usando um elemento *Peltier*.

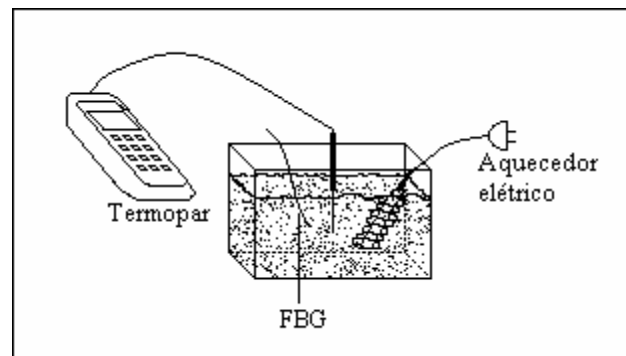
Nesta montagem, a luz de um LED superluminescente (*Superlum, Pilot-2, 1445-1645 nm*) refletida pela FBG é analisada pelo analisador de espectros ópticos e os dados são enviados para um computador (FIGURA 16).

Para determinar a sensibilidade da rede a variações de temperatura na faixa entre 7 °C e 60 °C, a FBG foi posicionada sobre um elemento *Peltier* e o seu espectro de reflexão foi acompanhado durante três ciclos consecutivos de resfriamento e aquecimento.

A temperatura fornecida pelo *Peltier* durante as leituras da rede foi medida com um termômetro (*Minipa MT-520*).

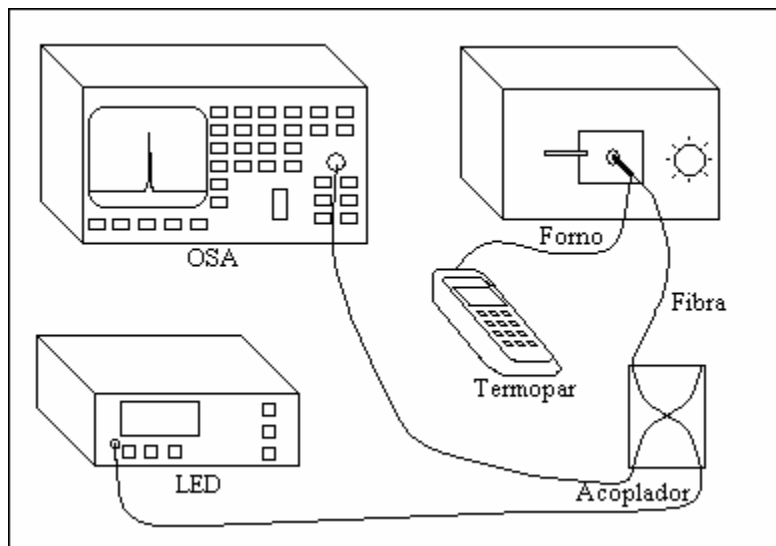
Com este sistema experimental foram caracterizados três lotes de redes de Bragg. As redes pertencentes a um mesmo lote passaram pelo mesmo processo de hidrogenação e foram gravadas no mesmo dia. Durante a gravação procurou-se manter constantes todos os parâmetros utilizados. Algumas das redes passaram por tratamentos térmicos que foram realizados em água quente e em forno elétrico.

Inicialmente uma rede do primeiro lote foi colocada em um recipiente com água, juntamente com um termopar, e a temperatura da água foi elevada até 80,4 °C, utilizando um aquecedor elétrico. A rede permaneceu no recipiente por uma hora, sendo posteriormente retirada (FIGURA 17). Após este procedimento, repetiu-se a caracterização da rede com o elemento *Peltier*, para análise da histerese térmica, pois o comprimento de onda central da rede a uma dada temperatura não assume o mesmo valor após um processo de aquecimento e resfriamento.



**Figura 17:** Tratamento térmico da FBG imersa em água.

Outras três redes, gravadas em fibra SMF hidrogenada, foram colocadas em um forno de laboratório (*QUIMIS*), com faixa de operação até 1200 °C (FIGURA 18), juntamente com um termopar. Um LED (*Superlum, Pilot-2*), foi usado como fonte de luz, iluminando o sensor ótico através de um acoplador direcional. Esse acoplador também serve para direcionar o sinal de reflexão da rede de Bragg para o equipamento de detecção (OSA, *Optical Spectrum Analyser*).



**Figura 18:** Tratamento térmico das FBG utilizando um forno de laboratório.

As FBG tratadas termicamente foram deixadas no forno por períodos que variaram de uma a três horas. O acompanhamento da evolução do comprimento de onda de Bragg foi feito somente após a estabilização da temperatura do forno, uma vez que as resistências de aquecimento promovem variações no fluxo de calor interno do forno resultando em oscilações de temperatura. Após este procedimento, repetiu-se a caracterização das redes com o elemento *Peltier*, para análise da histerese.

Das redes produzidas, algumas não foram submetidas ao forno com o objetivo de analisar a eficiência do tratamento térmico na estabilização do comprimento de onda de Bragg e na redução do desvio do comprimento de onda causado pela histerese.

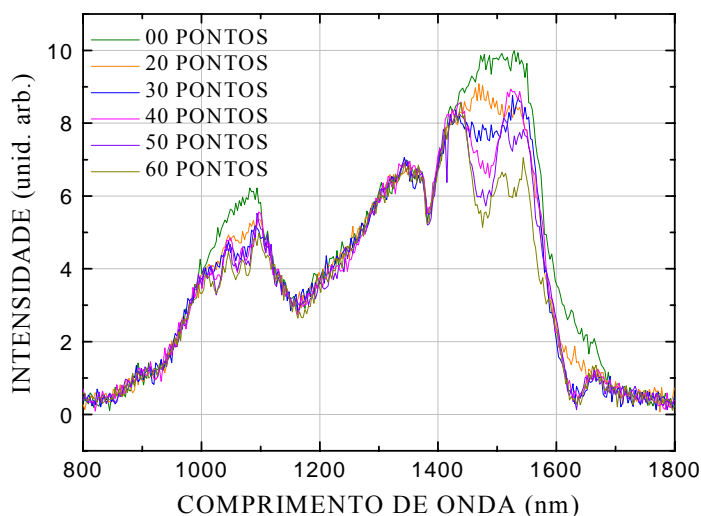
As redes fotossensíveis foram caracterizadas com o termo elemento *Peltier*, e apenas uma foi submetida a um tratamento térmico utilizando o forno de laboratório. Após o tratamento, repetiu-se a caracterização da rede com o elemento *Peltier*.

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS

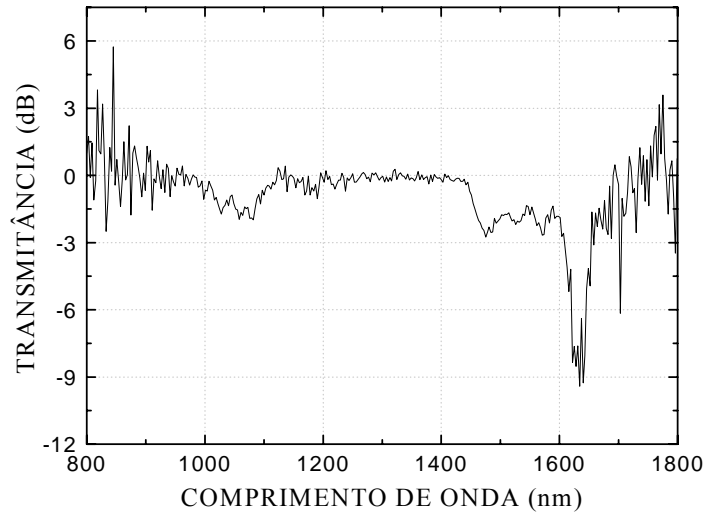
#### 5.1 REDES DE PERÍODO LONGO NA IDENTIFICAÇÃO DE FLUIDOS

Com o sistema de gravação descrito no item 4.1.1, foram escritas redes de período longo em fibra padrão de telecomunicações.



**Figura 19:** Espectros de transmissão da fibra obtidos antes do início da gravação (00 pontos), e durante o processo de gravação após 20, 30, 40, 50 e 60 pontos de interação.

A Figura 19 mostra as mudanças ocorridas no espectro de transmissão de uma fibra submetida à aplicação de arcos elétricos consecutivos com uma periodicidade espacial de 595  $\mu\text{m}$ . Os espectros foram obtidos antes do início da gravação, quando a rede foi posicionada no equipamento de gravação, e após 20, 30, 40, 50 e 60 pontos de interação. Esse acompanhamento do processo de formação da rede permite que a escrita seja realizada até que se tenha uma rede com máxima eficiência de acoplamento, facilitando assim a leitura do sensor.

