

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

---

**DISSERTAÇÃO**  
apresentada ao CEFET-PR  
para obtenção do título de

**MESTRE EM CIÊNCIAS**

por

**RICARDO CANUTE KAMIKAWACHI**

---

**ESTUDO DE REDES DE PERÍODO LONGO COMO  
ELEMENTO SENSOR DE HIDROCARBONETOS**

---

Banca Examinadora:

Presidente e Orientador:

**PROF. DR. JOSÉ LUÍS FABRIS**

**CEFET-PR**

Examinadores:

**PROF. DR. ADRIANA LÚCIA CERRI TRIQUES**

**PUC-RJ**

**PROF. DR. PAULO JOSÉ ABATTI**

**CEFET-PR**

**PROF. DR. ALEXANDRE DE A. PRADO POHL**

**CEFET-PR**

Curitiba, Outubro de 2.003.

**RICARDO CANUTE KAMIKAWACHI**

**ESTUDO DE LPG COMO ELEMENTO SENSOR DE  
HIDROCARBONETOS**

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

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Curitiba

2.003

## **AGRADECIMENTOS**

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

Aos amigos da pós-graduação, Rosane, Jean, Cícero, Paulo, Aleksander, Ilda e outros, pela oportunidade de compartilhar conhecimentos.

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

Ao CEFET-PR, pelas instalações oferecidas para a realização deste trabalho.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, Fausto e Carmen,  
aos meus irmãos, Keila e Renan e ao meu país.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	ix
<b>RESUMO</b> .....	x
<b>ABSTRACT</b> .....	xi
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 MOTIVAÇÕES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	2
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	3
2.1 FIBRAS ÓTICAS.....	3
2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM FIBRAS DE ÍNDICE DEGRAU.....	4
2.3 FOTOSENSIBILIDADE EM FIBRAS ÓTICAS.....	8
2.4 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS.....	10
2.5 REDES DE PERÍODO LONGO.....	12
2.6 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO.....	15
2.6.1 Técnicas de escrita utilizando máscara de amplitude.....	16
2.6.2 Técnicas de escrita utilizando iluminação UV ponto a ponto.....	17
2.6.3 Técnicas de escrita com laser de CO <sub>2</sub> e arco elétrico.....	18
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	21
3.1 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA.....	21
3.1.1 Sistema de leitura de redes de período longo.....	21
3.1.2 Sistema de gravação de redes de período longo.....	22
3.1.3 Sistema de caracterização de redes de período longo.....	23
3.2 DESENVOLVIMENTO.....	27
3.2.1 Processo de gravação da rede de período longo.....	27
3.2.2 Caracterização das redes de período longo.....	28
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	31
4.1 REDES GRAVADAS.....	31
4.2 UTILIZAÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO COMO ELEMENTO SENSOR.....	35
4.2.1 Sensor de presença de hidrocarbonetos em água.....	35

4.2.2 Sensor de mistura gasosa.....	37
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>41</b>
5.1 CONCLUSÕES.....	41
5.2 TRABALHOS FUTUROS.....	42
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>43</b>

## LISTA DE FIGURAS

1	Dimensões e índices de refração para 3 tipos de fibra.....	4
2	Geometria da fibra de índice degrau usada no estudo dos modos de propagação.....	4
3	Defeitos paramagnéticos em fibras em fibras dopadas com Germânio.....	9
4	Transição do defeito GeO para o defeito GeE' pela absorção de um fóton.....	9
5	Ilustração de uma rede de Bragg uniforme com modulação de índice e período constante. Também são mostrados os vetores de onda da rede, da radiação incidente e da radiação difratada.....	11
6	Diagrama de acoplamento de modos para um comprimento de onda arbitrário.....	13
7	Sistema de gravação de redes de período longo utilizando um laser ultravioleta. Esta montagem faz uso de duas técnicas, ponto a ponto e com uma máscara de amplitude	17
8	Sistema de gravação de redes de período longo fazendo uso de uma máquina de emendas.....	18
9	Sistema de gravação de redes de período longo fazendo uso de um laser de CO <sub>2</sub> .....	19
10	Diagrama esquemático do sistema de leitura da LPG utilizado para acompanhar a evolução da LPG durante o processo de escrita.....	22
11	Diagrama esquemático do sistema utilizado na escrita das LPG.....	23
12	Diagrama esquemático do recipiente utilizado na caracterização da LPG, quanto a sua sensibilidade à pequenas variações de índice de refração.....	24
13	Diagrama esquemático do sistema utilizado na caracterização das LPG quanto a sua sensibilidade à pequenas variações de índice de refração.....	25
14	Sistema de caracterização sensibilidade da LPG quanto à presença de gasolina em ambientes hidrográficos.....	25
15	Diagrama esquemático do recipiente utilizado na caracterização da LPG, como elemento sensor para detecção de hidrocarbonetos em ambientes hidrográficos.....	26
16	Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 1).....	32
17	Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 1).....	32
18	Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 2).....	33
19	Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 2).....	33

20	Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 3).....	34
21	Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 3).....	34
22	Variação da posição do maior comprimento de onda de ressonância da rede 1, devido a presença de gasolina.....	36
23	Variação da posição do menor comprimento de onda de ressonância da rede 3, devido a presença da mistura de gás.....	38
24	Variação da posição do maior comprimento de onda de ressonância da rede 3, devido a presença da mistura de gás.....	39

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- FBG - *Fiber Bragg Gratings* (redes de Bragg)
- LPG - *Long Period Gratings* (redes de período longo)
- UV - Ultravioleta
- MCVD - *Modified Chemical Vapor Deposition* (processo modificado de deposição química)
- OSA - *Optical Spectrum Analyzer* (analisador de espectros óticos)
- PVC - Poli (Cloroeto de vinila)

## RESUMO

Este trabalho descreve a produção e a caracterização de redes de período longo (LPG) como elemento sensor para a detecção de hidrocarbonetos em diferentes ambientes. Tanto a produção quanto as caracterizações foram realizadas no Laboratório de Laser do CEFET-PR. São abordados aspectos referentes aos princípios de produção e funcionamento do dispositivo. São apresentados os resultados obtidos na produção e na caracterização das redes, bem como os sistemas experimentais desenvolvidos para estes fins. O método empregado para a escrita de redes foi o da aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico, sendo produzidas redes com períodos de 598, 604 e 614  $\mu\text{m}$  operando na terceira janela de transmissão em torno de 1,55  $\mu\text{m}$ . O sistema desenvolvido para a leitura pode também ser utilizado durante o processo de escrita, possibilitando o acompanhamento do processo de formação do dispositivo. As redes foram caracterizadas em função da variação do índice de refração do meio externo em duas diferentes situações, uma na presença de gasolina em ambiente hídrico e outra na presença de uma mistura de gases Propano e Butano em ambiente atmosférico. As redes apresentaram deslocamentos de 6 nm na presença de gasolina e 0,6 nm na presença da mistura de gases. Esses resultados apontam para a possibilidade da utilização das redes de período longo para o sensoriamento de contaminantes, derivados de petróleo, no meio ambiente.

## *ABSTRACT*

This work describes the production and characterization of long period gratings (LPG) as sensors for the hydrocarbon detection in different environments. Both the production and characterization were carried out at the Laser Laboratory of CEFET-PR. Aspects concerning to the production and operation principles are shown. The results obtained from the grating production and characterization, as well as the experimental set-up developed to these goals are presented. The method used to write the gratings was the application of point-to-point electrical arch discharge, resulting in grating periods of 598, 604 and 614  $\mu\text{m}$  operating at the third window transmission around 1.55  $\mu\text{m}$ . The reading system developed can also be used during the writing process, which allows to follow the device formation process. The gratings were characterized as a function of modification on the refractive index of the external surrounding environment for two different conditions: the first one in the presence of gasoline in an aquatic environment and the second one in the presence of propane and butane in atmospheric environment. For these cases, the gratings showed wavelenght shift of 6 nm and a 0.6 nm, respectively. These results point to the possibility of using the long period gratings as a sensor for petroleum pollutant compounds presence in the environment.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 MOTIVAÇÕES

Os atuais sensores à fibra ótica tiveram seus desenvolvimentos a partir de dois importantes avanços da ciência realizados na década de 60: o desenvolvimento do laser (1960) e das fibras óticas de baixa perda (1966). Nos anos 70 os primeiros trabalhos usando tais fibras foram realizados com o propósito de sensoriamento. Desde então, sensores à fibra ótica têm despertado cada vez mais o interesse dos pesquisadores. Os estudos têm dado atenção principalmente às novas técnicas de produção destes sensores, às suas aplicações e ao desenvolvimento de fibras com novas características.

Os sensores à fibra ótica podem ser classificados em dispositivos intrínsecos e extrínsecos. Em um dispositivo extrínseco o elemento sensor é externo a fibra. Em uma das técnicas fazendo uso de um dispositivo extrínseco, a fibra é usada para acoplar a luz da região de medida e transportá-la até um interferômetro *Fabry-Perot*, que monitora a reflexão de *Fresnel* no final da fibra. Estes sensores são utilizados principalmente no monitoramento de tensões mecânicas. Nos dispositivos intrínsecos o elemento sensor está inserido dentro da própria fibra. Dentre os dispositivos intrínsecos, os que mais têm chamado a atenção dos pesquisadores são as redes de Bragg (*FBG – Fiber Bragg Grating*), elementos sensores que após a detecção transmitem a informação no espectro de reflexão da rede e as redes de período longo (*LPG – Long Period Grating*) que carregam a informação no espectro de transmissão.

Sensores utilizando redes de Bragg têm sido aplicados para monitoramento da variação de temperatura e/ou tensões longitudinais. Os sensores baseados em redes de período longo, além de serem sensíveis à variação de temperatura e tensões longitudinais, são sensíveis ao índice de refração do meio circunvizinho à rede, possibilitando, através desta característica, o monitoramento da concentração química do meio (BHATIA, *et al*, 1.997).

Além da aplicação na tecnologia de sensores, estudos mostram a aplicação de LPG em filtros de rejeição de banda (VENGSARKAR *et al*, 1.996a) e equalizadores de ganho (VENGSARKAR *et al*, 1.996b).

Dentre as principais motivações para o estudo destes sensores, podem ser citadas as características únicas das fibras óticas, que tornam os sensores compactos, leves, invioláveis, imunes a interferências eletromagnéticas, operação eletricamente passiva o que possibilita sua utilização em ambientes inflamáveis ou explosivos e podem ainda serem multiplexados em uma rede simples de fibra ótica. Outro aspecto favorável é a possibilidade de monitoração remota em tempo real: como o elemento sensor está inserido na fibra ótica, a informação coletada é transportada através de uma fibra até o local onde é feita a análise, sem a necessidade de que uma pessoa se desloque até o local de medida.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é produzir redes de período longo e estudar sua aplicação como elemento sensor na detecção da presença de hidrocarbonetos em dois diferentes ambientes: hídrico e atmosférico. Uma das aplicações deste sensor pode ser o monitoramento de pontos, onde podem ocorrer vazamentos, de uma refinaria ou oleodutos. Desta forma, em princípio é possível uma rápida detecção do problema, minimizando os impactos ambientais ocasionados por um acidente desses. Outra possibilidade de aplicação é a detecção da presença de gases em tubulações de transporte e distribuição. Desta forma, se o meio externo tem seu índice de refração alterado por algum motivo, por exemplo a presença de uma nova substância, esta alteração pode ser verificada pela análise do deslocamento do pico de atenuação. É estudada e analisada a técnica de gravação de redes utilizando o arco elétrico de uma máquina de emendas de fibra ótica. As redes produzidas são caracterizadas em ambiente hídrico com amostras de gasolina comercial e em ambiente atmosférico com uma mistura de gás propano e gás butano.

## 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 2 faz-se uma revisão da literatura sobre as características das diferentes fibras óticas. A teoria que descreve o comportamento de uma rede de período longo também é tratada nesse capítulo, assim como os processos de gravação de redes. O Capítulo 3 descreve em detalhes o desenvolvimento da metodologia proposta. No Capítulo 4 relatam-se os resultados obtidos. E, finalmente, o

Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados, as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 FIBRAS ÓTICAS

Sistemas de comunicação usando fibras óticas como meio transmissor começaram a ter grande importância na década de 80. Devido às características das fibras tais como baixa perda e grande largura de banda, elas se tornaram ideais para transmitir sinais de voz, vídeo e dados.

Fibras óticas usadas em sistemas de comunicações, são guias de onda feitos de material transparente que guiam luz na região do visível e do infravermelho por longas distâncias. Uma fibra ótica consiste geralmente de um cilindro de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), chamado de núcleo, recoberto por uma casca cilíndrica feita com o mesmo material mas com índice de refração menor, conhecida como casca. A diferença de índice de refração se deve a diferentes concentrações de elementos dopantes (KASHYAP, 1.999).

As fibras óticas podem ser classificadas quanto ao perfil do índice de refração e quanto a quantidade de modos que se propagam no guia, sendo monomodo quando apenas um modo se propaga e multimodo quando muitos modos se propagam. Se o núcleo de fibra ótica tem um índice de refração uniforme ao longo de sua seção reta ela é conhecida como fibra de índice degrau. Se o núcleo tem um índice não uniforme que diminui gradualmente a partir do centro do núcleo em direção à interface núcleo-casca, ela é chamada de fibra de índice gradual.

Para fibras de perfil de índice degrau a casca tem um índice de refração uniforme ao longo da seção reta da fibra dado por:

$$n_2 = n_1(1 - \Delta) \quad (1)$$

onde:

- $n_1$  é o índice de refração do núcleo e
- $n_2$  é o índice de refração da casca.

A figura 1 mostra as dimensões e os índices de refração para fibras frequentemente usadas em telecomunicações.

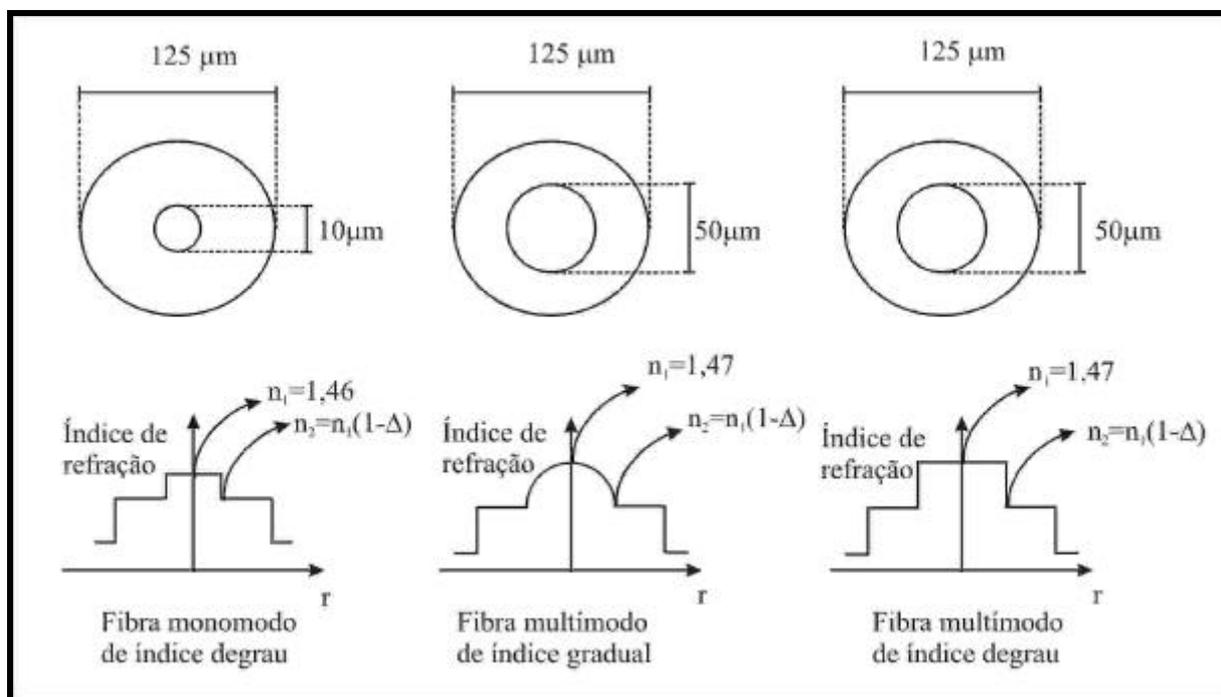


Figura 1: Dimensões e índices de refração para 3 tipos de fibras (CHERIN, 1.983).

Fibras monomodo têm o diâmetro do núcleo muito pequeno da ordem de unidades de micrometros e a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca também é muito pequena (da ordem de  $10^{-3}$ ).

## 2.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM FIBRAS DE ÍNDICE DEGRAU

O princípio de funcionamento das redes de período longo, assim com as redes de Bragg, pode ser descrito em termos das interações dos modos de propagações da luz no interior da fibra com a alteração periódica de índice de refração. Nesta seção será descrita a teoria que leva aos modos de propagação permitidos em uma fibra de índice degrau. É considerada uma fibra com núcleo de raio  $a$  e índice de refração  $n_1$  e casca com raio  $b$  e índice de refração  $n_2$ , cuja seção transversal é mostrada na figura 2.

