



**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CAMPUS CURITIBA**

**GERÊNCIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

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

**RICARDO CANUTE KAMIKAWACHI**

**DISPOSITIVOS SENSORES EM FIBRA PARA USO  
EM REFRACTOMETRIA**

**TESE DE DOUTORADO**

**CURITIBA  
OUTUBRO -2007.**

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

---

**TESE**

apresentada a UTFPR  
como requisito para obtenção do título de

**DOUTOR EM CIÊNCIAS**

por

**RICARDO CANUTE KAMIKAWACHI**

---

**DISPOSITIVOS SENSORES EM FIBRA PARA USO EM REFRACTOMETRIA**

---

Banca examinadora:

Orientador:

Prof. Dr. JOSÉ LUÍS FABRIS

UTFPR

Examinadores:

Prof. Dr. SÉRGIO CARLOS ZILIO

USP- SÃO CARLOS

Prof. Dr. LUCIMARA STOLZ ROMAN

UFPR

Prof. Dr. MÁRLIO JOSÉ DO COUTO BONFIM

UFPR

Prof. Dr. JÚLIO CÉSAR RODRIGUES de AZEVEDO

UTFPR

Prof. Dr. CARLOS MARCUS GOMES da SILVA  
CRUZ

UTFPR

**Curitiba, 25 de outubro de 2007.**

**RICARDO CANUTE KAMIKAWACHI**

**DISPOSITIVOS SENSOES EM FIBRA PARA USO EM  
REFRATOMETRIA**

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

Orientador: Prof. Dr. José Luís Fabris

Co-orientador: Prof. Dr. Marcia Muller

Co-orientador: Prof. Dr. João de Lemos Pinto

Curitiba

2007

## **AGRADECIMENTOS**

À CAPES, pela concessão de bolsa e apoio financeiro a este projeto. Aos meus orientadores professor José Luís Fabris e professora Marcia Muller e ao Hypolito José Kalinowski, pelo conhecimento adquirido com suas experiências, pela paciência, ajuda, incentivo e colaboração para a finalização deste trabalho.

Aos professores Sergio C. Zílio e Julio C. R. de Azevedo pelas importantes comentários, durante o exame de qualificação, que ajudaram a delinear o desenvolvimento desta tese.

Ao professor João de Lemos Pinto e a Ilda Abe pela orientação e amizade durante o estágio de doutorado em Portugal.

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

Aos professores da UTFPR que me apoiaram durante o curso.

À UTFPR e a Universidade de Aveiro, pelas instalações oferecidas para a realização deste trabalho.

## DEDICATÓRIA

A minha esposa Bethânia que esteve sempre me incentivando e apoiando  
e cuidou sozinha de nossa filha durante  
o período de meu estágio em Portugal.  
A minha filha Ana Carolina que tão nova  
teve que lidar com um longo período  
de ausência do pai.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b> .....	xii
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiv
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 ESTADO DA ARTE.....	3
1.2.1 Redes de Bragg corroídas.....	3
1.2.2 O surgimento das redes de período longo.....	4
1.2.3 Aplicação na área de sensoriamento.....	6
1.2.4 Redes termo-induzidas.....	11
1.2.5 Redes induzidas mecanicamente.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	17
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	19
2.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM FIBRAS ÓPTICAS.....	19
2.2 REDES EM FIBRAS ÓPTICAS.....	21
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	31
3.1 MATERIAIS, INFRA-ESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO.....	31
3.1.1 Produção das redes de período longo.....	31
3.1.2 Determinação dos parâmetros das redes.....	33
3.1.3 Produção das redes de Bragg corroídas.....	34
3.1.4 Caracterização das sensibilidades da LPG e das LPG acopladas em série.....	34
3.1.5 Aplicações da LPG como sensor.....	36
3.1.6 Aplicações das LPG acopladas em série como sensor.....	38
3.1.7 Caracterização das sensibilidades da FBG corroída.....	38
3.2 REDES EM FIBRAS ÓPTICAS.....	22
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	41
4.1 PRODUÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO.....	41
4.1.1 Influência da tensão na fibra .....	41