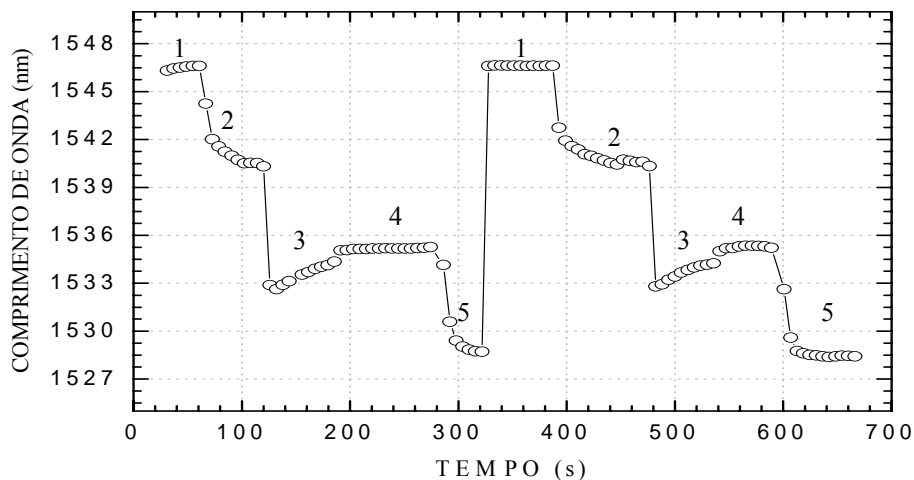


**Figura 20:** Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação.

Os vales de atenuação da rede são mostrados na Figura 20 (1475 nm e 1634 nm). Este gráfico foi obtido através da razão entre o espectro da fibra, após a gravação da rede, e o espectro da fibra antes do início do processo de gravação.

Para a caracterização da LPG como elemento sensor na detecção de hidrocarbonetos que fluem em um poliduto, a rede ( $A= 595 \mu\text{m}$ , 50 pontos) foi colada no interior de um tubo de PVC, como descrito no item 4.2.1, através do qual era provida a passagem controlada do fluido sob análise.

Foram utilizadas no experimento amostras de álcool, gasolina, aguarrás, tiner e querosene. Foram feitos dois ciclos de amostragem, com o objetivo de comparar os deslocamentos no comprimento de onda de atenuação devido aos diferentes índices de refração das amostras, e de testar a reprodutibilidade dos dados fornecidos pelo sensor. Os dados coletados e enviados ao computador, são mostrados no monitor na forma de gráfico, como indicado na Figura 21.

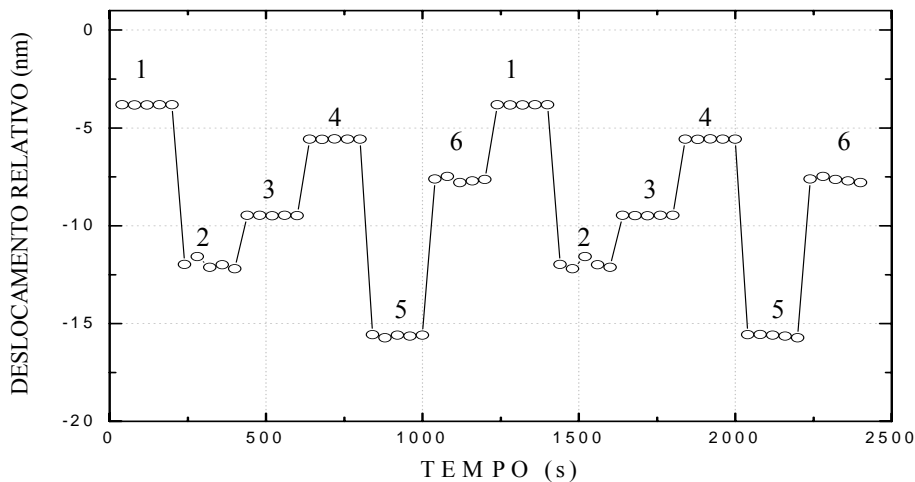


**Figura 21:** Posição do vale de atenuação da LPG ( $\lambda = 595 \mu\text{m}$ , 50 pontos) quando fluem no duto as amostras (1 - álcool, 2 - gasolina, 3 - aguarrás, 4 - tiner, 5 - querosene) em dois ciclos de amostragem.

Na Figura 21, o comprimento de onda do vale de atenuação da LPG utilizada (1544 nm no ar medido imediatamente após a gravação) desloca-se quando a rede entra em contato com as amostras de hidrocarbonetos, sendo que a sua posição depende do índice de refração da amostra. A detecção dos deslocamentos no comprimento de onda de ressonância ocorre num tempo de aproximadamente 3 segundos após a rede ter entrado em contato com o fluido, sendo este tempo limitado principalmente pela capacidade de processamento eletrônico do sistema experimental. Os fluidos foram inseridos no duto um após o outro na tentativa de simular um fluxo contínuo e de evitar que a rede entrasse em contato com o ar no intervalo de tempo entre a passagem de dois fluidos consecutivos. O tempo em que a rede ficou em contato com cada fluido diferente variou entre 1 e 2 minutos. Durante este intervalo de tempo foi feito o acompanhamento da posição do vale de atenuação da rede. Apesar do deslocamento do vale poder ser medido logo após a rede entrar em contato com o fluido ( $\sim 3\text{s}$ ), observa-se que o deslocamento total não ocorre neste tempo. Ou seja, os valores medidos de posição do vale levam um tempo maior até se estabilizarem. Isto ocorre devido principalmente à mistura dos fluidos que são lançados em seqüência no duto. A grande sensibilidade da rede a alterações do índice de refração do meio no qual ela se encontra imersa, resulta em mudanças significativas no comprimento de onda de atenuação. Estas mudanças fazem com que o valor do comprimento de onda

central do vale sofra um desvio máximo em torno de 18 nm, desde 1528,35 nm (para o querosene) até 1546,61 nm (para o álcool).

Em um segundo momento, utilizando outra LPG ( $\lambda = 600 \mu\text{m}$ , 60 pontos) e amostras de álcool, aguarrás, tiner, nafta, querosene e gasolina, em dois ciclos de amostragem, foi obtido o gráfico da Figura 22. Para evitar os problemas anteriores gerados pela mistura dos fluidos, após a inserção de cada uma das amostras a extremidade final do duto era fechada e as medidas realizadas. Sendo assim, para cada amostra era realizada uma seqüência de medidas mantendo-se a rede em contato com o fluido parado. O intervalo de tempo dado entre o término de uma seqüência de medidas e o início da outra foi de 40 s, tempo suficiente para que toda a amostra anterior escoasse e o duto só contivesse um dado fluido no seu interior. Os deslocamentos do vale de atenuação da rede foram medidos com relação a posição do vale da LPG imersa no ar.



**Figura 22:** Deslocamento do vale de atenuação da LPG ( $\lambda = 600 \mu\text{m}$ , 60 pontos) quando da presença de amostras de: 1 - álcool, 2 - aguarrás, 3 - tiner, 4 - nafta, 5 - querosene, 6 - gasolina.

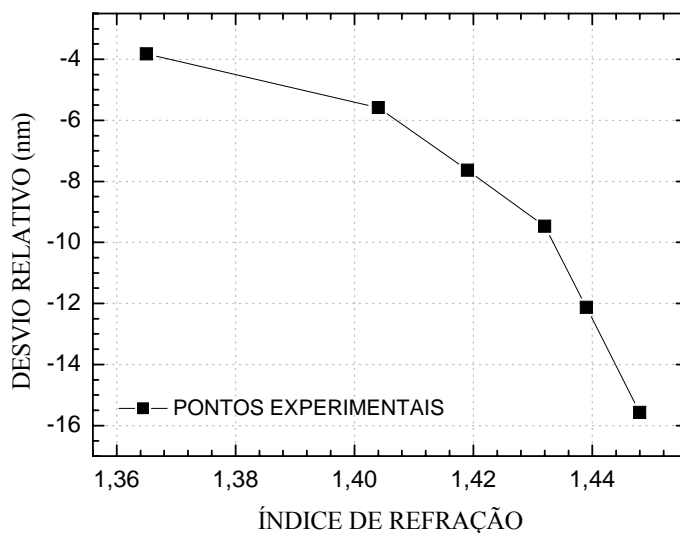
O maior deslocamento no comprimento de onda central do vale de atenuação foi observado para o querosene (-15,57 nm). Quando se inicia um novo ciclo, os comprimentos de onda do vale de atenuação assumem valores aproximadamente iguais aos medidos no ciclo anterior. Os pequenos desvios detectados estão dentro do limite de estabilidade em comprimento de onda fornecido pelo equipamento experimental (OSA).