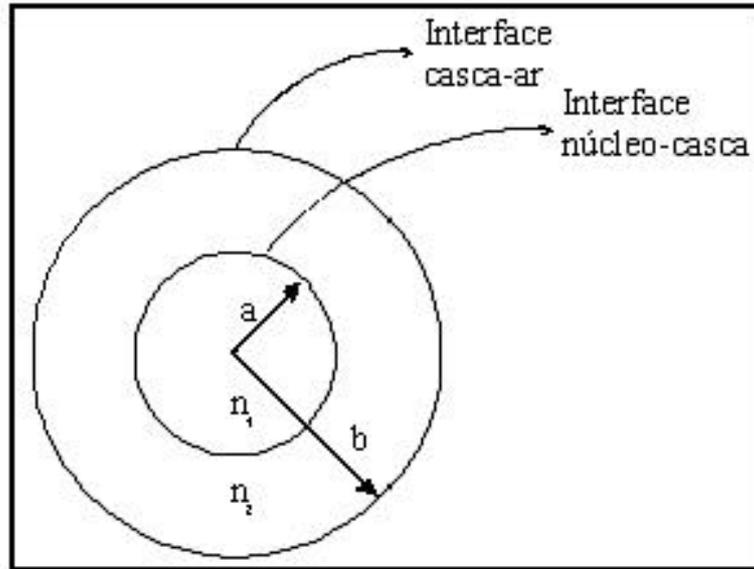


Figura 2: Geometria da fibra de índice degrau usada no estudo dos modos de propagação (CHERIN, 1983).

Inicia-se o desenvolvimento da teoria (CHERIN, 1983) a partir das equações de Maxwell na forma diferencial, considerando um meio livre de perdas, isotrópico e livre de cargas:

$$\nabla \times \overset{\rho}{E} = -\frac{\partial \overset{\rho}{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \times \overset{\rho}{H} = \frac{\partial \overset{\rho}{D}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \overset{\rho}{D} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \overset{\rho}{B} = 0 \quad (5)$$

onde:

- $\overset{\rho}{E}$  é o vetor campo elétrico;
- $\overset{\rho}{H}$  é o vetor campo magnético;
- $\overset{\rho}{D}$  é o vetor densidade de fluxo elétrico e
- $\overset{\rho}{B}$  é o vetor densidade de fluxo magnético.

As relações constitutivas para este meio são:

$$\mathbf{m}_r = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{m}_0} \approx 1 \quad (6)$$

$$\vec{B} = \mathbf{m}_0 \vec{H} \quad (7)$$

$$\vec{D} = \mathbf{e} \vec{E} \quad (8)$$

onde:

- $\mathbf{e}$  é a permissividade do meio;
- $\mathbf{m}$  é a permeabilidade do meio;
- $\mathbf{m}_r$  é a permeabilidade relativa e
- $\mathbf{m}_0$  é a permeabilidade do vácuo.

Estas equações levam à equação de onda (9) para a propagação do campo elétrico no meio em questão:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mathbf{m}_0 \mathbf{e} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Para a simetria cilíndrica de uma fibra ótica, o sistema de coordenadas cilíndricas é o mais adequado. Assim a equação de onda pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial f^2} + \mathbf{k}^2 E_z = 0 \quad (10)$$

onde:

- $\mathbf{k}^2 = k^2 - \mathbf{b}^2$ ,  $k$  é o número de onda e  $\mathbf{b}$  é a constante de propagação;
- o índice  $z$  indica a direção de propagação;
- $r$  representa a coordenada radial e  $f$  a coordenada angular.

A dependência temporal e a dependência em  $z$  do campo é harmônica da forma  $e^{j(\omega t - bz)}$ .

Para obter a equação de onda para o vetor campo magnético, as mesmas considerações podem ser feitas partindo da equação (3), e o resultado obtido será:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \mathbf{f}^2} + \mathbf{k}^2 H_z = 0 \quad (11)$$

Usando a técnica de separação de variáveis, pode-se obter soluções independentes para a componente angular e para a componente radial, e a componente em  $z$  do campo pode ser escrita em termos destas soluções como:

$$E_z(\mathbf{f}, r) = A\Phi(\mathbf{f})F(r) \quad (12)$$

A simetria circular da fibra nos permite escolher uma função circular para a componente angular do campo:

$$\mathbf{F}(\mathbf{f}) = e^{j\mathbf{n}\mathbf{f}} \quad (13)$$

onde  $v$  é um inteiro positivo ou negativo.

A substituição da solução (12) na equação (10) leva à seguinte equação:

$$\frac{d^2 F(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF(r)}{dr} + \left( \mathbf{k}^2 - \frac{\mathbf{n}^2}{r^2} \right) F(r) = 0 \quad (14)$$

A equação (14) é uma forma da equação de Bessel, que possui soluções conhecidas. Algumas considerações são feitas usando as condições de contorno adequadas para a escolha das soluções.

1. O campo deve ser finito no núcleo de 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 acima leva à escolha das funções de Bessel,  $J_n(\mathbf{k}r)$ , como soluções no núcleo da fibra ( $r < a$ ). O campos elétrico assume a forma:

$$E_z = AJ_n(\mathbf{k}r)e^{j\mathbf{n}\mathbf{f}} \quad (15)$$

Por analogia o campo magnético pode ser escrito como:

$$H_z = BJ_n(\mathbf{kr})e^{jnf} \quad (16)$$

A condição 2 leva a escolha da forma  $e^{-\gamma r}$  para o campo na casca. Se for definido  $\mathbf{k} = j\mathbf{g}$ , pode-se escolher as funções de Hankel modificadas de primeiro tipo para descreverem o comportamento do campo na casca ( $r > a$ ).

$$E_z = CH_n^1(j\mathbf{g}r)e^{jnf} \quad (17)$$

$$H_z = DH_n^1(j\mathbf{g}r)e^{jnf} \quad (18)$$

As constantes  $A, B, C$  e  $D$  são determinadas através das condições de contorno nas interfaces núcleo-casca e casca-ar. As equações (15), (16), (17) e (18) descrevem os campos que se propagam no núcleo e na casca.

Para o caso de fibras óticas, onde a diferença de índice de refração entre núcleo e casca é pequena ( $\Delta n \ll 1$ ), as combinações possíveis dos modos podem ser simplificadas. A superposição de modos de núcleo caracterizados por constantes de propagação próximas entre si corresponde a um modo linearmente polarizado (LP) em particular.

Um importante parâmetro para cada modo propagante é sua frequência de corte. Um modo deixa de se propagar quando o campo na casca deixa de ser evanescente e é removido do guia. Nesta situação o modo é chamado de modo irradiado.

A taxa de decaimento do modo de propagação na casca é determinada pela constante  $\mathbf{g}$ . Para grandes valores de  $\mathbf{g}$  o modo está fortemente confinado no núcleo. Com a diminuição do valor de  $\mathbf{g}$  o modo começa a penetrar na casca. Quando  $\mathbf{g} = 0$  o campo na casca deixa de ser evanescente e o modo deixa de ser guiado. A frequência na qual isto acontece é chamada de frequência de corte. Nesta situação, tem-se:

$$\mathbf{w}_c = \frac{\mathbf{k}_c}{\sqrt{\mathbf{m}_0(\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2)}} \quad (19)$$

onde:

- $\mathbf{e}_1$  é a permissividade do núcleo e
- $\mathbf{e}_2$  é a permissividade da casca.

A frequência de corte de um modo pode ser zero se  $k_c = 0$ . Apenas um único modo pode existir na fibra com  $w_c = 0$ . Este modo é o modo híbrido  $HE_{11}$  que corresponde ao modo  $LP_{01}$ , modo que existe para todas as frequências. Esta é a condição para que uma fibra seja monomodo. Os modos podem ser também classificados como propagantes e contra-propagantes em relação ao sentido ao qual a luz é injetada na fibra.

### 2.3 FOTOSSENSIBILIDADE EM FIBRAS ÓTICAS

Uma nova classe de dispositivos em fibras óticas teve seu desenvolvimento a partir da descoberta do fenômeno da fotossensibilidade (HILL *et al*, 1.978). Dentre estes dispositivos pode-se citar filtros óticos, equalizadores de ganho e sensores.

A fotossensibilidade é a mudança permanente do índice de refração do núcleo da fibra após sua exposição a luz com comprimento de onda e intensidade características, que dependem do material (OTHONOS e KALLI, 1.999). A incidência desta radiação rompe ligações entre os átomos que, em seguida, podem formar novas ligações. A alteração do índice de refração pode ser entendida como uma reconfiguração dos níveis de energia iniciais em novos níveis eletrônicos. No início pensou-se que este fenômeno estava associado com o núcleo dopado unicamente com Germânio. Posteriormente verificou-se este fenômeno em fibras dopadas com outros elementos como por exemplo o Boro e o Nitrogênio. Mas as fibras dopadas com Germânio ainda são as mais importantes na fabricação de dispositivos em fibras.

Defeitos associados ao Germânio formam-se durante o processo de fabricação da fibra, chamado de processo modificado de deposição química de vapor (*MCVD – modified chemical vapor deposition*) (KASHYAP, 1.999). Neste processo, gases como Tetracloreto de Germânio/Silício e Oxigênio a alta temperatura depositam-se dentro de um tubo de sílica que em seguida é colapsado. Como produto dessa reação surgem Dióxidos de Germânio e Silício e como subprodutos desta reação surgem Sub-Óxidos de Germânio e Silício e defeitos dentro da matriz vítrea.

Entre os defeitos formados na fibra dopada com Germânio, estão os defeitos Ge(n) que possuem um elétron desemparelhado ligado ao átomo de Germânio. No defeito Ge(1) o átomo de Germânio possui, além de um elétron desemparelhado, quatro ligações com moléculas O-Si, enquanto que no defeito Ge(2), o átomo de Germânio possui um elétron desemparelhado, uma ligação com a molécula O-Ge e três ligações com moléculas O-Si. Outro defeito é o

GeE' também conhecido como Ge(0) ou Ge(3), no qual é comum a deficiência de um átomo de Oxigênio. O defeito GeO tem um átomo de Germânio ligado a outro átomo de Germânio ou Silício. Estes defeitos são mostrados na figura 3, e na figura 4 é ilustrada a transição de um defeito GeO para um defeito GeE' pela absorção de um fóton.

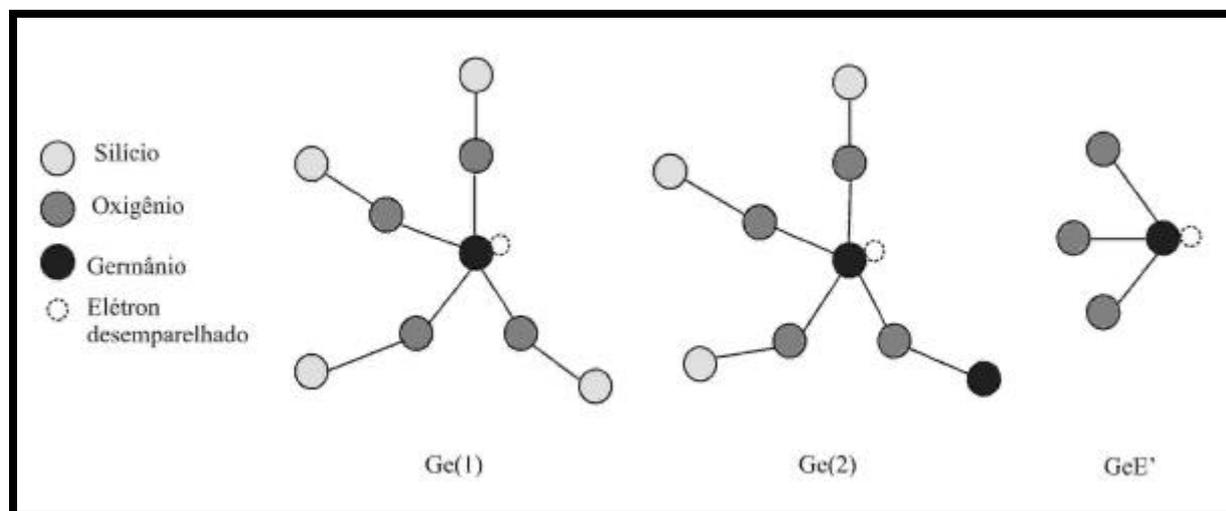


Figura 3: Defeitos em fibras dopadas com germânio.

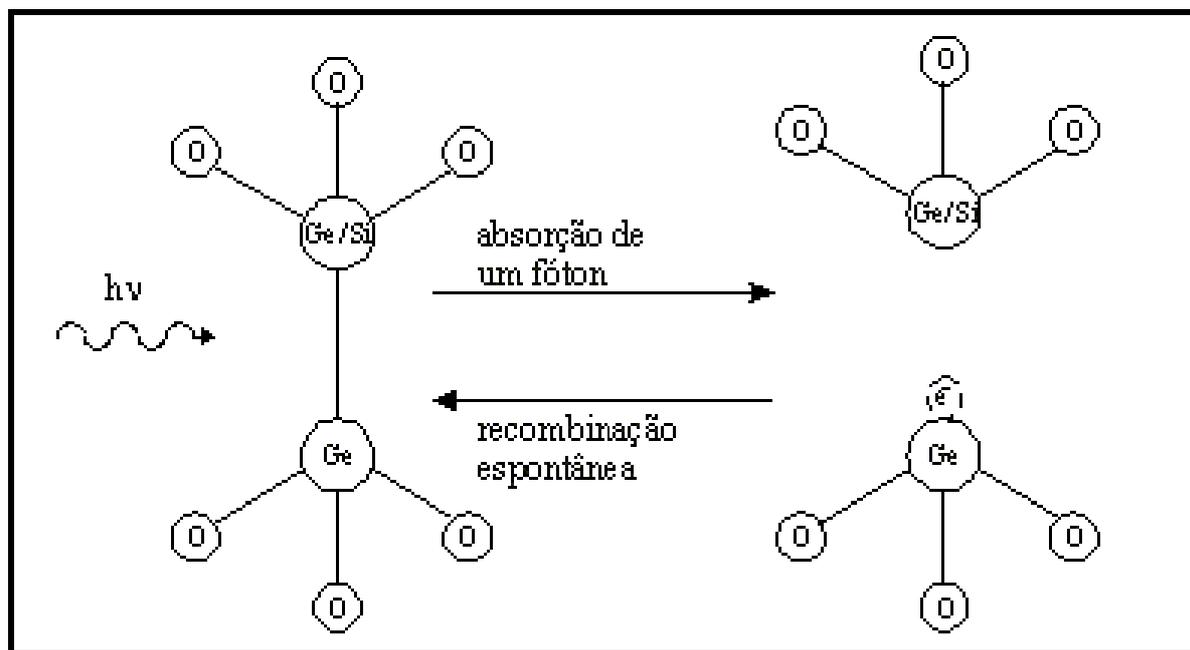


Figura 4: Transição do defeito GeO para o defeito GeE' pela absorção de um fóton (KASHYAP, 1.999).

Segundo Lemaire *et al* (1993), é possível obter o aumento da fotossensibilidade da fibra mantendo-a em um ambiente de Hidrogênio sob alta pressão (~20 atm – 750 atm) e temperaturas no intervalo de 20°C a 75°C, o que gera uma difusão de Hidrogênio para o núcleo da fibra. A contribuição da hidrogenação para a fotossensibilidade vem do fato de que

o átomo de hidrogênio reage com o íon de germânio para formar o defeito GeH (KASHYAP, 1999), que muda consideravelmente a banda de absorção no ultravioleta. A fotossensibilidade obtida através da hidrogenação é preservada pela presença do Hidrogênio. Assim fibras que passaram por este processo devem permanecer sob baixas temperaturas ou altas pressões em um ambiente de hidrogênio, para evitar a difusão de Hidrogênio para fora da fibra.

## 2.4 REDES DE BRAGG EM FIBRAS ÓTICAS

Redes de Bragg em fibras óticas consistem de uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra, ao longo do eixo de propagação da fibra. A luz guiada ao longo do núcleo de uma fibra será difratada por cada plano da rede e, se a condição de Bragg for satisfeita, a luz será acoplada para um modo de núcleo contra-propagante. Se a condição de Bragg não for satisfeita, a luz refletida por cada plano subsequente da rede torna-se progressivamente fora de fase, resultando em uma interferência destrutiva total. A figura 5 ilustra o acoplamento de potência ótica do modo propagante para um modo contra-propagante de núcleo, resultando num vale e atenuação no espectro de transmissão.