4.1.2 Influência do número de arcos elétricos aplicados a cada ponto.....	49
4.1.3 Reprodutibilidade das características espectrais.....	54
4.1.4 Redes acopladas em série.....	57
4.2 PRODUÇÃO DAS REDES DE BRAGG CORRÍDAS.....	62
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES DA LPG.....	63
4.3.1 Sensibilidade ao índice de refração da LPG.....	63
4.3.2 Sensibilidade à temperatura.....	64
4.3.3 Sensibilidade à deformação longitudinal.....	68
4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES DA CLPG.....	70
4.4.1 Contribuição dos segmentos das redes acopladas em série.....	70
4.4.2 Sensibilidade da CLPG ao índice de refração do meio externo.....	71
4.4.3 Sensibilidade térmica da CLPG.....	73
4.4.4 Sensibilidade da CLPG à deformação longitudinal.....	75
4.5 APLICAÇÕES DA LPG E DA CLPG COMO ELEMENTO SENSOR.....	77
4.5.1 LPG como sensor de presença de hidrocarbonetos em água.....	77
4.5.2 Desempenho da LPG e da CLPG como sensor para Cr (III) e Cr (VI) em soluções aquosas.....	79
4.5.3 Caracterização da CLPG como sensor para detecção de hidrocarbonetos na forma gasosa.....	82
4.5.4 Caracterização da sensibilidade ao índice de refração da FBG corroída.....	83
4.5.5 Caracterização da sensibilidade à temperatura da FBG corroída.....	85
4.5.6 Aplicação da FBG corroída para determinação de coeficientes termo-ópticos..	88
<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>93</b>
5.1 PRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS.....	93
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES.....	94
5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS COMO ELEMENTO SENSOR.....	95
5.4 TRABALHOS FUTUROS.....	97
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>99</b>
DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS.....	99
<b>PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE.....</b>	<b>107</b>
ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS.....	107
TRABALHOS COMPLETOS EM ANAIS DE EVENTOS.....	107

TRABALHOS EM CO-AUTORIA.....	108
ARTIGOS COMPLETOS SUBMETIDOS.....	109
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>111</b>



## LISTA DE FIGURAS

1	(a) Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica que faz uso de uma máscara de amplitude. (b) Técnica ponto-a-ponto, ambas fazendo uso da fotossensibilidade da fibra a radiação ultravioleta.....	5
2	Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica ponto-a-ponto utilizando um laser de CO <sub>2</sub> . O destaque na figura ilustra a alteração gradual do índice de refração da fibra causada pela absorção da radiação.....	12
3	Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica ponto-a-ponto empregando um arco elétrico proveniente de uma máquina de emendas de fibras ópticas.....	14
4	Ilustração do perfil longitudinal de uma fibra óptica na região onde uma LPG foi gravada por meio da corrosão da casca pelo ácido HCl.....	15
5	Produção de LPG utilizando um fio de nylon e ranhuras sobre um tubo metálico para induzir mecanicamente LPG. O detalhe ampliado na figura representa a secção transversal do tubo paralela à fibra.....	16
6	Geometria da fibra de índice degrau usada no estudo dos modos de propagação.....	19
7	Diagrama ilustrativo representando o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo propagante e contra propagante. Neste diagrama é ilustrada a relação entre o período da rede e o modo para o qual a luz é acoplada.....	22
8	Diagrama representando o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo e um modo de casca co-propagante. Neste diagrama é ilustrada a relação entre o período da rede e os modos acoplados.....	24
9	Espectro de transmissão característico de uma LPG simulado no software IFOgratings.....	28
10	Diagrama representando o acoplamento entre duas LPG idênticas com eficiência de 3 dB, gravadas em série na mesma fibra distantes de um comprimento L. O espectro de transmissão em cada segmento da fibra também é ilustrado na figura .....	29
11	Sistema de gravação de LPG ponto-a-ponto utilizando um arco elétrico proveniente de uma máquina de emendas de fibras ópticas.....	32
12	Sistema utilizado na caracterização das sensibilidades da LPG.....	35
13	Evolução do espectro de transmissão da rede MA20 com o aumento do número de pontos.....	42