**Tabela 1:** Índice de refração das amostras e correspondentes deslocamentos relativos no comprimento de onda da LPG.

Amostras	Índice de Refração	Deslocamento (nm)
álcool	1,365	-3,824
aguarrás	1,439	-12,125
tíner	1,432	-9,468
nafta	1,404	-5,582
querosene	1,448	-15,570
gasolina	1,419	-7,633

A Tabela 1 fornece os valores dos índices de refração das amostras utilizadas no experimento com os respectivos deslocamentos em comprimento de onda para a LPG ( $\Lambda = 600 \mu\text{m}$ , 60 pontos), onde estão representados graficamente na Figura 23. O índice de refração da casca da fibra utilizada é 1,458.



**Figura 23:** Deslocamento relativo em comprimento de onda da LPG em função ao índice de refração das amostras. As linhas ligando os pontos são apenas para facilitar a visualização.

A sensibilidade média da rede é  $2,6 \times 10^{-6} \text{ pm}^{-1}$  para a região compreendida entre os índices 1,432 (tíner) e 1,448 (querosene).

## 5.2 REDES DE BRAGG NA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

As redes de Bragg foram gravadas em lotes e em dias diferentes utilizando inicialmente a técnica interferométrica com máscara de fase, descrita no item 4.1.2. Alguns parâmetros de gravação variaram e outros foram mantidos iguais, entre eles resolução do OSA de 0,1 nm, e tempo de gravação de aproximadamente 20 minutos.

As redes indicadas na Tabela 2 foram gravadas em fibra SMF hidrogenada. No processo de hidrogenação utilizado no laboratório, as fibras óticas são deixadas em uma atmosfera de hidrogênio sob uma pressão de 150 kgf/cm<sup>2</sup>, por no mínimo duas semanas, podendo permanecer por meses. Dentre as redes, duas foram gravadas com a fibra deslocada com relação a posição onde está focalizado o padrão de interferência. Este deslocamento foi de 1 mm na rede 7 e 0,5 mm na rede 8. Essas redes foram gravadas com o objetivo de verificar a influência do grau de focalização nas características das redes produzidas.

A potência do laser foi mantida constante durante as gravações. No primeiro lote foi alterado o alinhamento dos espelhos o que ocasionou a diferença observada no comprimento de onda da rede 1 em comparação com as redes 2 e 3.

**Tabela 2:** Parâmetros das FBG (fibra SMF hidrogenada) utilizadas nos experimentos.

<b>Dia da gravação</b>	<b>Redes</b>	<b>Temperatura ambiente (°C)</b>	<b>Comprimento de onda de Bragg (nm)</b>	<b>Largura de banda (nm)</b>	<b>Refletividade (dB)</b>
22/fev/05	1	24 ± 1	1535,00	0,36	23,20
	2		1540,00	0,41	25,60
	3		1539,70	0,39	30,00
21/mar/05	4	18 ± 1	1539,73	0,31	18,20
	5		1539,80	0,36	19,96
	6		1539,85	0,36	20,63
5/mai/05	7	20 ± 1	1535,00	0,50	23,81
	8		1535,52	0,38	20,92

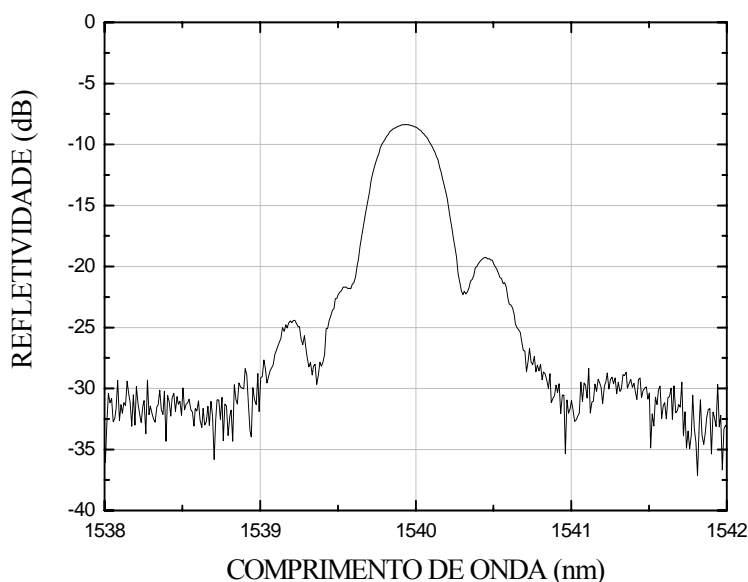
Foram gravadas duas redes em fibra fotossensível (TABELA 3) a fim de comparar os dados obtidos com as outras redes gravadas em fibra SMF hidrogenada.

**Tabela 3:** Parâmetros das FBG (fibra fotossensível) utilizadas nos experimentos.

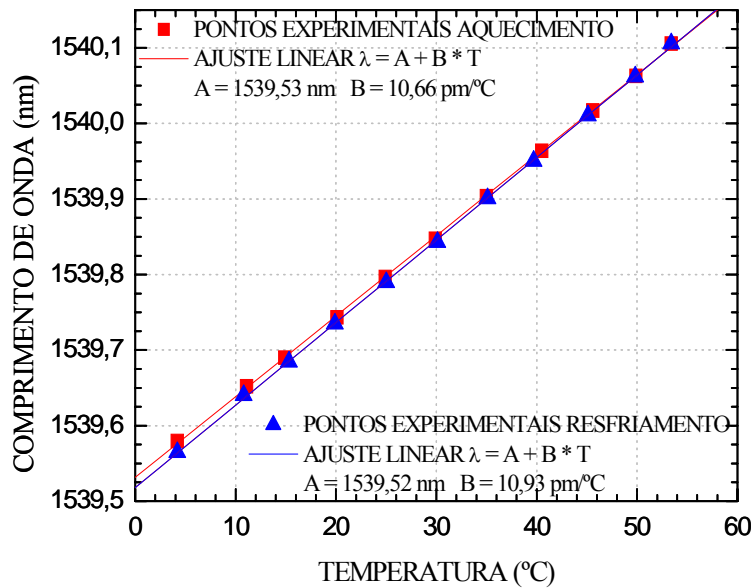
Dia da gravação	Redes	Temperatura ambiente (°C)	Comprimento de onda de Bragg (nm)	Largura de banda (nm)	Refletividade (dB)
27/jun/05	S1	20 ± 1	1532,50	0,32	19,76
	S2		1532,46	0,32	20,23

Os dados apresentados nas Tabelas 2 e 3 foram medidos antes de retirar a fibra do suporte no interferômetro de gravação.

A Figura 24 apresenta o espectro de reflexão típico obtido para uma FBG gravada em fibra SMF hidrogenada, os lóbulos laterais presentes no espectro são devidos à não apodização da rede durante o processo de escrita (KASHYAP, 1999).

**Figura 24:** Espectro de reflexão da rede 2 (TABELA 2).

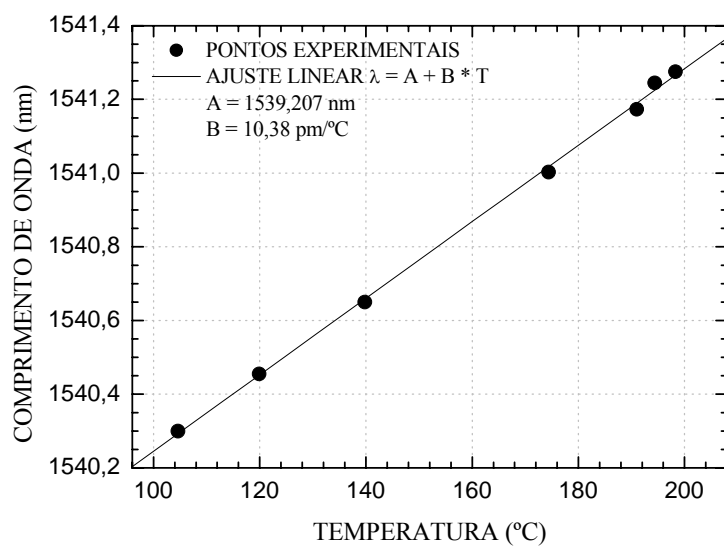
Todas as FBG foram caracterizadas com um termo elemento *Peltier* na faixa de temperaturas entre 7°C e 60°C, sendo submetidas à resfriamento e aquecimento, em três ciclos consecutivos.