A conservação da energia ( $\eta \mathbf{w}_f = \eta \mathbf{w}_i$ ) requer que as frequências da radiação difratada ( $\mathbf{w}_f$ ) e da radiação incidente ( $\mathbf{w}_i$ ) sejam iguais. A conservação do momento requer que a soma dos vetores de onda da radiação incidente,  $\mathbf{k}_i$  e da rede  $\mathbf{K}$ , seja igual ao vetor de onda da radiação difratada  $\mathbf{k}_f$ . Esta condição é representada pela seguinte equação:

$$\mathbf{k}_i + \mathbf{K} = \mathbf{k}_f \quad (20)$$

onde:

- $\mathbf{K}$  tem direção normal aos planos da rede e módulo  $2\mathbf{p} / \mathbf{L}$  onde  $\mathbf{L}$  é o período da rede.

O vetor de onda da radiação difratada tem o mesmo módulo e direção do vetor de onda da radiação incidente, mas sentido oposto. Assim a conservação do momento fornece o comprimento de onda de Bragg da rede  $\lambda_B$ , em função do índice de refração efetivo do núcleo da fibra  $n_{eff}$ .

$$\lambda_B = 2n_{eff} \mathbf{L} \quad (21)$$

onde:

$$n_{eff} = \frac{\mathbf{b}}{k_0} \quad (22)$$

sendo que  $\mathbf{b}$  e  $k_0$  foram definidos na seção 2.2.

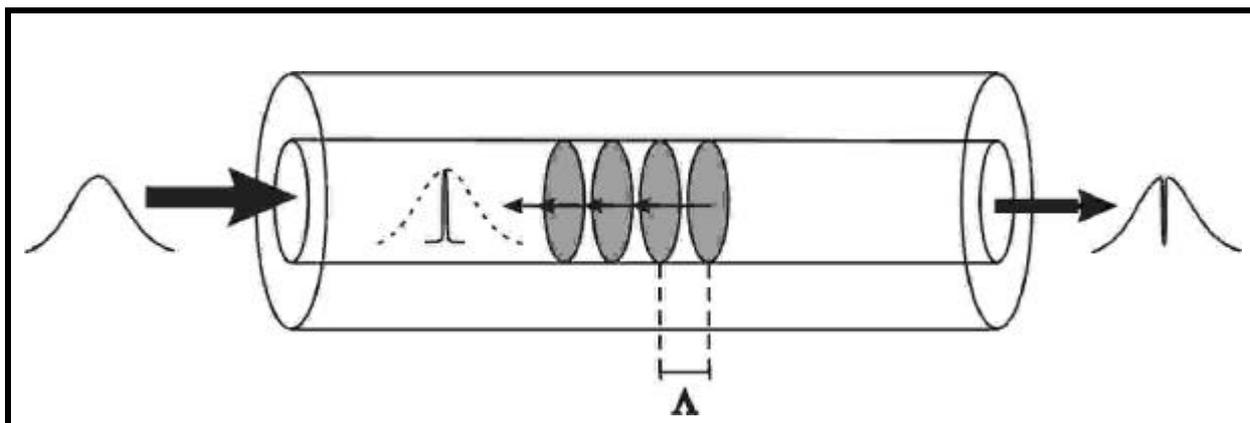


Figura 5: Ilustração do acoplamento entre os modos de núcleo propagante e contra-propagante de uma rede de Bragg uniforme com modulação de índice e período constante.

O comprimento de onda de luz refletida pela rede de Bragg, também conhecido como comprimento de onda de ressonância de Bragg, depende do índice de refração efetivo da fibra e da periodicidade de rede. Tanto o índice de refração efetivo como o período da rede serão afetados por mudanças na tensão e temperatura às quais a rede for submetida. Sensores de tensões e temperatura baseados em redes de Bragg fazem uso do deslocamento do comprimento de onda de Bragg para monitorar a variação destes parâmetros.

## 2.5 REDES DE PERÍODO LONGO

As redes de período longo são uma forma especial das redes de Bragg convencionais, demonstradas pela primeira vez por Vengsarkar *et al* (1.996a). No caso dessas redes o acoplamento ocorre entre o modo guiado fundamental e modos de casca co-propagantes. A potência óptica acoplada para modos de casca decai rapidamente devido às perdas por espalhamento para o meio externo. Dessa forma, o sinal transmitido ao longo da fibra está confinado apenas no núcleo.

Devido a essas perdas o espectro transmitido pela rede apresenta vales de atenuação, que são ilustrados na figura 6. Esses vales estão centrados em comprimentos de onda que satisfazem à condição de casamento de fase, que é dada por:

$$\mathbf{b}_{01} - \mathbf{b}_n = \Delta\mathbf{b} = \frac{2p}{\Lambda} \quad (23)$$

onde:

- $\mathbf{b}_{01}$  é a constante de propagação do modo fundamental guiado;
- $\mathbf{b}_n$  é a constante de propagação do  $n$ -ésimo modo com o qual o acoplamento ocorre e
- $L$  é o período da rede.

Em termos do comprimento de onda no qual o acoplamento ocorre a equação (23) é escrita como:

$$I_n = (n_{nu} - n_{ca}^n)\Lambda \quad (24)$$

onde:

- $n_{nu}$  é índice de refração efetivo do modo fundamental guiado e
- $n_{ca}^n$  é o índice de refração efetivo do  $n$ -ésimo modo com o qual o acoplamento ocorre.

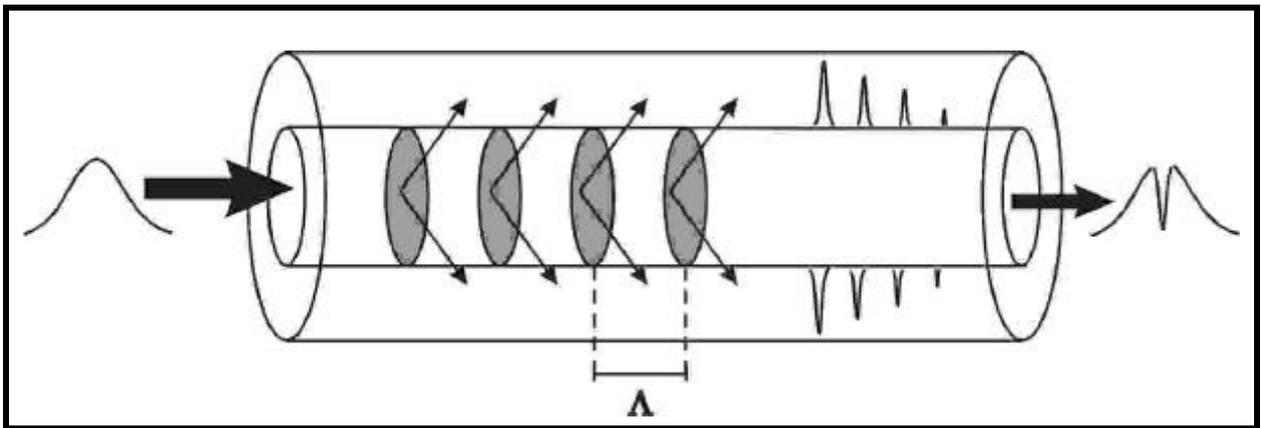


Figura 6: Ilustração do acoplamento entre o modo de núcleo propagante e modo co-propagante de casca de uma rede de período longo uniforme com modulação de índice e período constante.

Nesta equação pode-se ver a dependência do comprimento de onda de ressonância com o índice de refração efetivo dos modos de casca. Além disso, o sub-índice indica que a luz pode ser acoplada para mais de um modo de casca, o que resulta em mais de um vale no espectro de transmissão.

A análise a relação entre o período da rede e os modos acoplados pode ser feita a partir da equação (23). Para redes de Bragg convencionais, o acoplamento ocorre entre o modo fundamental propagante e modos contra-propagantes, de tal forma que  $D\mathbf{b}$  é grande (da ordem de  $10^6$ ) e o período  $L$  é pequeno, tipicamente da ordem de micrometros. Nas redes de período longo o acoplamento ocorre entre o modo fundamental e modos de casca co-propagantes de forma que o valor de  $D\mathbf{b}$  é menor (da ordem de  $10^4$ ) levando a maiores valores para período  $L$ , tipicamente da ordem de centenas de micrometros.

A figura 7 mostra um diagrama de acoplamento de modos para um comprimento de onda arbitrário. O índice de refração do núcleo é representado por  $n_1$ , o índice da casca por  $n_2$ , o índice do meio externo por  $n_3$ , os círculos em preto representam os modos discretos de núcleo e os círculos em branco representam os modos discretos de casca e a região hachurada representa os modos contínuos de irradiação.

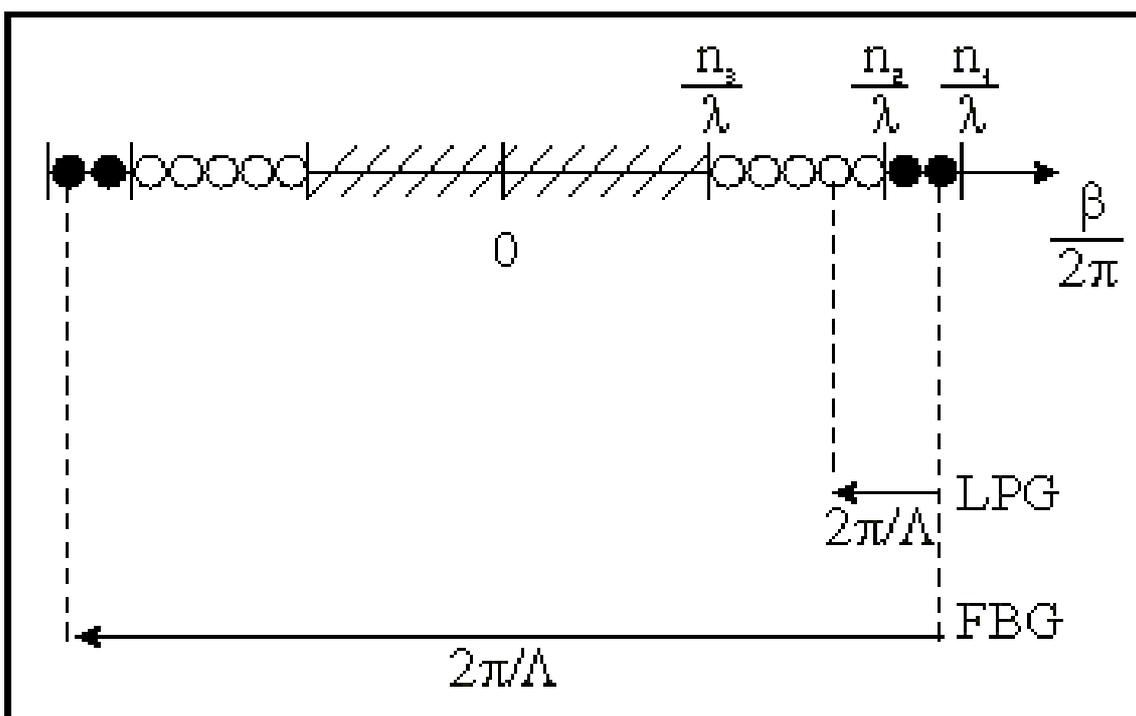


Figura 7: Diagrama de acoplamento de modos para um comprimento de onda arbitrário.

Como  $D\mathbf{b}$  é discreta e é função do comprimento de onda, este acoplamento é altamente seletivo. Como resultado, qualquer modulação nas propriedades de guiamento da casca e do núcleo modificam a resposta espectral da rede.

A largura de banda de uma rede de período longo depende da uniformidade do período  $\Lambda$ . Desta forma, redes gravadas com períodos não uniformes apresentam maior largura de

banda e redes com pequena largura de banda requerem sistemas que produzam períodos uniformes. A eficiência da rede, que é o quanto de luz é acoplada, depende da alteração do índice de refração em cada ponto de gravação. Um processo pelo qual pode-se melhorar a eficiência é o pré-aquecimento da fibra antes do processo de gravação. Foram relatadas recentemente (REGO *et al*, 2.002) aumentos na atenuação do vale de uma rede de período longo gravada em fibras que foram aquecidas a 1.050°C durante 30 minutos.

Foi mostrado (BHATIA e VENGSARKAR, 1.996) que este fenômeno pode ser usado para propostas de sensoriamento. Na equação (24) mostra a dependência do comprimento de onda de ressonância da rede com o meio externo através do índice de refração efetivo do modo de casca, o qual depende do índice de refração da casca e do meio externo (ABRAMOV *et al*, 1.999). Desta forma é possível detectar uma mudança da substância que compõe o meio externo, pois esta mudança irá alterar a diferença entre os índices de refração efetivos do núcleo e dos modos de casca e, como o período da rede permanece constante, o comprimento de onda se deslocará para satisfazer a condição imposta pela equação (24). Esta característica mostrou-se útil para a utilização da LPG como elemento sensor para diferenças de concentrações de elementos químicos (XUEWEN e HUANG, 1.999 e FALATE, 2.002). Estudos da resposta da rede à mudanças do índice de refração do meio externo (FALATE, 2.002), mostraram sensibilidades da ordem de  $0,013 \pm 0,006 \text{ nm}\cdot\text{l/g}$ . Aquele trabalho a variação do índice de refração era devida a diferentes concentrações de NaCl em solução aquosa.

Esta sensibilidade das LPG com relação a alterações no meio circunvizinho torna este tipo de rede mais indicado para ser usado como um sensor de índice de refração do que as redes de Bragg, onde para tal utilização seria necessária uma corrosão da fibra, tornando-a mais frágil (CAETANO *et al*, 2.001).

A análise da sensibilidade da rede à variação de temperatura é feita diferenciando-se a equação (24) com relação à temperatura T. A relação para a dependência do pico de ressonância com a temperatura é dada por (ABRAMOV *et al*, 1.999):

$$\frac{dI_m}{dT} = L \left[ \frac{d(n_{nu} - n_{ca}^m)}{dT} \right] + (n_{nu} - n_{ca}^n) \left( \frac{dL}{dT} \right) \quad (25)$$

O primeiro termo representa a mudança nos índices efetivos devido à dependência do índice de refração do material com a temperatura (relacionado ao efeito termo-ótico), e o

segundo a alteração na periodicidade da rede devido ao coeficiente de expansão térmica da fibra. Os coeficientes de expansão térmica  $\alpha_{\text{Term}}$  e o coeficiente termo-ótico  $\alpha_{\text{TO}}$  são dados por (QIN *et al*, 2.000):

$$\alpha_{\text{Term}} = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \quad (26)$$

$$\mathbf{a}_{\text{TO}} = \frac{1}{n_{\text{nu}} - n_{\text{ca}}^n} \frac{d(n_{\text{nu}} - n_{\text{ca}}^m)}{dT} \quad (27)$$

O coeficiente termo-ótico da fibra não é uma constante e está relacionado com o período da rede e a ordem do modo de casca acoplado. Seu valor geralmente está entre 2,0 e  $4,0 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  para redes escritas em fibras monomodo padrão (Corning SMF-28) (QIN *et al*, 2.000). Como o coeficiente de expansão térmica da sílica fundida é muito pequeno (aproximadamente  $0,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) (YIN *et al*, 2.001) em relação ao termo-ótico,  $\alpha_{\text{Term}}$  pode ser muitas vezes ignorado. Como resultado, a sensibilidade da rede será principalmente determinada pela mudança do índice de refração do núcleo e da casca com a variação de temperatura.

A mudança no comprimento de onda de ressonância da rede pode ocorrer também devido a deformações mecânicas, que alteram o período da rede  $\Lambda$ . Este comportamento pode ser analisado pela diferenciação da equação (24) em relação ao comprimento da fibra  $l$ :

$$\frac{d\mathbf{l}_m}{dl} = \mathbf{L} \left[ \frac{d(n_{\text{nu}} - n_{\text{ca}}^n)}{dl} \right] + (n_{\text{nu}} - n_{\text{ca}}^n) \left( \frac{d\mathbf{L}}{dl} \right) \quad (28)$$

onde o primeiro termo da equação é o responsável pela mudança no índice de refração devido a deformação da fibra (efeito foto-elástico), e o segundo termo é a alteração da periodicidade da rede como resultado da deformação elástica da fibra (OTHONOS e KALLI 1.997). Para as redes escritas em fibras monomodo padrão (Corning), o coeficiente de pressão  $(1+p)$ , onde  $p$  é dado por:

$$p = \frac{1}{n_{nu} - n_{ca}^n} \frac{d(n_{nu} - n_{ca}^n)}{dl} \quad (29)$$

é negativo e tem uma pequena variação (cerca de  $-0,5$  a  $-0,7$ ) com o período da rede e a ordem do modo de casca acoplado (QIN *et al*, 2.000). Então o comprimento de onda de ressonância irá se deslocar para menores valores quando a alteração de índice devido ao efeito foto-elástico for predominante.

A resposta espectral da rede pode ser influenciada por diversos parâmetros, desta forma a medida de cada parâmetro deve ser realizada com dois sensores ou numa configuração que forneçam diferentes respostas a cada parâmetro ou numa configuração em que com pelo menos um deles sofra a influência de apenas um parâmetro (OTHONOS e KALLI, 1.999).