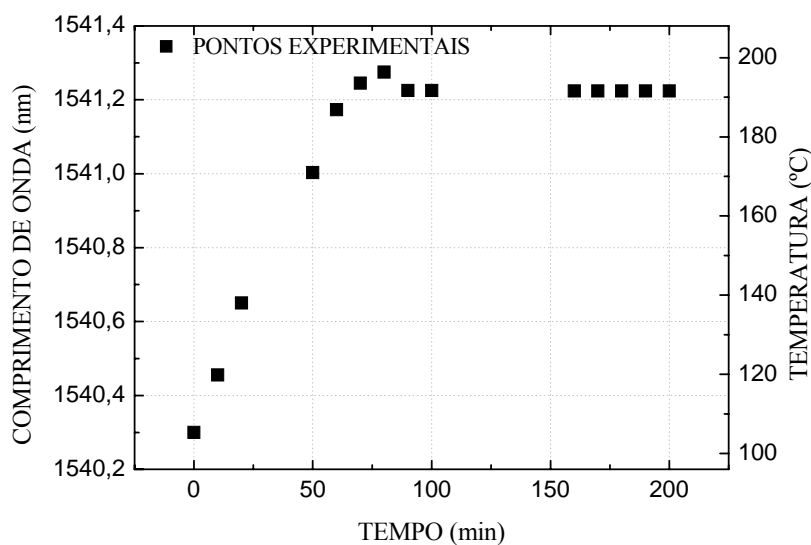
**Figura 25:** Caracterização da FBG (rede 4) com o *Peltier* no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento.

A Figura 25 mostra a evolução do comprimento de onda da rede 4 como função da temperatura no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento, utilizando o *Peltier* em um intervalo de aproximadamente 60 °C. Para os três ciclos analisados o comportamento foi semelhante, mostrando que o comprimento de onda não retorna ao seu valor inicial após um ciclo completo de aquecimento e resfriamento. Esta histerese apresentada pela FBG resultou em um desvio no comprimento de onda de reflexão de aproximadamente 12 pm para a temperatura de 7 °C. Para os três ciclos consecutivos o desvio total foi de 33 pm para a temperatura de 7 °C. A sensibilidade térmica média apresentada por esta FBG foi de 10,8 pm/°C.

As redes 1, 2 e 4 passaram por um tratamento térmico sendo colocadas em um forno de laboratório e a rede 3 foi colocada em um recipiente com água fervente. Estes tratamentos foram realizados com o intuito de reduzir a histerese e estabilizar os defeitos evitando assim imprecisões nas medidas de temperatura feitas pelo sensor. As demais redes não receberam tratamento térmico.



**Figura 26:** Comprimento de onda versus temperatura (rede 4), mantida por três horas e vinte minutos em um forno de laboratório, com temperatura variando entre 100 °C e 198 °C.

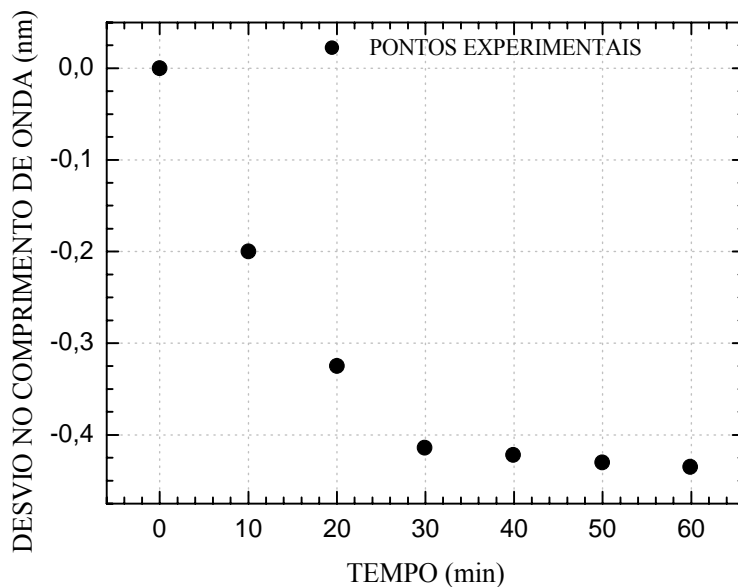


**Figura 27:** Evolução do comprimento de onda (rede 4) no forno.

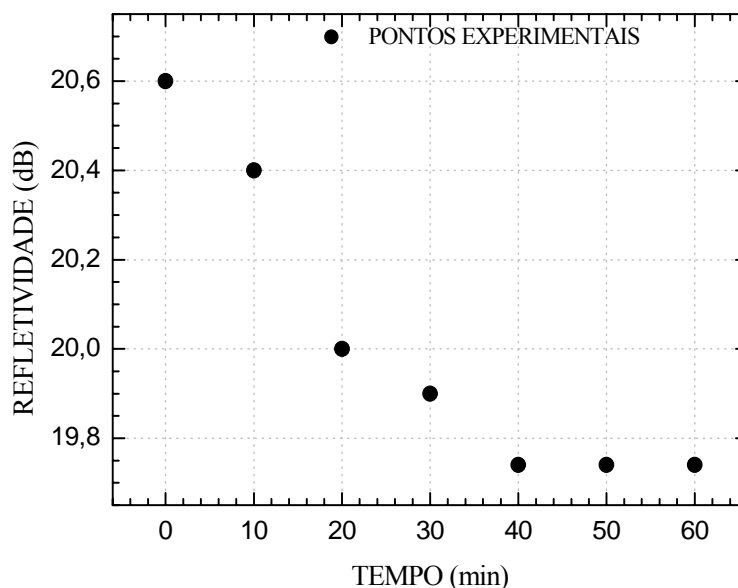
As Figuras 26 e 27 mostram resultados da rede 4 no interior do forno. O comprimento de onda se desloca linearmente com a temperatura resultando em uma sensibilidade de 10,38 pm/°C. A rede 4 foi colocada no forno com a temperatura

inicialmente em 100 °C, chegando a 198 °C após 80 minutos, posteriormente a temperatura manteve-se constante por duas horas, em 192,4 °C. Neste período de temperatura estável, observou-se uma tendência a estabilidade no comprimento de onda. Este mesmo procedimento foi adotado para a rede 1.

A rede 2 foi colocada no forno quando a temperatura estava constante em aproximadamente 190 °C. A Figura 28 representa a evolução do desvio no comprimento de onda da rede 2 a partir do instante em que a rede foi colocada no interior do forno (zero minuto) permanecendo por uma hora, a temperatura de 190 °C. O acompanhamento da evolução do desvio no comprimento de onda foi feito a cada dez minutos. Neste período, observou-se um desvio de 0,435 nm em direção aos menores comprimentos de onda. Este desvio se aproxima de um valor estável após um tempo de 30 minutos de tratamento.



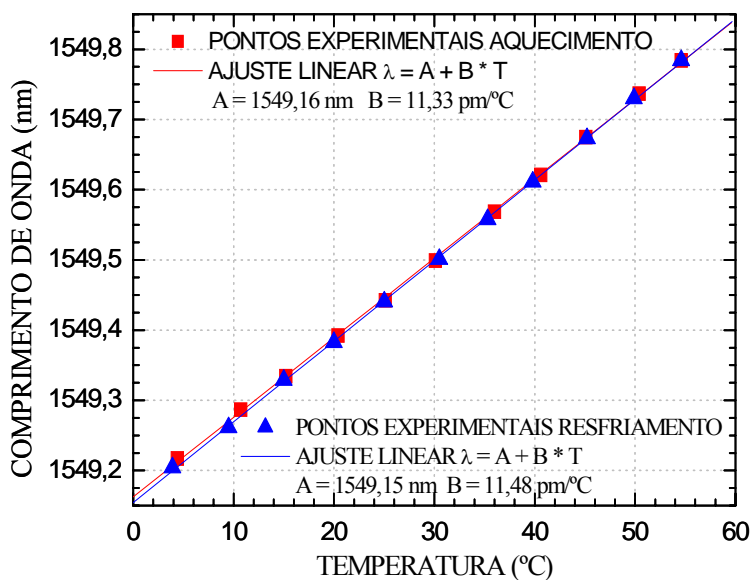
**Figura 28:** Desvio no comprimento de onda (rede 2) mantida por uma hora no forno a 190 °C.