## 2.6 TÉCNICAS DE GRAVAÇÃO

Em 1.988 (MELTZ *et al*, 1.988) foi demonstrada a fabricação de redes de Bragg pela exposição lateral da fibra a um padrão de interferência de radiação na região do ultravioleta. A partir daquele trabalho, uma grande variedade de técnicas de escrita, conhecidas como técnicas externas de gravação, foram desenvolvidas.

Recentemente, diversas técnicas de fabricação de redes que não envolvem radiação ultravioleta têm sido divulgadas na literatura. Nestas técnicas, a mudança no índice de refração não é explicada pela formação de defeitos na matriz vítrea, mas 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*, 2.001).

Serão abordadas, a seguir, duas técnicas amplamente utilizadas para a escrita de redes. A primeira utiliza uma máscara de amplitude e um laser ultravioleta e a segunda utiliza a exposição ponto-a-ponto a um laser ultravioleta (BHATIA *et al*, 1.997, VENGSARKAR *et al*, 1.996, BHATIA e VENGSARKAR, 1.996), ou um laser de CO<sub>2</sub> (DAVIS *et al*, 1.998.a, DAVIS *et al*, 1.998.b), ou a um arco elétrico de uma máquina de emendas de fibra ótica (REGO *et al*, 2.001, FALATE *et al*, 2.002).

### 2.6.1 Técnicas de escrita utilizando máscara de amplitude.

Este método está entre os mais amplamente utilizados devido à sua confiabilidade. A figura 8 (ZHANG *et al*, 1.999) mostra um esquema de uma montagem experimental, utilizada para gravar LPG fazendo uso da máscara de amplitude. Esta montagem pode ser modificada para a utilização da técnica ponto-a-ponto.

O feixe do laser atravessa duas lentes, uma telescópica e outra lente micro-objetiva, que estão configuradas para reduzir o tamanho do feixe. Um computador controla o acionamento do laser, que incidirá sobre a máscara de amplitude colocada na frente da fibra desencapada.

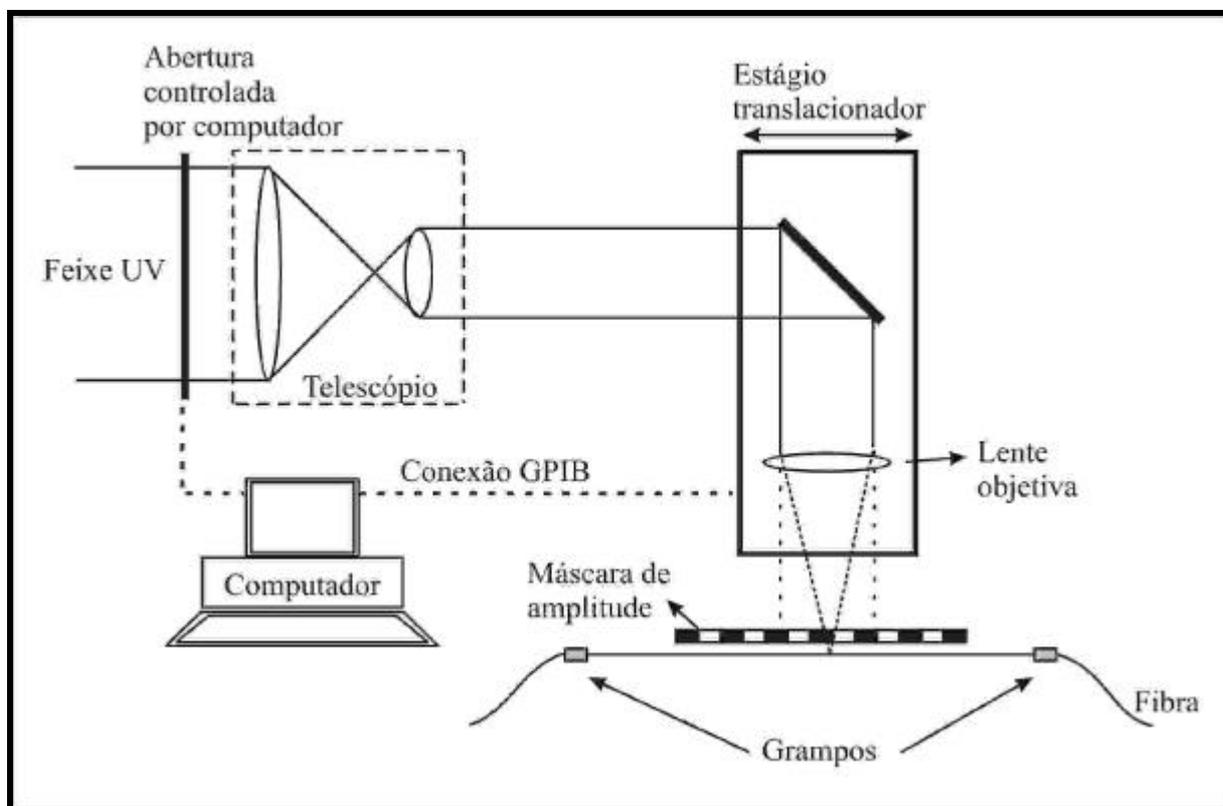


Figura 8: Sistema de gravação de redes de período longo utilizando laser ultravioleta. Esta montagem pode ser utilizada em duas técnicas: ponto-a-ponto e com uma máscara de amplitude.

O feixe, ao atravessar a máscara de amplitude, produz a modulação do índice de refração na fibra, com o mesmo padrão da máscara. Esta característica limita o período das redes fabricadas ao período da máscara. Por outro lado, esta técnica tem a vantagem de oferecer maior precisão na resposta espectral, quando comparada com a técnica ponto-a-ponto, devido a facilidade de produzir máscaras com períodos uniformes.

### 2.6.2 Técnicas de escrita utilizando iluminação UV ponto-a-ponto.

Na configuração ponto-a-ponto da montagem mostrada na figura 8, as lentes também são utilizadas para diminuir o tamanho do feixe, (nessa montagem a máscara de amplitude não é utilizada). Uma outra lente objetiva, presa a um estágio translacionador, é utilizada para focalizar o feixe em um ponto da fibra desencapada. O estágio translacionador é controlado por um computador. Este processo permite uma maior flexibilidade quanto ao período da rede.

A alteração do índice de refração em ambas as técnicas de escrita é explicada pela formação de defeitos devido à fotossensibilidade da fibra.

### 2.6.3 Técnicas de escrita com laser de CO<sub>2</sub> e arco elétrico.

Estas duas técnicas fazem uso do processo de aquecimento e resfriamento em pontos periódicos para formar a rede. Durante o processo de escrita por exposição a um arco elétrico, a taxa de resfriamento da fibra na região de aquecimento é maior do que 1.000°C/s (REGO *et al*, 2.001). Taxas de resfriamento que superam este limite produzem alterações nas características do vidro, tais como mudança da densidade, da viscosidade, do índice de refração e do espalhamento Rayleigh. Segundo REGO *et al* (2.001), estas são as principais razões para o acoplamento de modos.

A figura 9 mostra uma montagem para a gravação de redes que utiliza uma máquina de emendas de fibra ótica. Uma região da fibra sem a capa é colocada entre os eletrodos da máquina de emendas. Em uma das extremidades, a fibra é fixada a um estágio translacionador controlado por um computador, e na outra uma pequena massa é presa à fibra de forma a mantê-la constantemente tensionada. Então, aplica-se um arco e desloca-se a fibra por um período  $L$  e repete-se o processo. Um sistema composto de uma fonte de banda larga e um analisador de espectros óticos posicionados em extremidades opostas da fibra, permite acompanhar a fabricação da rede.

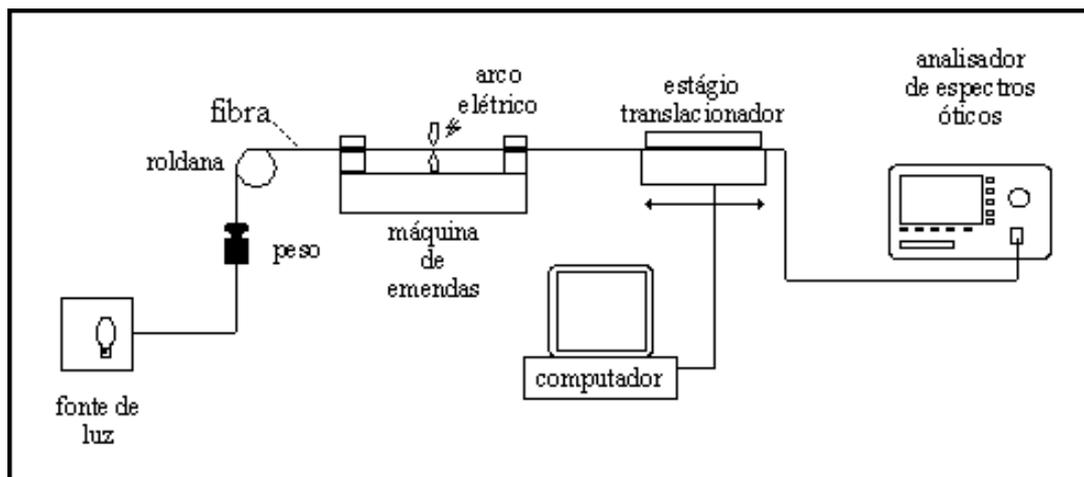


Figura 9: Sistema de gravação de redes de período longo fazendo uso de uma máquina de emendas.

Outra explicação para a alteração do índice de refração é a tensão elástica, fenômeno que ocorre durante o processo de escrita com laser de  $\text{CO}_2$  (AKIYAMA *et al*, 1998). Este método exige que uma fibra de sílica pura tenha sua casca previamente dopada com flúor.

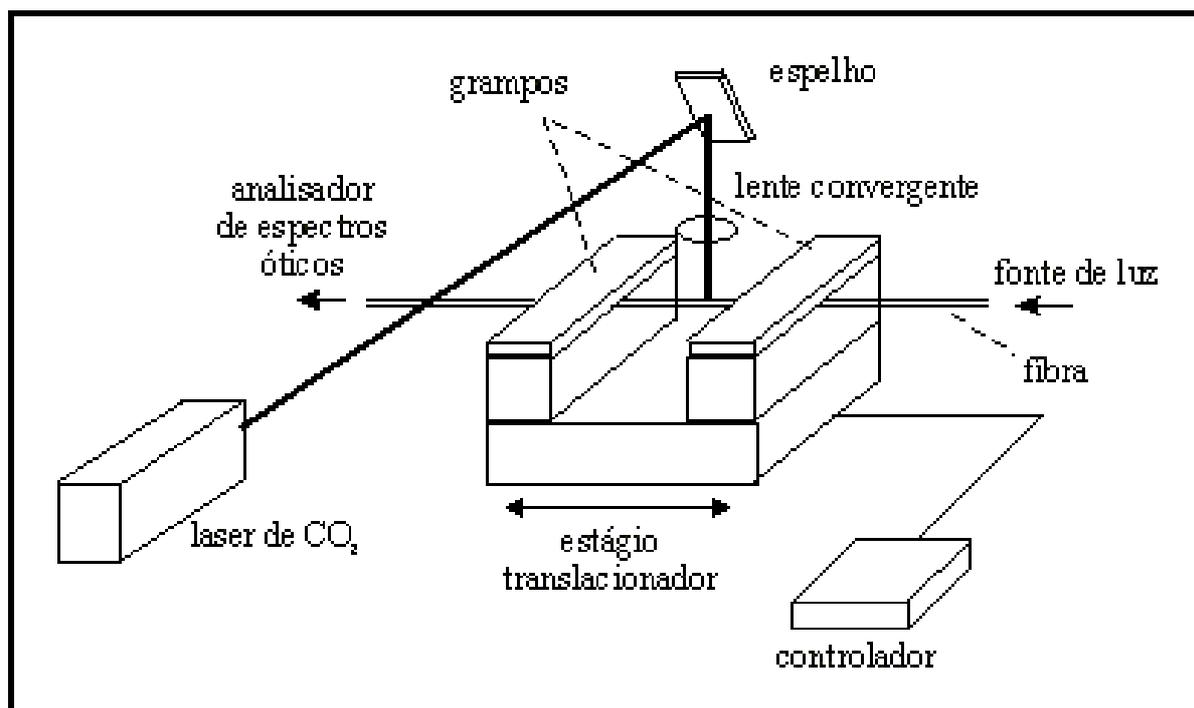


Figura 10: Sistema de gravação de redes de período longo fazendo uso de um laser de  $\text{CO}_2$ .

A figura 10 mostra um arranjo experimental utilizado por Akiyama *et al* (1998) para gravar redes de período longo fazendo uso de um laser de  $\text{CO}_2$ . O feixe do laser com diâmetro de  $100\ \mu\text{m}$  e duração temporal de 3 segundos é focalizado por uma lente convergente sobre

um ponto da fibra. Em seguida o estágio translacionador é deslocado de um período  $L$  e o processo é repetido.

Durante o processo de aquecimento e resfriamento, o núcleo esfria mais rápido do que a casca. Desta forma a casca irá se resfriar ao final do deslocamento, o que fará com que o núcleo seja tensionado elasticamente. Em consequência deste fato, o valor do índice de refração do núcleo sofrerá uma diminuição.

A principal vantagem que a técnica que utiliza a máquina de emendas apresenta quando comparada com a que utiliza um laser de  $\text{CO}_2$  é o preço do equipamento, sendo que a máquina de emendas pode ser adquirida a um preço inferior ao do laser de  $\text{CO}_2$ . Mas trabalhos recentes (ZHU *et al*, 2.003) mostram redes de período longo gravadas com um laser de  $\text{CO}_2$  com apenas 17 pontos, isso sugere uma alteração no índice de refração maior em cada ponto, tornando essa técnica mais eficiente.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS E INFRA-ESTRUTURA

O desenvolvimento deste trabalho foi realizado no laboratório de Laser do CEFET-PR. O laboratório está equipado com um sistema de leitura de redes de período longo, que é também adaptado para as gravações das redes. A caracterização das redes foi realizada no laboratório de Laser com o auxílio de equipamentos do Laboratório de Ótica e Optoeletrônica do CEFET-PR.

##### 3.1.1 Sistema de leitura de redes de período longo

Para os processos de leitura e gravação das LPG é utilizado um sistema que permite obter o espectro de transmissão da fibra, antes e durante a gravação. Desta forma é possível acompanhar o espectro da rede durante cada etapa do processo de gravação e analisar a eficiência do procedimento.

O sistema de leitura de redes em fibra ótica, figura 10, consiste de uma lâmpada halógena de 50 W que possui uma grande largura espectral (800 nm a 1.800 nm). A luz desta lâmpada é acoplada a um monocromador (Sciencetech, modelo 9050) através de uma lente convergente. O feixe de luz ao atravessar o monocromador é modulado por um *chopper* e é focalizado em uma fibra ótica através de uma objetiva de 40 x. Após atravessar a fibra a luz é focalizada por outra lente objetiva de 40 x em um detector de InGaAs (Thorlabs) sendo o sinal processado por um amplificador diferencial *lock-in* (Standford Research Systems, modelo SR830). O sistema todo é controlado por um computador (FABRIS *et al*, 1.999).

Os parâmetros ótimos do monocromador, para o processo de leitura, foram estudados por Falate (2.002), e correspondem a: faixa espectral de 800 nm a 1.800 nm, resolução 4 nm, e passo de 3 nm.

Como as redes possuem grande sensibilidade a parâmetros do meio externo, como por exemplo a temperatura, o processo de leitura e fabricação também está sujeito à variação destes parâmetros. Assim, a temperatura foi mantida em  $21^{\circ} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , através da utilização de um aparelho de ar condicionado, e monitorada por um termômetro.

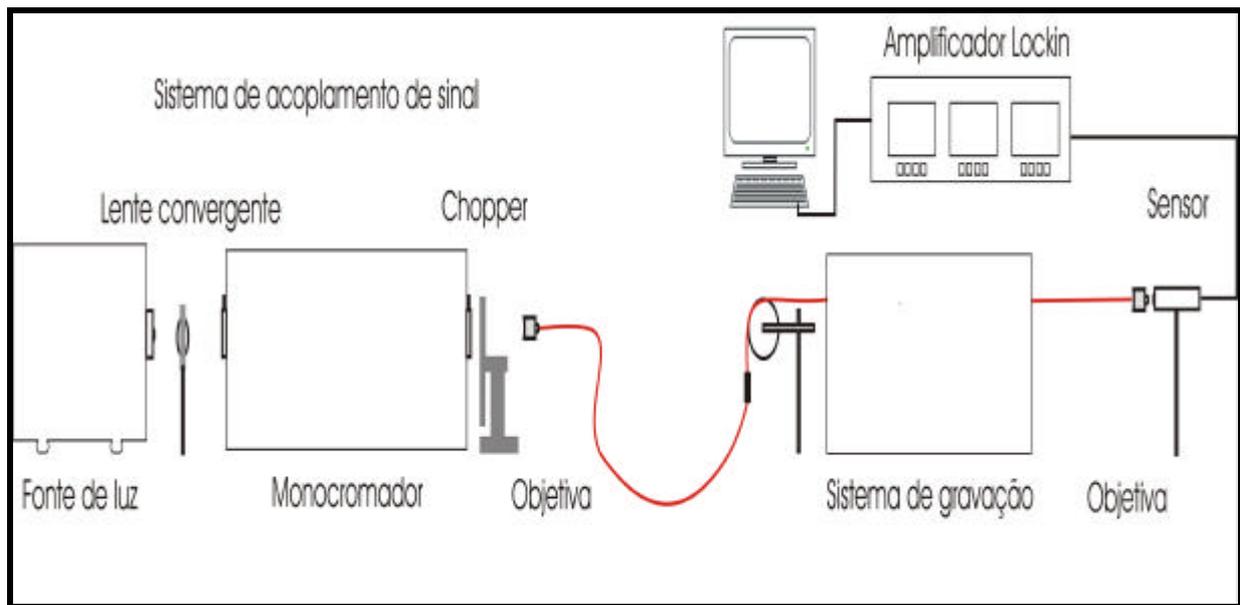


Figura 11– Diagrama esquemático do sistema de leitura da LPG utilizado para acompanhar a evolução da LPG durante o processo de escrita.

### 3.1.2 Sistema de gravação de redes de período longo

O sistema de gravação das redes é uma ampliação do sistema de leitura, uma vez que se deseja fazer a leitura do espectro de transmissão da rede durante o seu processo de gravação. Isto permite verificar as mudanças ocorridas no espectro e o comportamento dos picos de atenuação, de modo a evitar o re-acoplamento dos modos de casca para o modo de núcleo, o que acontece quando o número de pontos é maior do que aquele para o qual ocorre a maior eficiência no acoplamento. Além disto, esse monitoramento possibilita a escolha de um valor de atenuação desejado para a rede, que seja adequado a cada aplicação em particular.

A técnica utilizada é a ponto-a-ponto com aplicação de um arco elétrico, devido à sua simplicidade e disponibilidade de equipamentos.

Neste sistema, é inserida uma máquina de emendas de fibra ótica (Siemens, modelo S46999-M7A-71) entre as lentes, que acoplam a luz na fibra e que focalizam a luz no detector após atravessar a fibra, figura 12. Em uma das extremidades, a fibra passa por uma roldana e tem uma massa (17,52g) é fixada na fibra de modo a mantê-la sob uma tensão constante. Na outra extremidade, a fibra é presa a um estágio translacionador com uma resolução linear de 5  $\mu\text{m}$  (FABRIS *et al.*, 1.999), controlado por um computador.

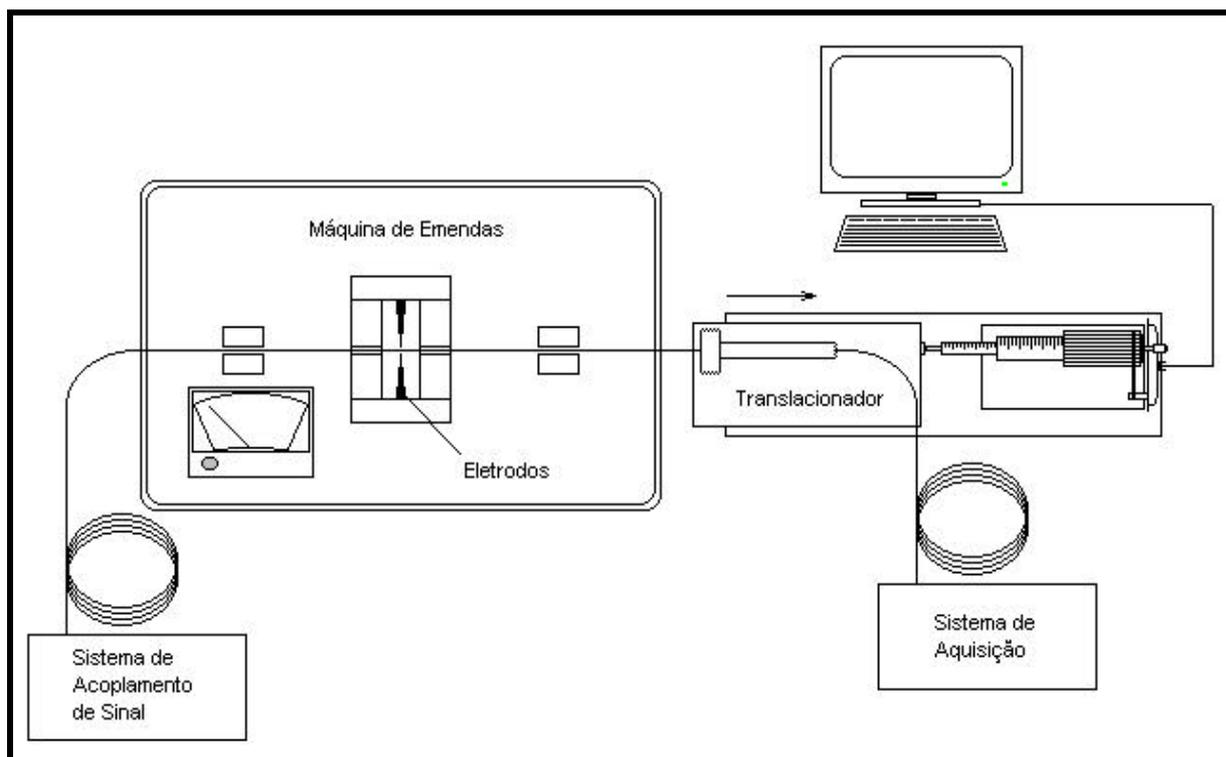


Figura 12 – Diagrama esquemático do sistema utilizado na escrita das LPG.

Os parâmetros de gravação foram: tempo de exposição ao arco elétrico de 0,5 s, corrente elétrica de 13 mA. Os parâmetros adotados nos primeiros ensaios foram obtidos da literatura (REGO *et al*, 2001), os parâmetros utilizados nos processos de gravação foram obtidos através de inspeção, sendo que a posição do pico de atenuação e a eficiência foram os fatores mais relevantes para a escolha destes parâmetros.

### 3.1.3 Sistema de caracterização de redes de período longo

Inicialmente foi desenvolvido um sistema para verificar a sensibilidade da rede de período longo a pequenas variações de índice de refração.

O sistema consiste de um recipiente de vidro, onde são inseridas amostras de gás. Este recipiente possui um corpo cilíndrico, de diâmetro 2,8 cm, com duas aberturas na direção vertical, uma para cima e outra para baixo. As extremidades deste recipiente tem a forma de funil, figura 13.

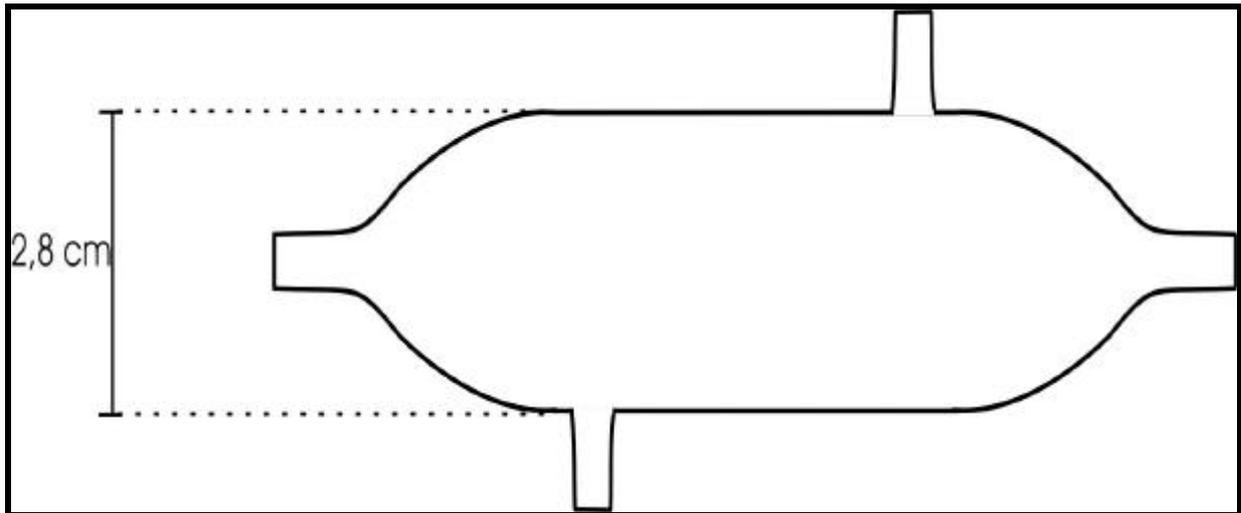


Figura 13 – Diagrama esquemático do recipiente utilizado na caracterização da LPG quanto a sua sensibilidade a pequenas variações de índice de refração.

As aberturas nas extremidades do recipiente são fechadas com borrachas de êmbolo de seringa descartável. Estas borrachas são atravessadas por uma agulha de seringa descartável e pelo orifício da agulha passa a fibra ótica de modo a posicionar a LPG dentro do recipiente.

Ao sair do recipiente, a fibra ótica passa por duas roldanas, uma em cada lado do recipiente, e duas massas de 19,74 g são fixadas na fibra de modo a mantê-la sob uma tensão constante. Essas massas são fixadas próximas às roldanas de modo a não permitir o deslocamento da fibra e LPG do recipiente.

Um pequeno botijão com uma mistura de gases butano e propano é conectado à abertura inferior do recipiente. Na abertura superior é colocado um obturador com o propósito de controlar a saída de gás do recipiente.

Um LED superluminescente operando na faixa de 1.445 nm a 1.645 nm é utilizado com fonte de luz e um analisador de espectros óticos (OSA – *optical spectrum analyzer*) da marca Anritsu, modelo MS9710B, operando com uma resolução de 0,07 nm, são utilizados para analisar a resposta da rede. As informações obtidas pelo OSA são enviadas a um computador que armazena os dados da posição do comprimento de onda central do vale de atenuação da LPG. O sistema é mostrado na figura 14.

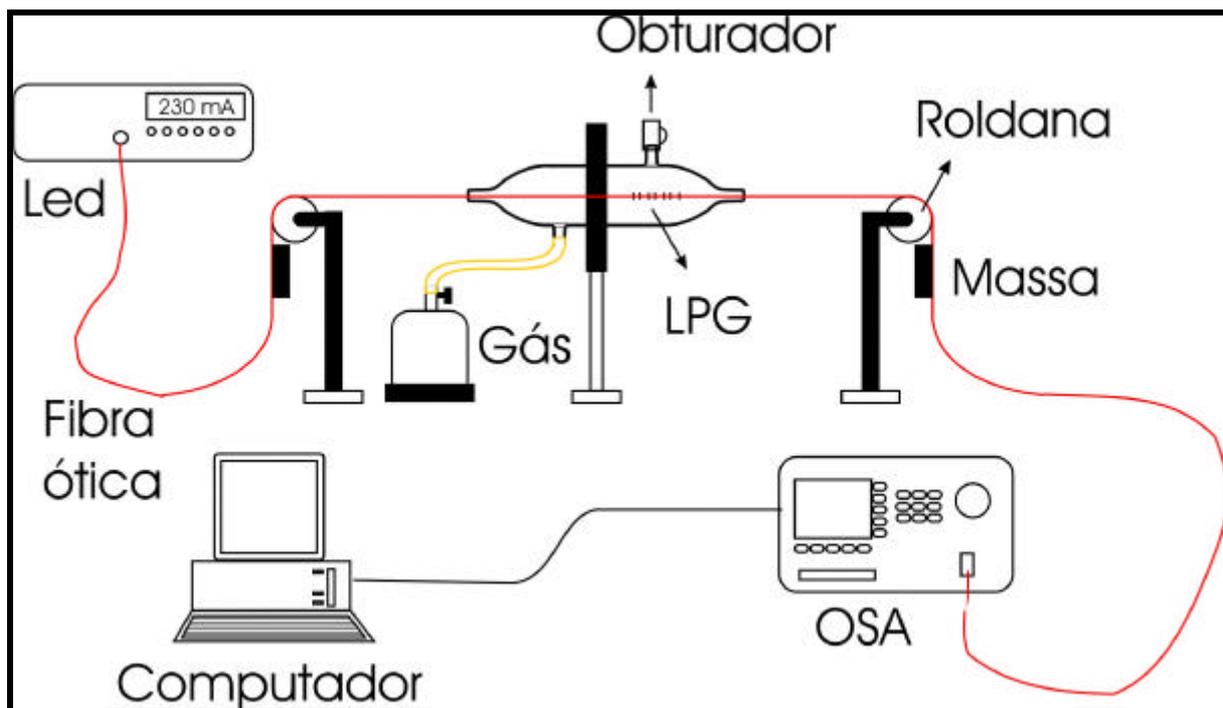


Figura 14 – Diagrama esquemático do sistema utilizado na caracterização das LPG quanto à sua sensibilidade a pequenas variações de índice de refração.

Para o estudo da sensibilidade da rede de período longo à presença de hidrocarbonetos em ambiente hídrico, foi desenvolvido o sistema mostrado na figura 15.

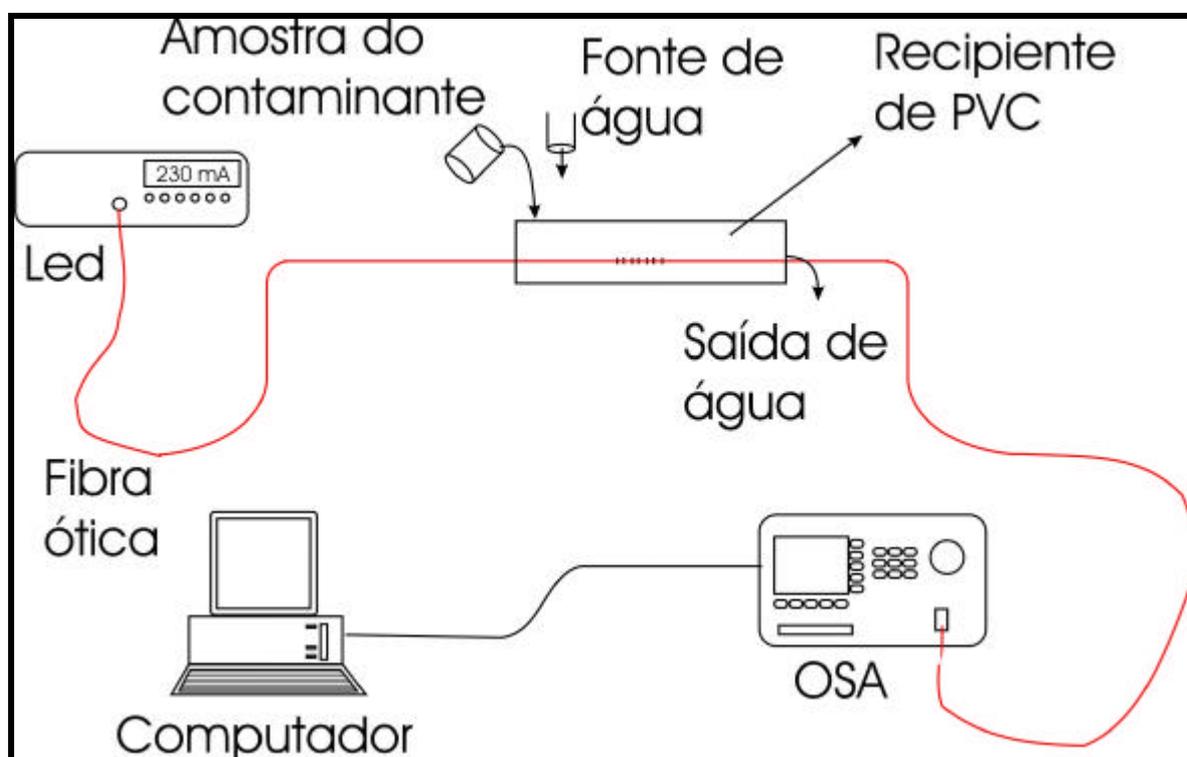


Figura 15: Sistema de caracterização da sensibilidade da LPG quanto à presença de gasolina em ambientes hídricos.

O sistema utiliza o LED superluminescente como fonte de luz e o analisador de espectros óticos, descritos acima, e um recipiente (figura 16) onde é colocada a rede para a realização das medidas num fluxo de água.