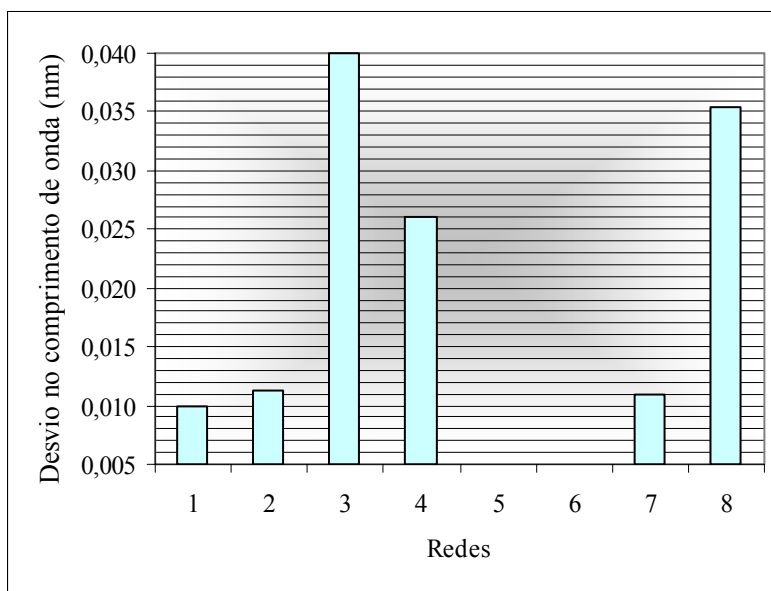
**Figura 29:** Refletividade em função do tempo (rede 2) no forno.

A Figura 29 mostra a evolução da refletividade da rede 2 no interior do forno, medida a cada 10 minutos, a temperatura de aproximadamente 190 °C. A partir do instante em que a rede foi colocada no forno até a sua retirada, observou-se uma queda da refletividade de 0,86 dB. A refletividade continua a decrescer após os 30 minutos iniciais do tratamento. Esta só atinge um valor estável após 40 minutos de tratamento.

Após a retirada das FBG do forno, foi realizada novamente a caracterização com o *Peltier*. A Figura 30 mostra, para a rede 4 tratada termicamente, a evolução do comprimento de onda de Bragg como função da temperatura utilizando o *Peltier* em um intervalo de aproximadamente 60 °C. Para os três ciclos analisados o comportamento foi semelhante, mostrando uma redução da histerese. Os possíveis desvios ocasionados no comprimento de onda da rede para a temperatura de 7 °C são menores do que a estabilidade em comprimento de onda do OSA. A sensibilidade térmica, para o primeiro ciclo, medida novamente após o tratamento da rede resultou num valor de 11,33 pm/°C.



**Figura 30:** Caracterização da FBG (rede 4) com o *Peltier* no primeiro ciclo de aquecimento e resfriamento, após a rede ter sido submetida ao tratamento térmico.



**Figura 31:** Análise da histerese para as redes gravadas em fibra SMF antes do tratamento térmico. Os desvios foram medidos a temperatura de 7 °C.

A Figura 31 faz uma comparação entre as histereses das várias redes na forma de gráfico, medidos a temperatura de 7 °C, para as redes gravadas em fibra SMF hidrogenada.

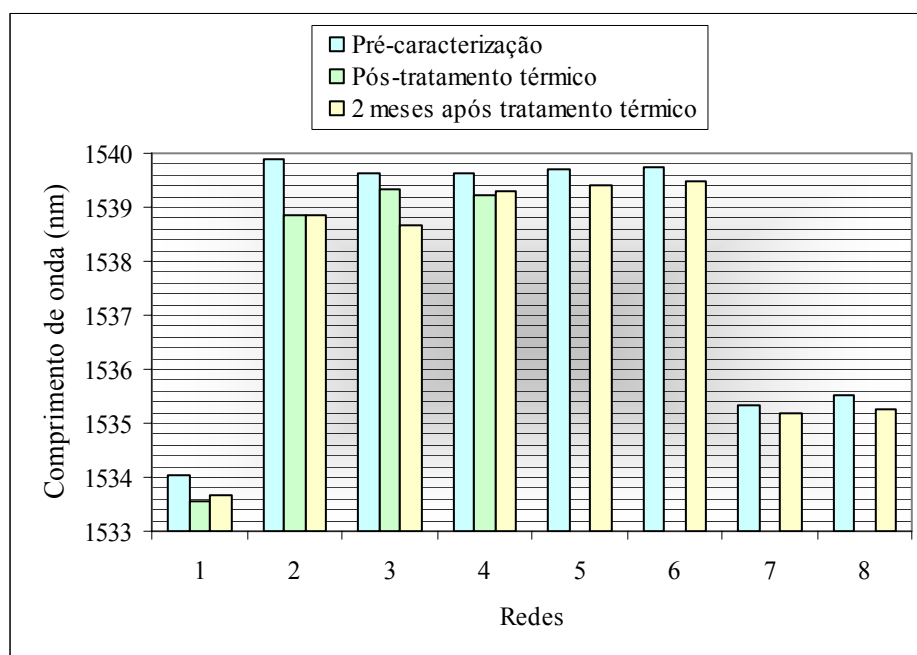


Logo após o tratamento térmico no forno (redes 1, 2 e 4) a histerese representada pelo desvio no comprimento de onda está abaixo do limite de detecção do sistema experimental, permanecendo assim conforme observado em uma caracterização realizada dois meses após o tratamento térmico.

A rede 3, que teve o tratamento térmico realizado em água a temperatura de 80,4 °C, tinha inicialmente um desvio no comprimento de onda de 40 pm, que após o tratamento não foi mais detectado.

Para as redes restantes que não foram tratadas termicamente (redes 5, 6, 7 e 8), o desvio no comprimento de onda não é detectado pelo sistema nas redes 5 e 6, e nas redes 7 e 8, não foi observado em nova caracterização feita dois meses depois.

A Figura 32 mostra a análise do comprimento de onda na forma de um gráfico e a Tabela 4 fornece a análise quantitativa, para as redes gravadas em fibra SMF hidrogenada.



**Figura 32:** Análise do comprimento de onda a temperatura de 7 °C para as redes gravadas em fibra SMF hidrogenada.

**Tabela 4:** Comprimento de onda de Bragg das redes.

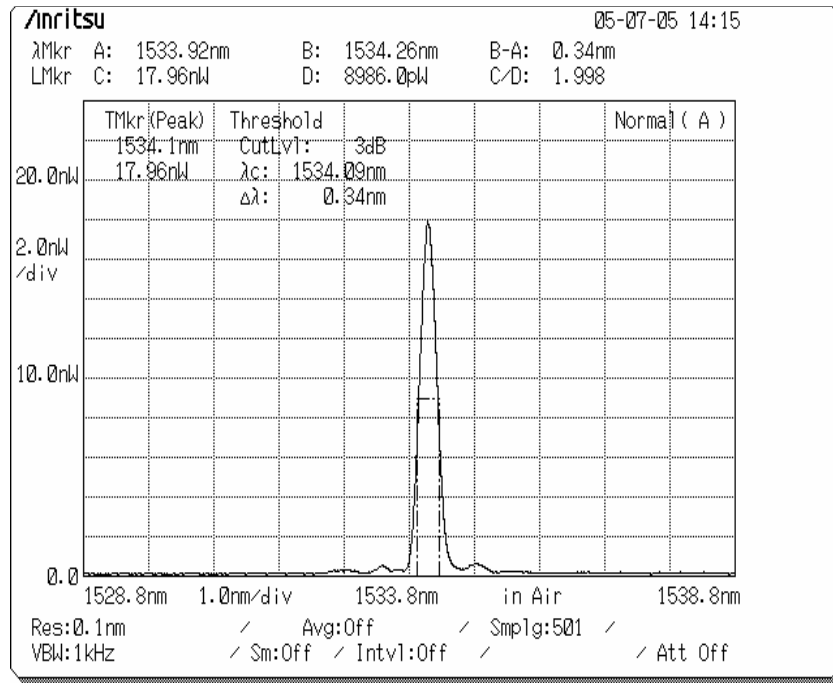
	Comprimento de onda de Bragg a 7 °C (nm)							
	rede 1	rede 2	rede 3	rede 4	rede 5	rede 6	rede 7	rede 8
<b>Pré-caracterização</b>	1534,025	1539,891	1539,627	1539,627	1539,708	1539,742	1535,338	1535,520
<b>Pós-tratamento Térmico</b>	1533,571	1538,849	1539,315	1539,235	-	-	-	-
<b>2 meses após trat. Térmico</b>	1533,653	1538,859	1538,658	1539,281	1539,426	1539,472	1535,186	1535,260

Nas redes 1, 2 e 4 tratadas termicamente no forno, o comprimento de onda se desloca de 0,454, 1,042 e 0,392 nm para menores valores, respectivamente. Dois meses após o tratamento, quando as redes foram caracterizadas novamente, houve um pequeno deslocamento ( $\leq 82$  pm) na direção de maiores comprimentos de onda. Para a rede 3, submetida a tratamento térmico em água a 80,4 °C, esse deslocamento foi de 312 pm e após dois meses foi observado novo deslocamento de 657 pm na mesma direção.