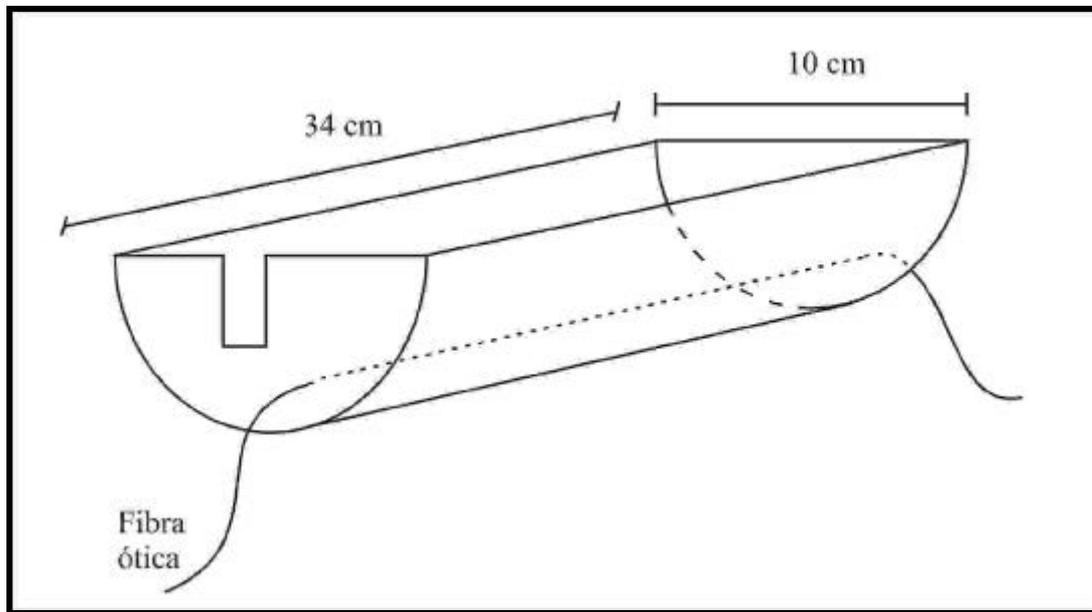


Figura 16 – Diagrama esquemático do recipiente utilizado na caracterização da LPG como elemento sensor para detecção de hidrocarbonetos em ambientes hídricos.

Esse recipiente consiste de uma calha cilíndrica de PVC com 10 cm de diâmetro e 34 cm de comprimento. Uma das extremidades do tubo serve para inserção do fluxo de água, obtido de uma torneira. No outro extremo, há uma abertura para o dreno da água. A fibra ótica com a rede de período longo transpassa a calha cilíndrica, através de dois orifícios, um em cada extremidade, em uma altura escolhida para que a rede fique próxima à superfície da água. Os orifícios são vedados para evitar vazamento de água e para manter a rede sob uma tensão constante. A temperatura do experimento foi monitorada com o uso de um termômetro imerso na água.

## 3.2 DESENVOLVIMENTO

### 3.2.1 Processo de gravação da rede de período longo

Antes do início do processo de escrita das redes, um aparelho de ar condicionado é ligado e a temperatura da sala é monitorada por um termômetro. O processo tem início quando a temperatura da sala está estabilizada.

O processo de gravação consiste em posicionar uma fibra ótica monomodo padrão (SMD da ABCXtal) sem a capa, entre os eletrodos da máquina de emendas do sistema descrito no início da seção anterior. Esta região é limpa com álcool isopropílico, de forma a remover impurezas que possam se encontrar sobre a fibra e evitar alterações na uniformidade do arco elétrico naquela região.

Após o posicionamento e limpeza da fibra, é medido o espectro de transmissão da fibra antes da aplicação do arco elétrico. O processo de escrita inicia-se aplicando um arco elétrico em um ponto da fibra, com os parâmetros descritos anteriormente, em seguida desloca-se a fibra por um período  $\Lambda$  e aplica-se novamente o arco. A cada 20 pontos de interação o espectro de transmissão da rede em formação é medido. O sistema permite a gravação de 60 pontos. É possível a gravação de um número maior de pontos retirando e reposicionando a fibra, mas nenhuma rede mostrou aumento de eficiência utilizando este procedimento. Possíveis explicações são: devido ao re-acoplamento de luz para o núcleo e em outros casos a eficiência ficou comprometida provavelmente pelo não casamento entre os segmentos da rede.

Este método permitiu, através de inspeção, gravar redes de período longo com a banda de atenuação dentro da faixa de operação de LED superluminescente.

Os parâmetros que podem ser variados no sistema para deslocar a posição do comprimento de onda central do vale de atenuação são: massa utilizada para tensionar a fibra, período da rede e os parâmetros da máquina de emendas (intensidade de corrente elétrica e duração do arco).

Foram verificados que os parâmetros da máquina de emendas utilizados são os mais eficientes. Maiores valores para intensidade e/ou para tempo de duração do arco partiam a fibra. A diminuição destes valores não permitia a gravação ou as redes gravadas eram pouco eficientes.

A alteração do período da rede foi o método mais eficiente para alterar o comprimento de onda central do vale de atenuação. Este parâmetro é controlado por computador, e permitiu

variações no período da rede que levaram a mudanças na posição do vale de atenuação da ordem de unidades de nanômetros. Assim pôde ser monitorado o deslocamento do comprimento de onda central em função do período da rede.

O interesse em obter redes operando dentro da largura de banda de um LED superluminescente é que, desta forma, pode-se utilizar um sistema com uma fonte de luz mais estável e com menos ruído, e um analisador de espectros óticos, que torna as medidas mais rápidas. Este sistema não foi utilizado para gravar as redes, pois possui uma largura de faixa estreita, de 1.445 nm a 1.645 nm, não detectando redes gravadas fora desta faixa.

### 3.2.2 Caracterização da rede de período longo para detecção de hidrocarbonetos

A caracterização da sensibilidade da rede a pequenas mudanças do índice de refração é feita inserindo a mistura de gás butano e gás propano, proveniente do pequeno botijão de gás. As medidas dos espectros de transmissão da rede são feitas durante 120 segundos antes da inserção do gás, com intervalos de aproximadamente 3 segundos, este foi o menor tempo possível de processamento dos dados pelo computador, devido à resolução e número de pontos utilizados no OSA. O objetivo destas medidas iniciais é analisar flutuações no comprimento de onda central do vale de atenuação da rede. Após a inserção do gás, o comprimento de ressonância é monitorado durante 120 segundos com o mesmo intervalo de tempo entre as medidas. Após este intervalo de tempo, a válvula do botijão é fechada e o espectro da rede é monitorado durante os próximos 120 segundos. Em seguida a válvula é aberta novamente durante 120 segundos e fechada por 120 segundos. Este procedimento tem o propósito de verificar se a rede detecta o gás e se após a detecção ocorre alguma modificação na posição do vale de atenuação da rede. A temperatura ambiente do laboratório era  $18,0 \pm 0,5$  °C

A caracterização da rede para detecção de hidrocarbonetos em ambientes hídricos é feita inserindo no recipiente mostrado na figura 16, onde se encontra a rede, um fluxo de água que permita que a rede fique próxima a interface água-ar de forma que ela entre em contato com a amostra de contaminante. A temperatura da água é monitorada durante 20 minutos para verificar variações. Este tempo é utilizado também para estabilizar o LED.

O procedimento adotado para as medidas consiste em monitorar o espectro de transmissão da rede sob influência de um fluxo de água de 18 ml/s a uma temperatura de  $18,0 \pm 0,5$  °C durante os 120 segundos iniciais, medindo o espectro de transmissão da LPG a

intervalos constantes de 3 segundos. Em seguida são inseridos 30 ml da amostra de hidrocarboneto na extremidade onde se encontra a fonte de água e coletados espectros da rede com a mesma periodicidade, durante os próximos 2.180 segundos. Após essa etapa, são inseridos novamente 30 ml da amostra de hidrocarboneto. As amostras utilizadas no experimento foram de gasolina comercial.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 REDES GRAVADAS

Com o sistema de gravação descrito no capítulo anterior, foram escritas três redes de período longo em fibra monomodo padrão de telecomunicações, sendo que cada uma das redes apresenta período e número de pontos ligeiramente diferentes. A escolha de diferentes períodos foi feita com o objetivo de ter-se à disposição redes operando em diferentes comprimentos de onda, possibilitando sua utilização em trabalhos futuros como a multiplexação de dois ou mais sensores em um mesmo enlace. A escolha do número de pontos de cada rede está vinculada à eficiência de acoplamento. Durante o processo de escrita notou-se que para um determinado período da rede, havia um número de pontos que resultava na melhor eficiência, e conseqüentemente numa melhor relação sinal/ruído nas medidas, redes gravadas com um número de pontos superior a esse valor possuíam pouca eficiência, provavelmente devido ao reacoplamento de luz para o modo de núcleo. A primeira rede, que será identificada como rede 1, foi gravada com um período de 614  $\mu\text{m}$  e 60 pontos, a segunda rede, rede 2, com um período de 598  $\mu\text{m}$  e 50 pontos e a terceira rede, rede 3, com um período de 604  $\mu\text{m}$  e 50 pontos. Os diferentes períodos ocasionam o acoplamento do modo de núcleo para diferentes modos de casca, resultando em diferentes números de vales e posições dos comprimentos de onda centrais.

Os espectros de transmissão da fibra obtidos durante o processo de gravação das redes 1, 2 e 3, são mostrados nas figuras 17, 19 e 21, respectivamente. Nas três figuras a linha contínua representa o espectro da fibra antes do início do processo de gravação, a linha tracejada representa o espectro de transmissão da fibra após a gravação de 40 pontos e a linha pontilhada representa o espectro de transmissão da fibra ao final do processo de gravação. Os vales de atenuação das redes 1, 2 e 3, são mostrados nas figuras 18, 20 e 22, respectivamente. Os gráficos destas figuras foram obtidos 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.

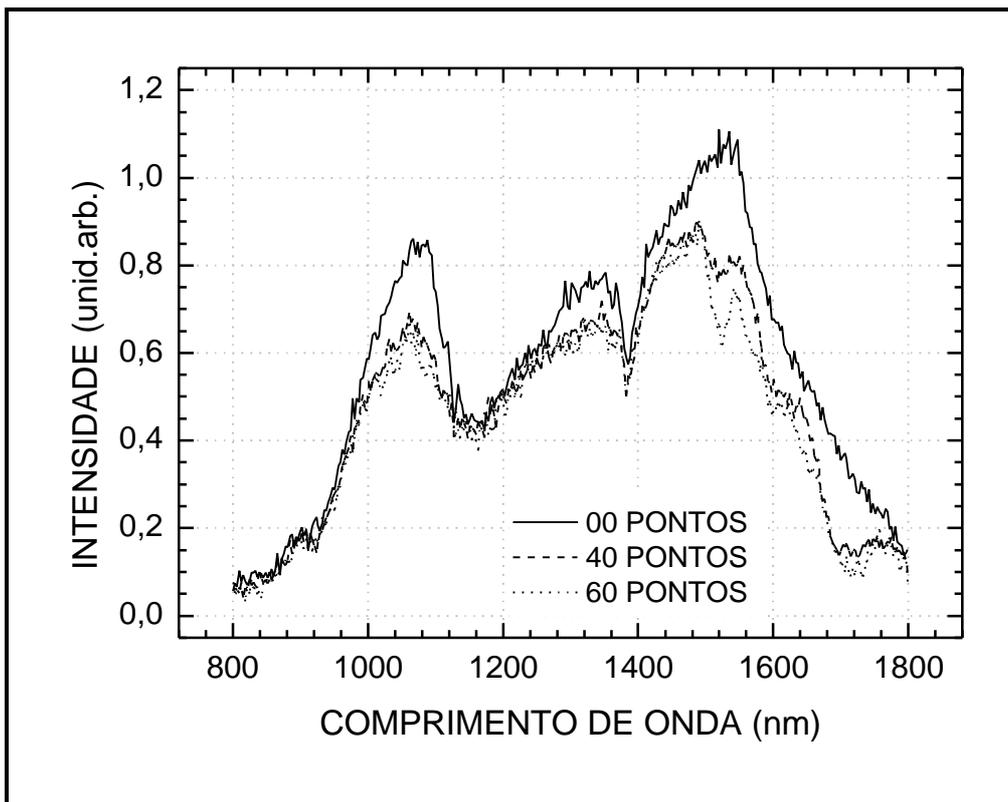


Figura 17 – Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 1).

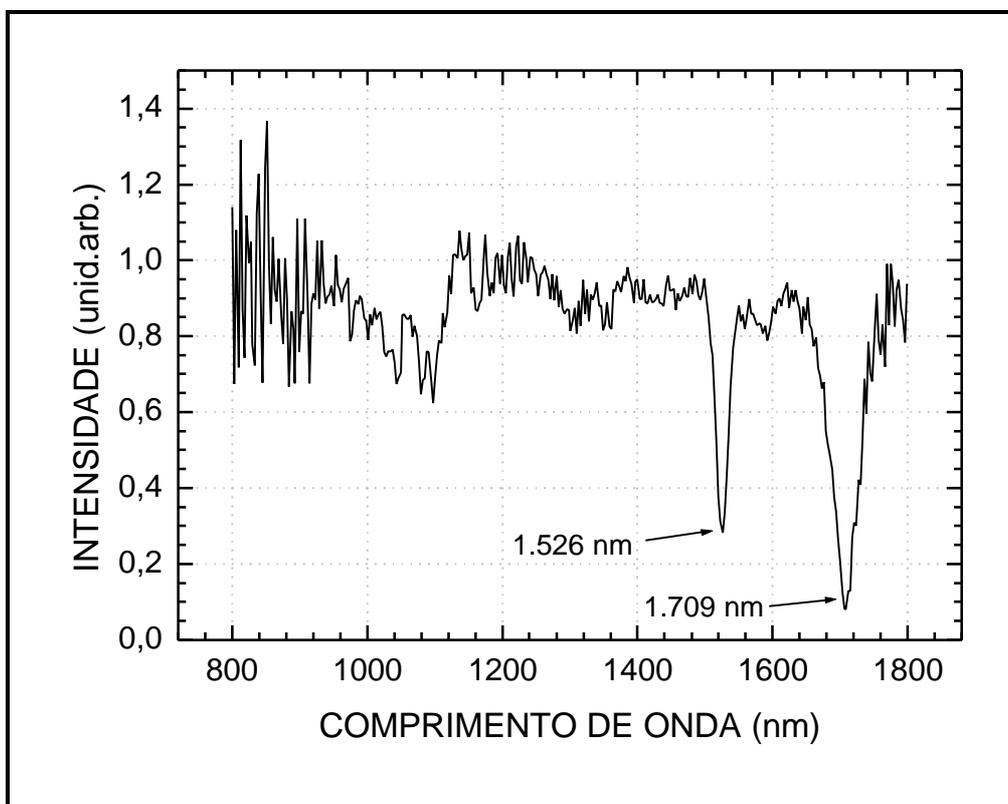


Figura 18 – Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 1).

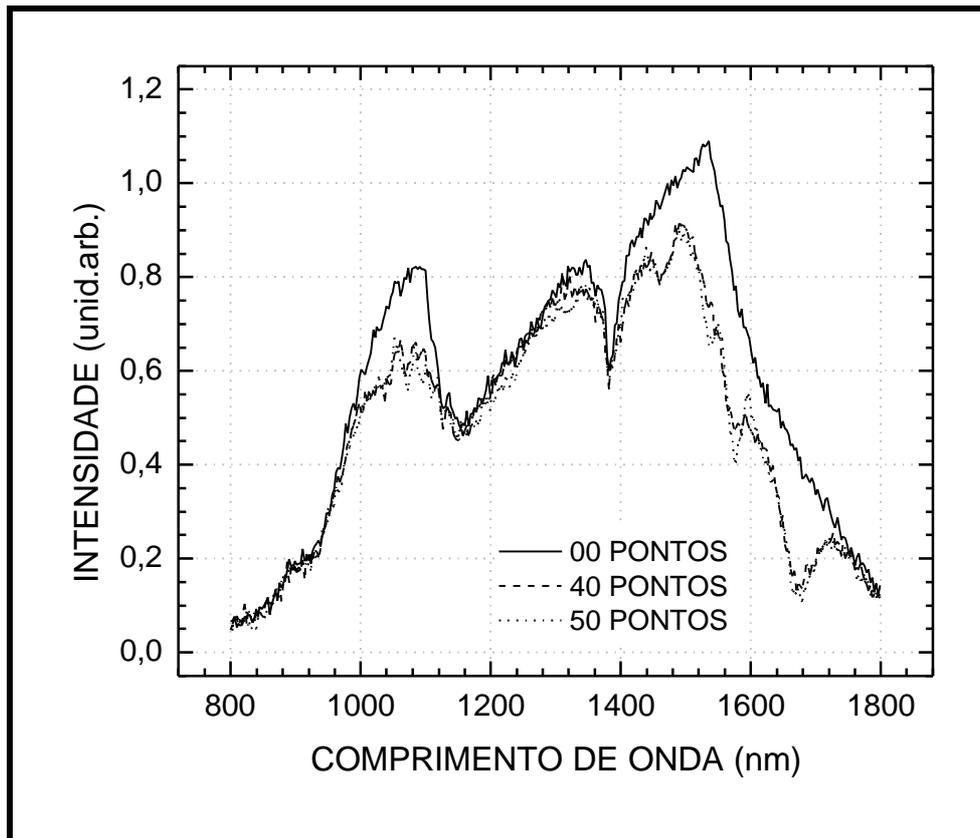


Figura 19 – Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 2).