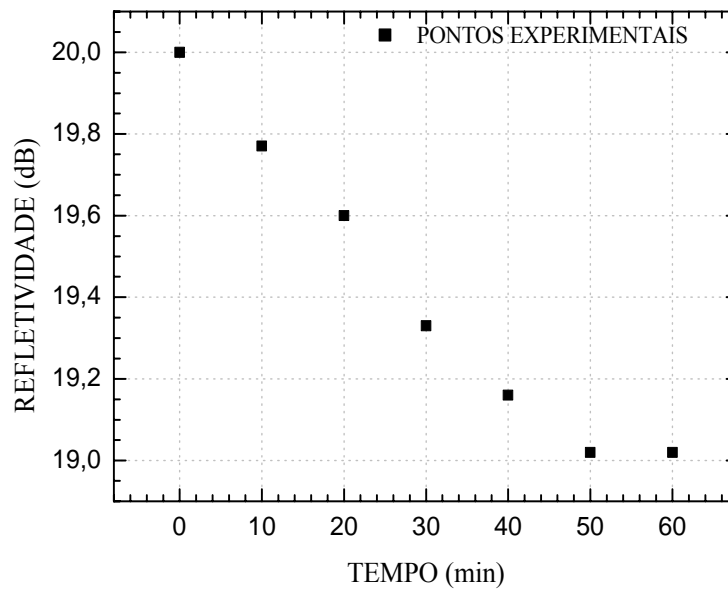
Nas demais redes que não receberam tratamento, o comprimento de onda desloca-se para menores comprimentos de onda, com o passar do tempo, no entanto estes deslocamentos são menores ( $\approx 0,3$  nm) do que os deslocamentos totais das redes tratadas termicamente.

As redes fotossensíveis (redes S1 e S2) também foram gravadas utilizando o interferômetro com máscara de fase. No caso deste lote de redes, somente a rede S2 foi tratada termicamente no forno. Não foi observada histerese na caracterização térmica destas redes.

A Figura 33 mostra o espectro de reflexão da rede S2 quando esta se encontrava no interior do forno. A rede S2 foi posicionada no interior do forno somente quando a temperatura estava estável em aproximadamente 190 °C, permanecendo por uma hora. A posição do comprimento de onda central permaneceu em 1534,09 nm durante todo o tratamento térmico.



**Figura 33:** Espectro de reflexão da rede S2, no interior do forno a 190 °C.



**Figura 34:** Refletividade da rede S2 dentro do forno em função do tempo.

A Figura 34 apresenta um gráfico da refletividade em função do tempo durante o tratamento térmico para a rede S2, sendo que a temperatura permaneceu constante a 190 °C,

monitorada a cada 10 minutos. Observou-se uma queda da refletividade de 1,08 dB durante o tratamento térmico.

**Tabela 5:** Sensibilidade das redes.

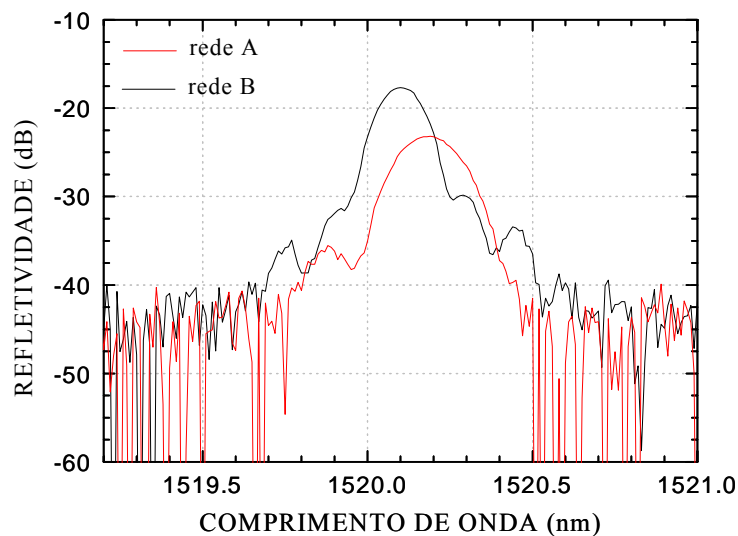
Redes	Sensibilidade ( $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ )		
	Pré- caracterização	Pós-tratamento térmico	2 meses após o trat térmico
1	11,38	11,26	10,75
2	11,27	10,90	10,50
3	10,40	10,40	10,70
4	10,80	11,50	11,40
5	10,82	-	10,66
6	10,92	-	11,03
7	11,03	-	10,72
8	11,12	-	10,84
S1	10,25	-	-
S2	10,40	10,46	-

A Tabela 5 fornece uma média dos diversos valores da sensibilidade das FBG para os três ciclos de aquecimento e resfriamento, para a pré-caracterização (antes do tratamento térmico), após o tratamento térmico e dois meses após o tratamento térmico.

### 5.3 GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG ESTREITAS

Após a modificação do sistema de gravação, foram produzidas FBG utilizando a técnica de escrita com máscara de fase e laser UV descrita em 4.1.3, tornando possível a escrita de redes mais longas e, portanto espectralmente mais estreita.

Os espectros da primeira (rede A) e segunda rede (rede B) gravada com este método em fibra fotossensível não hidrogenada estão representados na Figura 35.



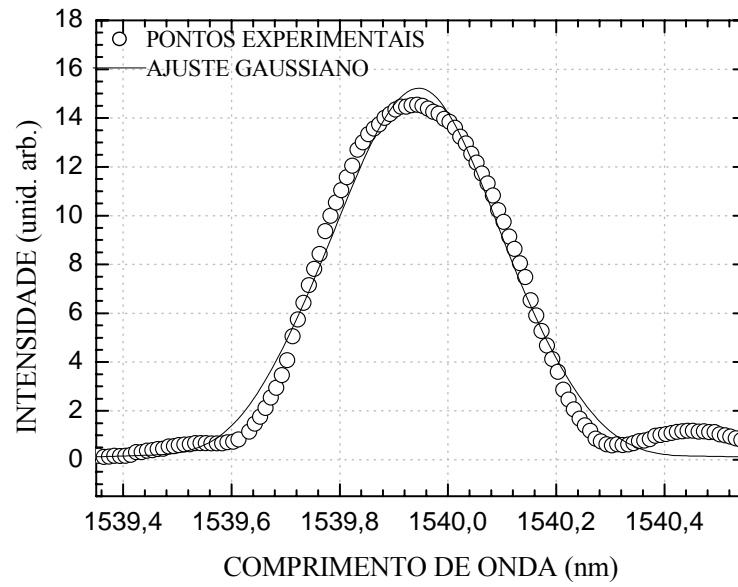
**Figura 35:** Espectros de reflexão das redes A e B gravadas com máscara de fase.

A Tabela 6 fornece os parâmetros obtidos logo após o processo de gravação, com a fibra ainda posicionada no suporte do sistema de gravação. A potência do laser foi mantida constante durante as gravações, a resolução do OSA em 0,1 nm e a temperatura do laboratório a  $19 \pm 1$  °C.

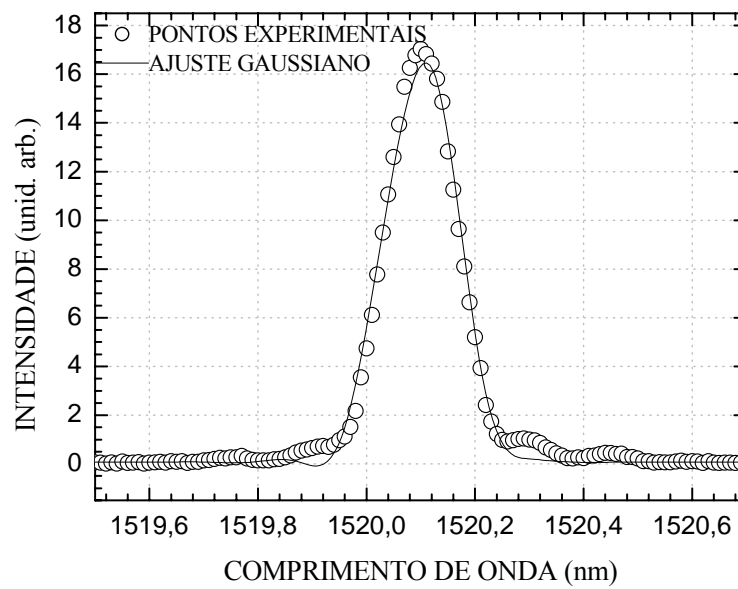
**Tabela 6:** Parâmetros das FBG (fibra fotossensível) produzidas com a técnica de máscara de fase.

Redes	Comprimento de onda de Bragg (nm)	Largura de banda (nm)	Refletividade (dB)	Velocidade de deslocamento do motor (m/s)	Comprimento da rede (mm)
A	1520,20	0,22	24,55	0,002	3,5
B	1520,10	0,16	26,00	0,001	5,0

As Figuras 36 e 37 mostram os espectros da rede 2 (gravada com o interferômetro com máscara de fase) e da rede B (gravada com máscara de fase), com ajuste gaussiano. O espectro da rede 2 apresenta uma incerteza na posição do comprimento de onda de Bragg de  $\pm 0,61$  pm, enquanto que na rede mais estreita (FIGURA 36), a incerteza na posição do comprimento de onda é  $\pm 0,21$  pm.



**Figura 36:** Ajuste gaussiano da rede 2, gravada utilizando o interferômetro e a máscara de fase.



**Figura 37:** Ajuste gaussiano da rede B, gravada com máscara de fase.

## CAPÍTULO 6

### DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

#### 6.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS LPG

Com o sistema de gravação utilizando a técnica ponto-a-ponto, foram gravadas redes de período longo, que foram posteriormente caracterizadas como elemento sensor para a detecção de hidrocarbonetos que fluem em polidutos.

As Figuras 21 e 22 do Capítulo 5 mostram o deslocamento do comprimento de onda central do vale de atenuação devido à presença dos diferentes hidrocarbonetos utilizados nos experimentos. A posição destes comprimentos de onda foi obtida através de um programa em *Labview*, que recebe os dados do analisador de espectros óticos. Este programa faz a razão entre o espectro de transmissão da rede, medido a cada 3 segundos, e o espectro da fonte, medido antes do início da caracterização e armazenado pelo programa, e então localiza o ponto onde a derivada é zero.

Observa-se que na presença da primeira amostra de álcool a posição do vale de atenuação da LPG ( $A= 595 \mu\text{m}$ , 50 pontos) assume o valor de 1546,61 nm. Deslocamentos sucessivos nesta posição ocorrem quando há a inserção das outras amostras, retornando para 1546,61 nm quando se inicia o segundo ciclo com a amostra de álcool. A grande sensibilidade da rede a alterações de índice resulta em mudanças no comprimento de onda de atenuação desde 1528,35 nm (para o querosene) até 1546,61 nm (para o álcool) o que corresponde a um faixa total de deslocamento de 18,26 nm. Apesar do sistema experimental permitir a identificação do fluido num tempo de 3 s, as medidas com fluxo apresentaram um tempo de detecção da 1 a 2 minutos. Este tempo é resultado da detecção da mistura dos fluidos consecutivos em diferentes proporções durante a transição. Este comportamento não é observado na Figura 22 quando a medida é realizada somente após a transição total de um fluido para outro. Na Figura 22 os deslocamentos negativos resultam de um deslocamento do vale para menores comprimentos de onda quando o índice de refração do meio aumenta em direção ao índice da casca. O maior deslocamento na posição

do vale ocorre para o querosene,  $\delta\lambda = -15,57$  nm, uma vez que o querosene é o fluido com índice de refração mais próximo do da casca da fibra e portanto se encontra na região de maior sensibilidade da rede.

Para as amostras analisadas, mesmo as menores variações relativas em comprimento de onda ( $\delta\lambda = 3,824$  nm) podem ser facilmente detectadas pelo OSA.

Para faixa de índices de refração entre 1,432 e 1,448 a sensibilidade média da rede foi de  $2,6 \times 10^{-6}$  pm<sup>-1</sup>. Esta sensibilidade resulta em uma mínima variação de índice de refração de  $2,6 \times 10^{-5}$  que pode ser medida pelo OSA com precisão em comprimento de onda de  $\pm 5$  pm.

A resposta do sensor é muito rápida ( $\sim 3$  segundos) quando comparada com a resposta de trabalhos anteriores (SPIRIN *et al*, 2000). Naquele trabalho, uma rede de Bragg recoberta com um polímero é utilizada como elemento sensor, resultando num tempo de detecção de 20 minutos. A diferença se deve ao fato de que nesse trabalho o sensor LPG entra diretamente em contato com a substância, sendo o tempo de resposta limitado pelo tempo de aquisição do equipamento, enquanto que sensor FBG citado detecta as mudanças no comprimento de onda somente após o polímero absorver a substância e sofrer uma dilatação, resultando numa tensão mecânica na rede.

## 6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TRATAMENTO TÉRMICO DAS FBG

As redes de Bragg gravadas em fibras SMF hidrogenada e caracterizadas termicamente numa faixa de temperatura compreendida entre 7 e 60 °C apresentam pequenos valores de histerese ( $< 40$  pm) em ciclos consecutivos de aquecimento e resfriamento. Esta histerese é representada por deslocamentos sucessivos do comprimento de onda de Bragg a uma dada temperatura para menores valores. Quando submetida a tratamento térmico a 190 °C por uma hora, a FBG (rede 2) apresentou uma pequena queda (0,86 dB) na refletividade e um deslocamento de 0,435 nm para menores comprimentos de onda na posição central do pico de reflexão. Estes valores decaem rapidamente nos primeiros 30 a 40 minutos do tratamento tendendo a se estabilizar no tempo restante.



Para a rede 4, após sua temperatura ter sido aumentada desde 100 °C até 198 °C em 80 minutos. A estabilização do comprimento de onda, quando a temperatura foi mantida constante, indica que tal processo também foi efetivo na estabilização da FBG.

Para todas as redes tratadas termicamente a histerese na caracterização térmica não foi mais observada para a faixa de temperatura entre 7 e 60 °C.

Estes comportamentos observados para as redes hidrogenadas podem ser associados ao papel desempenhado pelo hidrogênio na fibra. Um dos efeitos do hidrogênio é o de aumentar a troca fotoinduzida no índice de refração do núcleo em comparação com uma fibra não-hidrogenada. Como consequência a exposição ao padrão de interferência UV de gravação aumenta a modulação de índice,  $\Delta n$ , o que contribui para um acréscimo na refletividade das redes (EQUAÇÃO 22, CAPÍTULO 3).

O desvio para o azul observado no comprimento de onda de Bragg quando a rede é tratada termicamente é esperado devido a diminuição no  $n_{eff}$  do núcleo causada pela difusão do hidrogênio para fora da fibra (EQUAÇÃO 15, CAPÍTULO 3). Esta diminuição no  $n_{eff}$  também contribui para um aumento na refletividade da rede. No entanto, a relaxação térmica dos defeitos reduz o  $\Delta n$  de modulação contribuindo para uma diminuição da refletividade.

O efeito combinado destes dois fatores é observado nas medidas pela redução na refletividade das FBG durante o tratamento térmico em forno (CANNING *et al*, 2001 e MASUDA *et al*, 2004).

O resultado final do tratamento térmico, para as redes gravadas em fibra hidrogenada é a rápida estabilização ( $\sim 1$  hora) do comprimento de onda de Bragg e da refletividade, além da redução na histerese térmica. O mesmo resultado é alcançado para redes não tratadas e para a rede tratada em temperatura menor (rede 3), porém num tempo consideravelmente maior ( $\sim 2$  meses). Convém ressaltar que esta estabilização refere-se a utilização da rede para faixas de temperatura inferiores a utilização no tratamento térmico.

Quando o tratamento térmico foi realizado com uma rede gravada em fibra fotossensível não-hidrogenada o comportamento foi diferente. O comprimento de onda de Bragg não sofreu um deslocamento durante o tratamento térmico (190 °C por 1 hora) e a queda da refletividade foi maior (1,08 dB). A queda na refletividade é uma consequência direta da redução do  $\Delta n$  causada pela relaxação dos defeitos, sem no entanto uma

diminuição tão grande no  $n_{eff}$  como aquela que ocorre no tratamento térmico de fibras hidrogenadas.

A sensibilidade das redes gravadas foi em torno de 11 pm/°C, valores comparáveis aos encontrados na literatura (MASUDA *et al*, 2004).

O sistema para gravação de redes mais estreitas se mostrou efetivo na redução da incerteza na medida da posição central do pico de reflexão. Para uma sensibilidade média de 11 pm/°C a incerteza de  $\pm 0,61$  pm na posição de pico da rede corresponde a uma incerteza de 0,11 °C na determinação da temperatura, reduzida para 0,04 °C para a incerteza de  $\pm 0,21$  pm.

### 6.3 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se a possibilidade de estender o processo ótico de gravação para a produção de redes de período longo com o uso de radiação UV, para obtenção de larguras de bandas mais estreitas. Essas redes possibilitariam uma detecção mais precisa da variação do comprimento de onda com relação às mudanças do meio externo, levando a um melhor desempenho do sensor. Neste caso, os processos de tratamento térmicos realizados nas redes de Bragg devem também ser aplicados e estudados para as LPG gravadas óticamente, em função do uso de fibras hidrogenadas ou fotossensíveis na escrita das redes.