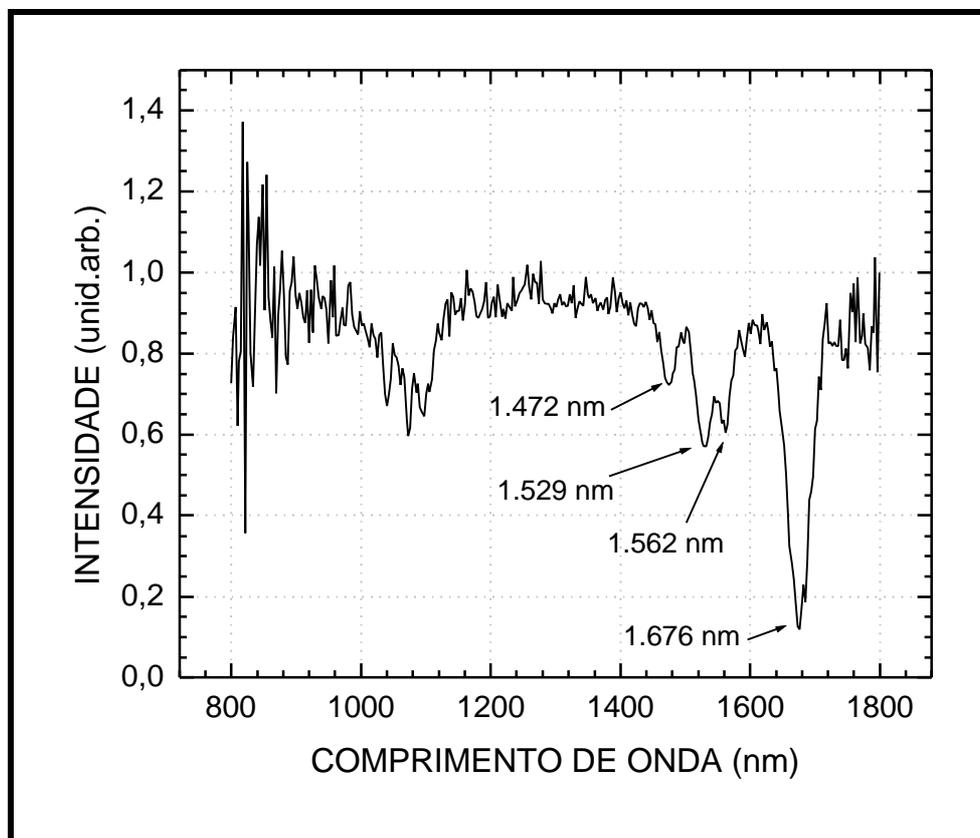


Figura 20 – Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 2).

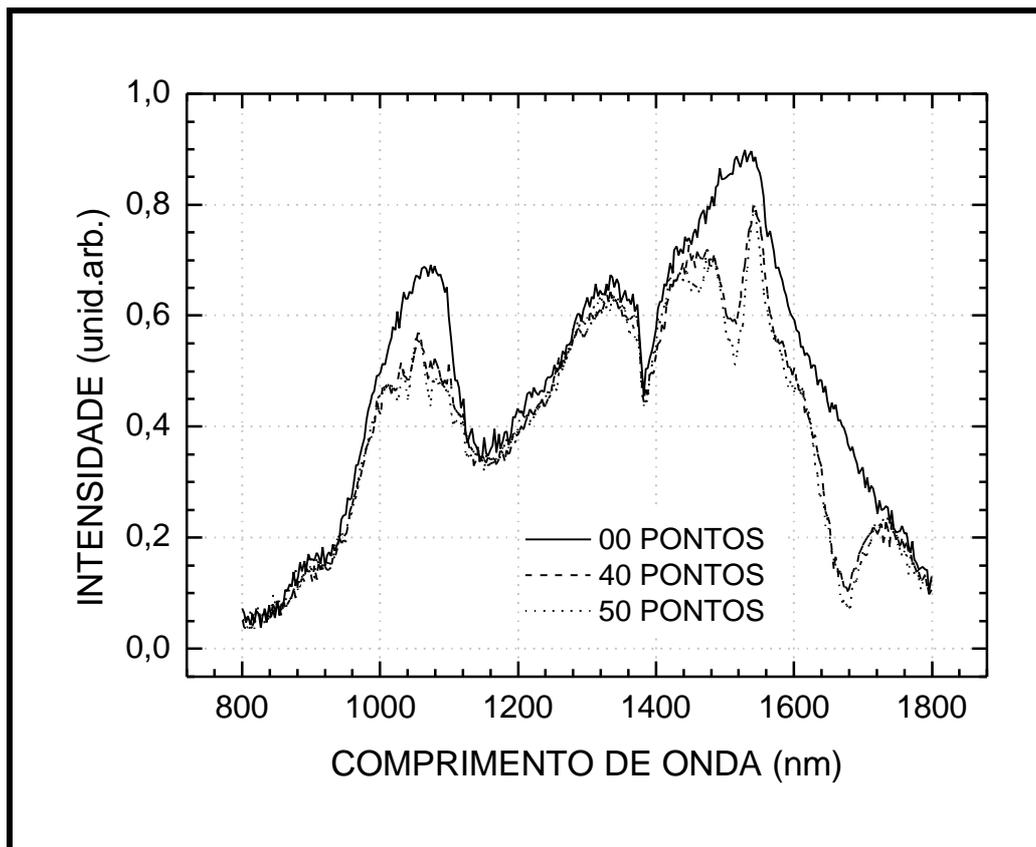


Figura 21 – Espectros de transmissão da fibra durante o processo de gravação (rede 3).

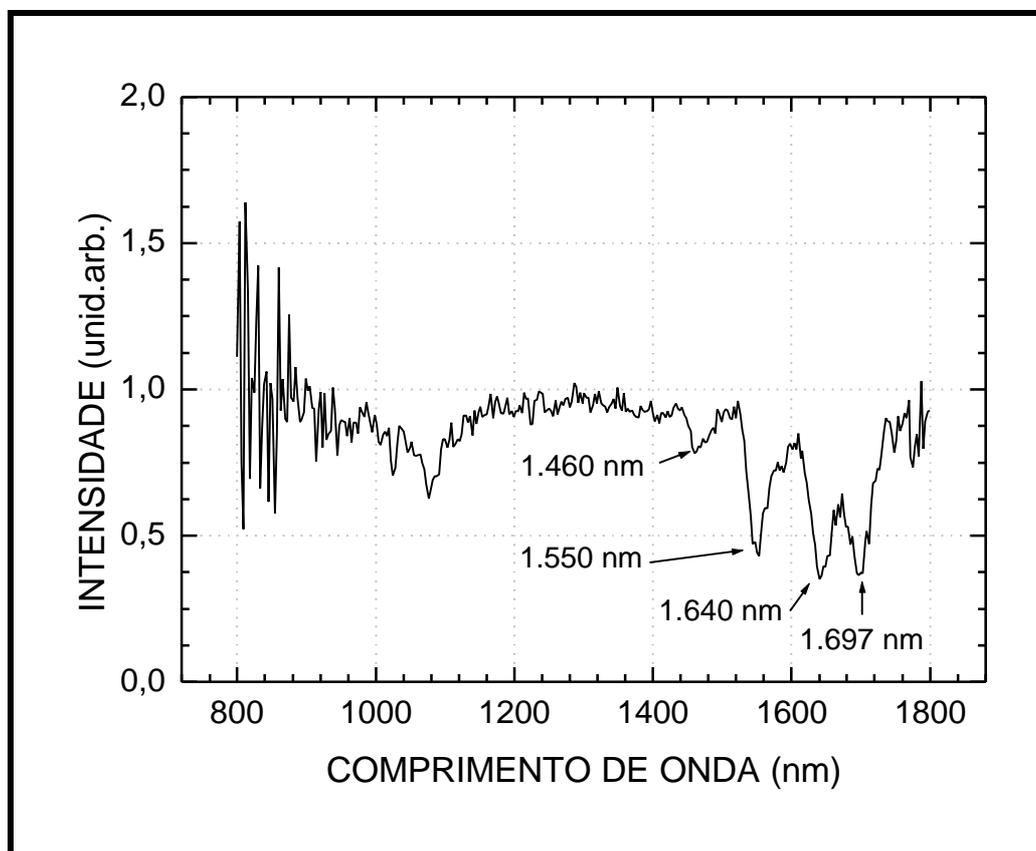


Figura 22 – Razão entre os espectros da fibra antes e após o término do processo de gravação (rede 3).

## 4.2 UTILIZAÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO COMO ELEMENTO SENSOR

### 4.2.1 Sensor de presença de hidrocarbonetos em água

Para a caracterização da rede como elemento sensor para a detecção de hidrocarbonetos em ambientes hídricos foi utilizado o sistema mostrado na figura 15 do capítulo 3. Esta caracterização foi realizada utilizando a rede 1, que possui apenas um vale de atenuação na faixa de operação do LED. A escolha desta rede foi arbitrária, pois não foram observadas características que privilegiassem alguma das redes para uma determinada caracterização, pois apenas um modo, o de maior comprimento de onda, estava localizado na banda de emissão do LED.

Os resultados, para amostra de gasolina, são mostrados na figura 23. O gráfico desta figura mostra o deslocamento do comprimento de onda central do vale de atenuação devido a presença de gasolina. A posição deste comprimento de onda é obtida através de um *software* (*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 *software*, e então localiza o ponto onde a derivada é zero. O período entre medidas sucessivas (3 segundos neste caso) é limitado pela resolução de operação do analisador de espectros óticos e pelo número de pontos utilizado no gráfico.

Pode-se observar que a posição do vale de atenuação desloca-se no mesmo instante em que a gasolina entra em contato com a rede, aproximadamente 120 segundos após o início das medidas. Logo após o escoamento da gasolina para fora do recipiente o comprimento de onda retorna a um valor próximo ao valor inicial, quando a rede estava imersa apenas em água. O fato do comprimento de onda não retornar ao seu valor inicial pode ser devido à adsorção de gasolina sobre a rede. Esta adsorção é possível porque tanto a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) como as moléculas de hidrocarboneto são apolares.

Após a primeira inserção de gasolina e seu escoamento para fora do recipiente, a rede é mantida sob o fluxo de água e foi observado que com a evolução do tempo, o comprimento de onda central do vale de atenuação retorna ao seu valor inicial após aproximadamente 1.500 s. Este comportamento reforça a hipótese da adsorção da gasolina pela fibra ótica, sendo o

fluxo de água posterior responsável pelo estabelecimento das condições iniciais. Em 2.180 s uma nova amostra de gasolina é inserida no recipiente e o comportamento se repete.

O comprimento de onda central do vale de atenuação não permanece no seu valor máximo de deslocamento, aproximadamente 6 nm, porque, devido ao fluxo de água empregado, a rede fica imersa na gasolina por um curto intervalo de tempo. No entanto, o deslocamento transitório deste comprimento de onda é suficiente para permitir a detecção da gasolina na água. Os tempos, nos quais a rede fica imersa na gasolina, nas duas medidas foram diferentes pois não se tem um controle sobre a forma de escoamento da gasolina no recipiente.

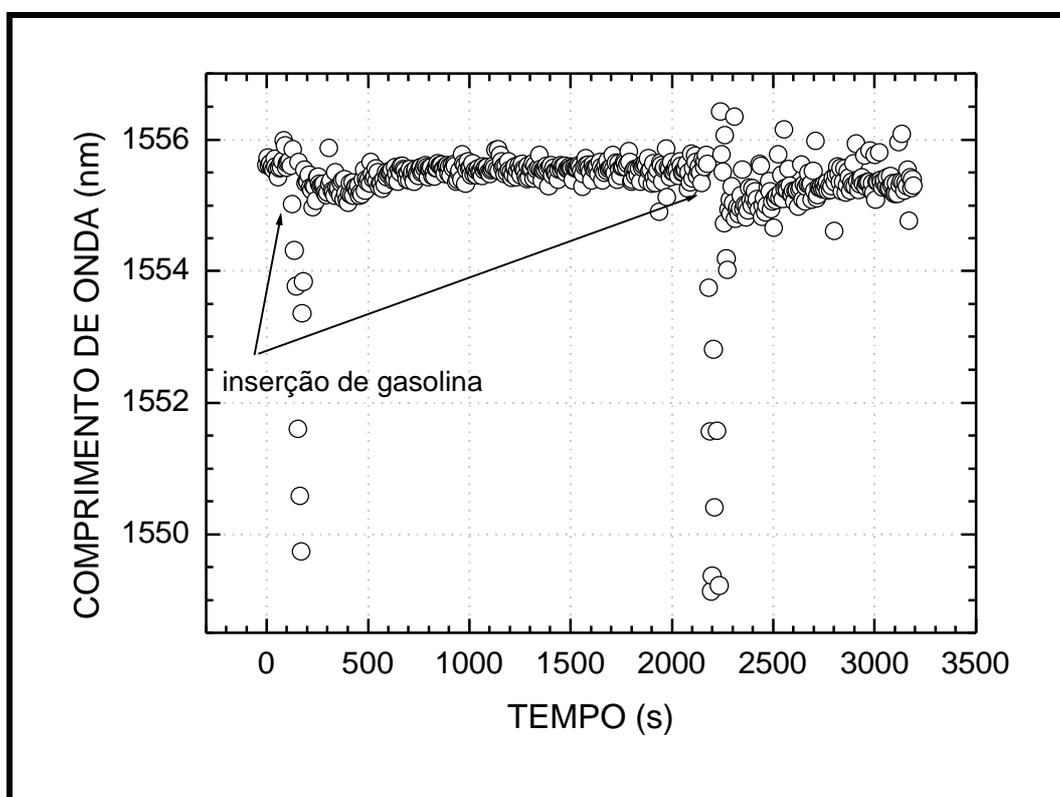


Figura 23 – Variação da posição do maior comprimento de onda de ressonância da rede 1, devido à presença de gasolina .

A posição do comprimento de onda central da rede 1 é diferente nos gráficos das figuras 18 (aproximadamente 1.526 nm) e 23 (aproximadamente 1.555 nm), porque durante a gravação e a caracterização a rede estava submetida a diferentes tensões e também durante a gravação e rede estava imersa em ar e durante as caracterizações a rede estava imersa em água. Este fato se repete para os dois vales de atenuação da rede 2 nos gráficos das figuras 20 (aproximadamente 1.529 nm para o primeiro pico e 1.562 nm para o segundo pico) , 24

(aproximadamente 1.559 nm para o primeiro pico) e 25 (aproximadamente 1.573 nm para o segundo pico). As figuras 18 e 20 mostram os espectros das rede 1 e 2, quando elas são tiradas da máquina de emendas, mas continuam presas ao estágio translacionador e uma massa presa a fibra numa região próxima a roldana as mantém tensionadas. A figura 23 mostra o espectro da rede 1 quando esta está presa no recipiente mostrado na figura 16 do capítulo 3. Neste caso, no recipiente um dos orifícios por onde passa a fibra é vedado com cola, a fibra é então tensionada manualmente antes do outro orifício ser vedado. Esta tensão manual permite que o vale de atenuação da rede possa ser sintonizado, pois a tensão modifica a posição do vale. Nos espectros das figuras 24 e 25 a tensão é devida às massas presas a fibra como pode ser visto na figura 14 do capítulo 3.

#### 4.2.2 Sensor de mistura gasosa

Para a caracterização da rede quanto à sua sensibilidade a pequenas variações de índice de refração devido à presença de uma mistura de gás propano e gás butano, foi utilizado o sistema mostrado na figura 14 do capítulo 3. A rede utilizada nesta caracterização foi a rede 2, que possui uma característica diferente das outras redes, com dois vales de atenuação na banda do LED, cujos deslocamentos foram acompanhados durante o tempo de exposição à mistura gasosa. Modos de diferentes ordens podem apresentar diferentes sensibilidades ao índice de refração do meio externo. Mas durante esta caracterização não foi observada esta característica, pois os comprimentos de onda central dos dois vales de atenuação apresentaram o mesmo deslocamento, 0,6 nm, para a primeira inserção de gás. Uma possível explicação para este fato é de que os modos de casca podem apresentar sensibilidades a alteração de índice do meio externo muito próximas.

As figuras 24 e 25 (FALATE *et al*, 2.003) mostram a variação dos dois comprimentos de onda de ressonância da rede devido às pequenas variações de índice de refração ocasionadas pela inserção da mistura de gás propano e de gás butano.

A periodicidade das medidas é de aproximadamente 3 segundos. O tempo total de medida foi de 600 segundos, tempo suficiente para duas inserções da mistura de gás a intervalos de 120 segundos.