Uma continuidade natural do trabalho é o de produzir redes estáveis em temperaturas superiores (da ordem de 700 °C). Uma aplicação importante destes dispositivos seria o uso de sensores a fibra para medição da temperatura em colunas de destilação de petróleo, onde a temperatura é acima de 500 °C.

O desenvolvimento de um protótipo do sensor para testes em campo é outra possibilidade de trabalho. Para o desenvolvimento do protótipo, devem ser realizados estudos para encapsular o transdutor tornando-o um dispositivo mais robusto. Além disto, métodos alternativos de detecção devem ser desenvolvidos, que permitam substituir o OSA no processo de leitura das redes.

Finalmente, o próprio processo físico-químico envolvido na estabilização das redes e da evolução do comprimento de onda que não são bem compreendidos, demandando um estudo teórico-experimental para a sua compreensão.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIYAMA, M., NISHIDE, K., SHIMA, K. WADA, A., YAMAUCHI, R. A novel long period fiber grating using periodically released stress of pure-silica core fiber. **Optical Fiber Communication Conference and Exhibit**, 1998, OFC'98, Technical Digest, p. 276-277, 1998.
- BHATIA, V. end VENGSARKAR, A. M. Optical fiber long-period grating sensors. **Optics Letters**, v. 21, n. 9, p. 692-694, 1996.
- 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. **Conference on Optical Fiber Communication**, p. 346-347, 1997.
- CANNING, J., SOMMER, K., ENGLUND, M. Fibre Gratings for high temperature sensor applicatins. **Measurement Science and Technology**, v. 12, p. 824-828, 2001.
- DAKIN, J. and CULSHAW, B. Optical Fiber Sensor – Principles and Components, **Boston: Artech House**, v. 1, 1997.
- HILL, K.O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S. Photosensitivity in optical fiber waveguide: Application to reflection filter fabrication. **Appl. Phys. Lett.**, v. 32, p. 647-649, 1978.
- HILL K. O. and MELTZ G. Fiber Bragg Grating Technology Fundamentals and Overview. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1263-1276, 1997.
- JAMES, S. W. and TATAM, R.P. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. **Measurement Science and Technology**, v. 14, R49 - R61, 2003.

KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MÜLLER, M. FABRIS, J.L. Optical Sensor Based on fiber grating for Hydrocarbon Detection in aquatic Environment. **XXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, v. 6, 2004.

KASHYAP, P. Fiber Bragg Grating, San Diego, **Academic Press**, 1999.

KERSEY, A. D., DAVIS, M. A., PATRICK, H. J., LEBLANC, M., KOO, K. P., ASKINS, C. G., PUTNAM, M. A., FRIEBELE, E. J. Fiber Grating Sensor. **Journal of Lightwave Technology**, v. 15, n. 8, p. 1442-1463, 1997.

LEMAIRE, P. J., ATKINS, R. M., MIZRAHI, V., REED, W. A. High pressure H<sub>2</sub> loading as a technique for achieving ultrahigh sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibres. **Electronics Letters**, v. 29, n. 13, p. 1191-1193, 1993.

LOH, W. H., COLE, M. J., ZERVAS, M. N., BARCELOS, S., LAMING, R. I. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique. **Optics Letters**, v. 20, p. 2051-2053, 1995.

MASUDA, Y., NAKAMURA, M., KOMATSU, C., FUJITA, K., YAMAUCHI, M., KIMURA, M., MIZUTANI, Y., KIMURA, S., SUZAKI, Y., YOCUSHI, T., NAKAGAWA, K., EJIMA, S. Wavelength Evolution of Fiber Bragg Gratings Fabricated From Hydrogen-Loaded Optical Fiber During Annealing. **Journal of Lightwave Technology**, v. 22, n. 3, p. 934-941, 2004.

MELTZ, G., MOREY, W. W., GLENN, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by transverse holographic method. **Optics Letters**, v. 14, p. 823-825, 1989.

MALO, B., ALBERT, J., HILL, K. O., BILODEAL, F., JOHNSON, D. C. Effective index drift from molecular hydrogen diffusion in hydrogen-loaded optical fibres and its effect on Bragg grating fabrication. **Electronics Letters**, v. 30, p. 442-444, 1994.

OTHONOS A. Fiber Bragg Gratings. **Review of Scientific Instruments**, v. 68, p. 4309-4341, 1997.

- PATRICK, H. J., KERSEY, A. D., BUCHOLTZ, M. K., EWING, K. J., JUDKINS, J. B., VENGSARKAR, A.M. Chemical Sensor Based on Long Period Fiber Grating Response to Index of refraction. **OSA Technical Digest Series**, v. 11, p. 420-421, 1997.
- 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**. v. 8, p. 1223-1225, 1996.
- REGO, G., OKHOTNIKOV, O., DIANOV, E., SULIMOV, V. High-Temperature Stability of Long-Period Fiber Gratings Produced Using an Electric Arc. **IEEE Journal of Lightwave Technology**, v. 19, p. 1574-1579, 2001.
- SENIOR, J. M. Optical fiber communications: principles and practice. **New York: Prentice Hall**, 1992.
- SILVA JÚNIOR, D. N. Fibras Ópticas. **Érica Editora LTDA**, 1990.
- SPIRIN, V. V., SHLYAGIN, M. G., MIRIDONOV, S. V., JIMÉNEZ, F. J. M., GUTIÉRREZ, R. M. L. Fiber Bragg Grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection. **Optics and Lasers in Engineering**, v. 32, p. 497-503, 2000.
- VENGSARKAR, A. M., LEMAIRE, P. J., JUDKINS, J. B., BHATIA, V., ERDOGAN, T., SIPE, J.E. Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters. **Journal of Lightwave Technology**, v. 14, p. 58-65, 1996.
- 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**, v. 5, n. 5, p. 1373-1378, 1999.
- WANG, Y., GRANT, J., SHARMA, A., MYERS, G. Modified Talbot Interferometer for Fabrication of Fiber-Optic Grating Filter Over a Wide Range of Bragg Wavelength and Bandwidth Using a Single Phase Mask, **Journal of Lightwave Technology**, v.19, p. 1569-1573, 2001.

## **RESUMO:**

Este trabalho descreve a produção de redes de Bragg e de período longo em fibras óticas, e a caracterização destas redes como dispositivos sensores na detecção de hidrocarbonetos que fluem em polidutos, bem como na monitoração de sua temperatura. O trabalho foi realizado no Laboratório de Laser da UTFPR. As redes de período longo foram produzidas pela aplicação ponto-a-ponto do arco elétrico de uma máquina de emendas de fibras óticas e caracterizadas como sensores de índices de refração de meios exteriores à fibra. Essa caracterização foi realizada usando diferentes amostras de fluidos tais como, álcool, gasolina, aguarrás, tiner, querosene e nafta. O maior deslocamento em comprimento de onda apresentado pela rede foi de 15,57 nm na presença do querosene. A sensibilidade média ao índice de refração da rede foi  $2,6 \times 10^{-6} \text{ pm}^{-1}$  para a região compreendida entre 1,432 (tiner) e 1,448 (querosene). Esta sensibilidade resulta em uma mínima variação de índice de refração de  $2,6 \times 10^{-5}$  que pode ser medida por um analisador de espectros óticos com precisão em comprimento de onda de  $\pm 5 \text{ pm}$ . O tempo de resposta do sensor foi da ordem de 3 segundos. As redes de Bragg foram caracterizadas como dispositivo sensor de temperatura dos fluidos. As redes de Bragg foram produzidas inicialmente em fibras SMF hidrogenadas e posteriormente em fibras fotossensíveis, utilizando a técnica de escrita interferométrica com máscara de fase e laser ultravioleta. Os dispositivos foram caracterizados como sensor de temperatura, tendo sido feito um estudo para estabilização térmica dos mesmos. A sensibilidade das redes variou desde 10,2 nm/°C até 11,4 nm/°C. A precisão deste tipo de sensor está intimamente relacionada com a largura de banda espectral da rede, portanto, um sistema de gravação utilizando a técnica de escrita com máscara de fase e laser UV foi implementado, tornando possível a escrita de redes mais longas com menor largura de banda.

## **PALAVRAS-CHAVE**

Fibras óticas, redes de Bragg, redes de período longo, detectores óticos, índice de refração, temperatura, hidrocarbonetos.

## **ÁREA/SUB-ÁREA DE CONHECIMENTO**

3.04.00.00 – 7 Engenharia Elétrica.

3.04.06.01 – 3 Teoria Eletromagnética, Microondas, Propagação de Ondas, Antenas.

3.04.06.00 – 5 Telecomunicações.

2005

N°: 380