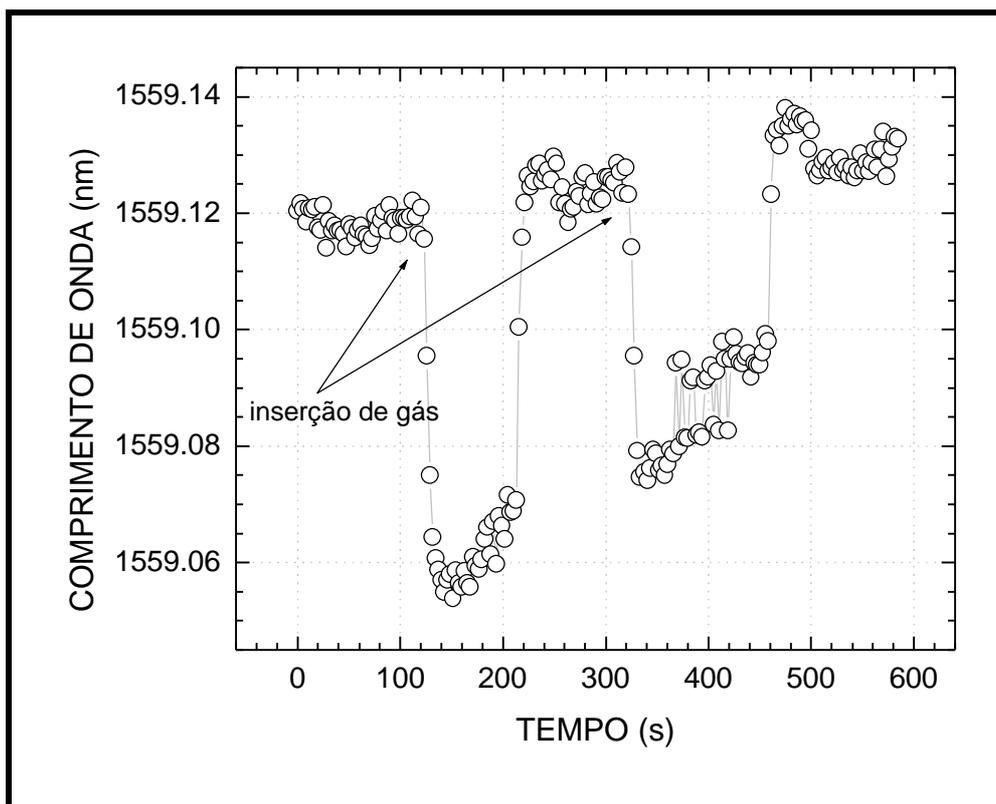


Figura 24 – Variação da posição do menor comprimento de onda de ressonância da rede 2, devido a presença da mistura de gás (FALATE *et al*, 2.003 ).

Nos gráficos das figuras 24 e 25 pode-se ver o deslocamento do comprimento de onda central do vale de atenuação devido a presença da mistura de gás. Os deslocamentos chegaram a aproximadamente 0,06 nm na primeira inserção e a aproximadamente 0,05 nm na segunda inserção para ambos os vales de atenuação. A precisão do analisador de espectros óticos é de 0,05 nm.

Nestes gráficos pode-se observar que o comprimento de onda central do vale de atenuação se mantém no valor mínimo por um período de tempo maior, quando comparado com as medidas com a gasolina, embora a magnitude do deslocamento seja menor do que no caso da detecção de gasolina. Este comportamento é devido à menor variação de índice de refração do meio causado pela inserção do gás do que o causado pela inserção da gasolina. Da mesma forma que na detecção da gasolina, o não retorno do comprimento de onda ao seu valor inicial é também observado nos dois ciclos de inserção de gás.

Neste experimento, o não retorno do comprimento de onda ao valor inicial, quando é interrompida a inserção de gás no recipiente, é menos evidente do que no caso da detecção de gasolina. Aqui, a ausência de um fluxo de fluido suficiente para limpar a superfície da fibra pode comprometer a realização de medidas sucessivas. Outra possibilidade é a de que a adsorção não tenha um papel fundamental neste comportamento, sendo o gás residual contido

no próprio compartimento de medidas o responsável pela variação do comprimento de onda inicial, pois sua presença aumentaria a pressão interna do recipiente.

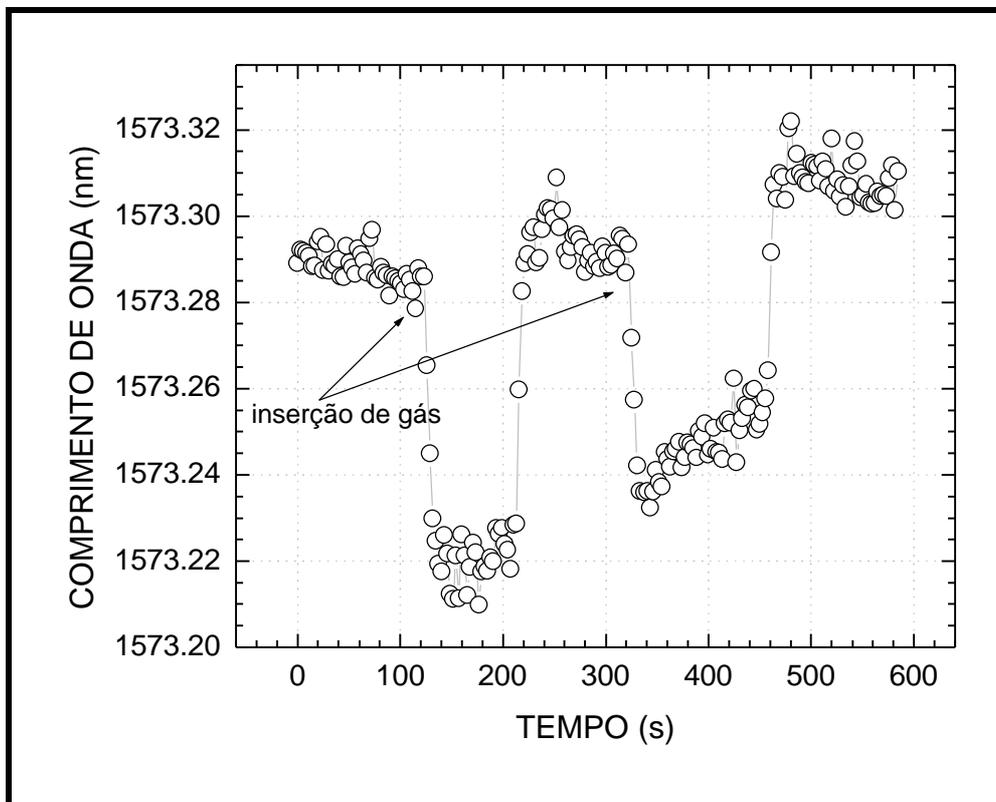


Figura 25 – Variação da posição do maior comprimento de onda de ressonância da rede 2, devido a presença da mistura de gás .

A rede 3 não foi utilizada, em nenhuma das medidas pois não houve necessidade, esta rede foi escrita para o caso de haver a necessidade de substituir alguma das redes durante as etapas de caracterização.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

#### 5.1 CONCLUSÕES

Com o sistema de gravação de redes de período longo utilizado, foi possível produzir redes com diferentes períodos e sensíveis o suficiente para detectar pequenas variações de índice de refração do meio circunvizinho. A metodologia utilizada para a escolha dos períodos das redes, por meio da inspeção do espectro de transmissão, permitiu a escrita de redes com comprimento de onda central do vale de atenuação dentro da banda de emissão do LED usado como fonte de luz durante as caracterizações. Um importante aspecto verificado durante os experimentos foi que o desgaste dos eletrodos da máquina de emendas diminui a eficiência das redes até um momento em que não é possível mais a gravação das redes, sendo necessária a troca destes eletrodos.

Na caracterização da LPG como elemento sensor de índice de refração, foi observado que a presença da gasolina em um fluxo de água foi detectada simultaneamente ao momento em que o contaminante entra em contato com a rede. A variação espectral gerada pela presença do contaminante e medida em comprimento de onda chegou a 6 nm, valor de fácil detecção para o caso de medidas no domínio ótico. A adsorção de gasolina sobre a sílica não mostrou ser um problema em medidas realizadas sucessivamente, uma vez que após cada medida ocorre uma reprodução das condições iniciais evidenciada pelo retorno do comprimento de onda de ressonância à sua posição original. Provavelmente, o fluxo de água não contaminada durante o intervalo de tempo entre as medidas foi responsável pela limpeza da superfície do elemento sensor.

A caracterização das redes com a mistura gasosa mostrou que estas são capazes de detectar a presença do gás. Apesar do pequeno deslocamento gerado no comprimento de onda central do vale de atenuação, 0,06 nm para a primeira inserção de gás, este está acima da precisão do analisador de espectros óticos que é de 0,05 nm. Durante a caracterização o fenômeno da adsorção também foi observado. Mas nestas medidas não houve um fator que corrigisse a poluição da rede, como o fluxo de água nas medidas com a gasolina, comprometendo medidas sucessivas.

Uma característica importante deste elemento sensor é que a detecção é realizada no domínio espectral, não estando influenciada pelo nível do sinal (desde que acima da relação sinal/ruído mínima do instrumento de medida) decorrente de flutuações em intensidade na fonte de luz ou em outros pontos do enlace.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros sugere-se o estudo de novas técnicas de gravação que possibilitem a produção de redes mais eficientes e com menor largura de banda. Uma das formas de se obter redes mais eficientes é submeter as fibras a um tratamento térmico antes do processo de escrita com o arco elétrico. Redes com menor largura de banda exigirão melhorias no estágio translacionador ou a adoção da técnica que faz uso de uma máscara de amplitude. Redes com as características mencionadas acima tornariam mais fácil a localização do comprimento de onda central do vale de atenuação e a caracterização de um sistema de sensoriamento quase distribuído. Outra técnica sugerida é a exposição ponto-a-ponto a um laser operando no ultravioleta. Para tanto, o Laboratório de Laser do CEFET-PR dispõe de um laser de Nd:YAG operando no ultravioleta em 266 nm e de lentes específicas para radiação ultravioleta.

Na caracterização do sensor um outro estudo de grande interesse envolve o uso de diferentes substâncias poluentes que são despejadas diariamente nos rios por indústrias. Também é importante a caracterização de duas ou mais redes multiplexadas em uma mesma fibra ótica, para verificação da possibilidade de um único enlace monitorar vários pontos de interesse. Estas redes estariam inseridas em uma mesma fibra ótica e operando em diferentes comprimentos de onda, possibilitando o monitoramento de diferentes locais associados aos diferentes comprimentos de onda, utilizando uma única fonte ótica. Para este estudo são necessárias várias redes com larguras de banda estreitas objetivando um melhor aproveitamento da faixa espectral da fonte ótica disponível.

Um trabalho envolvendo caracterizações de um enlace contendo uma LPG e uma rede de Bragg é fundamental no estudo da aplicação de redes de período longo como elemento sensor. A rede de Bragg pode monitorar a temperatura sem a influência de mudanças do índice de refração do meio externo, permitindo a correção da curva de resposta de rede de período longo para variações de índice de refração para diferentes temperaturas do meio externo.

Como última sugestão para trabalhos futuros indica-se o estudo de um sistema que possibilite medidas de campo. Este poderia ser um encapsulamento para a rede, que teria a função de proteger a rede e mantê-la sob uma tensão constante e além disto, ele deve manter a rede próxima a superfície do ambiente hídrico, para garantir que a rede entre em contato com o contaminante.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABRAMOV, A. A.; EGGLETON, B. J.; ROGERS, J. A.; ESPINDOLA, R. P.; HALE, A.; WINDELER, R. S. and STRASSER, T. A. “Electrically Tunable Efficient Broad-Band Fiber Filter”, **IEEE Photonics Technology Letters**, vol. 11, no. 4, 445-447, April 1999.
- 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. **Proceedings of OFC’-1.998 Technical Digest, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit**. San Jose, p. 276-277, 1.998.
- BHATIA, V., CAMPBELL, D. K., ALBERTO, T. D., EYCK, C. 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. **Tech. Dig. Conf. Opt. Fiber Commun.**, Dallas, TX, p. 346-347, 1997.
- BHATIA, V., VENGSARKAR, A. M., Optical Fiber Long-Period Grating Sensors. **Optical Letters**, v.21, p. 692-694, 1.996.
- CAETANO, L. A. C., FONTOURA S. A. B., TORRES P., VALENTE L. C. G., “Optical Fiber System for Saline Concentration Measurement in Drilling Fluids”, **SPIE** Vol. 4419, p.54 – 57, 2001.
- CHERIN, A., H.. **An Introduction to Optical Fibers**. Atlanta: Bell Telephone Laboratories, 1983.

DAVIS, D. D., GAYLORD, T. K., GLYTSIS, E. N., KOSINSKI, S. G., METTLER, S. C., VENGSARKAR, A. M., Long-Period Fiber Grating Fabrication with Focused CO<sub>2</sub> Laser Pulses. **Electronic Letters**, v.34, p. 302-303, 1.998a.

DAVIS, D. D., GAYLORD, T. K., GLYTSIS, E. N., METTLER, S. C., CO<sub>2</sub> Laser-Induced Long-Period Fiber Gratings: Spectral Characteristics, Cladding Modes and Polarization Independence. **Electronic Letters**, v. 34, p. 1416-1417, 1.998b.

FABRIS, J. L., GÓES, R. E., FALATE, R. e MÜLLER, M.. Sistema Integrado para Caracterização Ótica de Materiais, **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, vol. 14, p. 38-44, 1999.

FALATE, R., Produção e Caracterização de Redes de Período Longo para Aplicações em Sensoriamento. Dissertação de Mestrado em Informática Industrial – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

FALATE, R., FUGIHARA, M. C., MÜLLER, M., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., Produção e Caracterização de Redes de Período Longo Gravadas com Arco Elétrico. **Proceedings of SBMO – 2.002, X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica**, Recife, p 79-82, 2.002.

FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C., FABRIS, J. L., MULLER, M., KALINOWSKI, H. J., FERRI, F. A. S., CZELUSNIAK, L. K., “ Petroleum Hydrocarbon Detection with Long Period Gratings”, in **International Microwave and Optoelectronics Conference**, proceedings of the International Microwave and Optoelectronics Conferebce – IMOC 2.003, v. 2, p. 907-910, 2.003.

HILL, K. O., FUJII, Y., JOHNSON, D. C., KAWASAKI, B. S., Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. **Appl. Physics Letters**, v32, p. 647-649, 1.978.

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

LEMAIRE, P. J., ATKINS R. M., MIZRAHI V. and REED W. A., “High-pressure H<sub>2</sub> loading as technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO<sub>2</sub> doped optical fibers”, **Electronics Letters**, vol. 29, p. 1191-1193, 1.993.

MELTZ, G., MOREY, W. W., GLEN, W. H., Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method. **Optical Letters**, v.14, p. 823-825, 1.988.

OTHONOS, A., KALLI, K.. **Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing**. Norwood: Artech house, 1999.

QIN, L.; WEI, Z. X.; WANG, Q. Y.; LI, H. P.; ZHENG, W.; ZHANG, Y. S.; GAO, D. S. “Compact temperature-compensating package for long-period fiber gratings”, **Optical Materials**, vol. 14, 239-242, 2000.

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. 1.574-1579, 2.001.

REGO, G., DÜRR, F., LIMBERGER, H., G., SEMJONOV, S., L., SALGADO, H., M., SANTOS, J., L., “Inscription of Long Period Gratings in Nitrogen-Doped Fibres Drawn at

Different Drawing Tensions”, in **13ª Conferência Nacional de Física e 12º Encontro Ibérico para o Ensino de Física**, v.1, p. 506-507, 2.002.

VENGSAKAR, 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, january, 1996a.

VENGSAKAR, A. M., PEDRAZZANI, J. R., JUDKINS, J. B., LEMAIRE, P. J., Long-Period Fiber-Grating-Based Gain Equalizers. **Optics Letters**, v.21, p. 335-338, march, 1996b.

XUEWEN, S., HUANG, D., Highly Sensitive Chemical Sensor Based on the Measurement of the Separation of Dual Resonant Peaks in a 100-mm-period Fiber Grating. **Optics Communications**, v. 171, p. 65-69, November, 1.999.

ZHANG, L., LIU, Y., EVERALL, L., WILLIAMS, J. A. R., 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, p. 1.373-1.378, 1.999.

ZHU, Y., CHONG, J., H., RAO, M. K., HARYONO, H., YOHANA, A., SHUM, P., LU, C., “A Long-Period Grating Refractometer: Measurements of Refractive Index Sensitivity”, in **International Microwave and Optoelectronics Conference**, proceedings of the International Microwave and Optoelectronics Conference – IMOC 2.003, v. 2, p. 901-904, 2.003

YIN, S.; CHUNG, K.-W., ZHU, X. "A Highly Sensitive Long Period Grating Based Tunable Filter Using a Unique Double-Cladding Layer Structure", **Optics Communications**, vol. 188, 301-305, February 2001.