14	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA20. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	43
15	Evolução do espectro de transmissão da rede MA25 com o aumento do número de pontos.....	43
16	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA25. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	44
17	Evolução do espectro de transmissão da rede MA30 com o aumento do número de pontos.....	44
18	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA30. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	45
19	Evolução do espectro de transmissão da rede MA35 com o aumento do número de pontos.....	45
20	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA35. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	46
21	Evolução do espectro de transmissão da rede MA40 com o aumento do número de pontos.....	46
22	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA40. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	47
23	Evolução do espectro de transmissão da rede AE01 com o aumento do número de pontos.....	49
24	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE01. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	50
25	Evolução do espectro de transmissão da rede AE02 com o aumento do número de pontos.....	50
26	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE02. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	51

27	Evolução do espectro de transmissão da rede AE03 com o aumento do número de pontos.....	51
28	Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE03. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.....	52
29	Evolução do espectro de transmissão da rede AE03 para um número de pontos superior aquele no qual a eficiência é máxima.....	53
30	Evolução do espectro de transmissão da rede AE03, simulada com o programa IFOgratings para um número de pontos superior aquele no qual a eficiência é máxima.....	54
31	Espectros de transmissão das redes RP01A1, RP02A1 e RP03A1.....	56
32	Espectros de transmissão das redes RP01A2, RP02A2 e RP03A2.....	57
33	Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de um cm entre elas. A linha tracejada corresponde a primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.....	58
34	Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de cinco cm entre elas. A linha tracejada corresponde a primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.....	59
35	Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de 10 cm entre elas. A linha tracejada corresponde a primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.....	60
36	Evolução do comprimento de onda de Bragg (medido) e diâmetro da fibra (calculado) em função do tempo de corrosão.....	62
37	Resultados experimentais e ajuste teórico da caracterização da sensibilidade ao índice de refração. A sensibilidade é obtida a partir da derivada do ajuste teórico.....	63
38	Resposta da LPG à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste teórico, equação 24.....	65
39	Variação da sensibilidade da LPG quando a rede está imersa nas diferentes amostras em função do aumento de temperatura.....	66
40	Dependência do coeficiente termo-óptico de acoplamento com o índice de refração do meio externo. Valores obtidos com os ajustes mostrados na figura 43. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.....	67

41	Eixo da esquerda, resposta da LPG à deformação longitudinal (eixo inferior) na presença de diferentes meios externos. No eixo superior está representada a deformação normalizada do período da rede versus o deslocamento em comprimento de onda normalizado (eixo da direita). As barras de erros estão relacionadas ao eixo esquerdo.....	68
42	Dependência do coeficiente elásto-óptico com o índice de refração do meio externo. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.....	69
43	Espectro de transmissão da CLPG quando cada um dos segmentos (LPG + cavidade + LPG) está imerso em água.....	70
44	Resultados experimentais da caracterização da sensibilidade ao índice de refração de uma LPG e dos vales 3 e 4 da CLPG SE01. A curva representa o ajuste empírico dado pela equação 29.....	72
45	Sensibilidades ao índice de refração do meio externo para a LPG, o vale 3 da CLPG e o vale 4 da CLPG SE01. As sensibilidades foram obtidas a partir da derivada numérica do ajuste empírico mostrado na figura 43.....	72
46	Resposta do vale 3 da CLPG SE01 à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste empírico, equação 30.....	74
47	Variação da sensibilidade da CLPG SE01 quando a rede está imersa nas diferentes amostras em função do aumento de temperatura.....	74
48	Variação da sensibilidade da CLPG SE01, em detalhe, quando a rede está imersa nas amostras com menor índice de refração em função do aumento de temperatura...	75
49	Resposta do vale 3 da CLPG à deformação longitudinal quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste linear.....	76
50	Comportamento térmico da LPG e da FBG ambas imersas em água.....	77
51	Deslocamento do comprimento de onda devido à presença de gasolina, aguarrás, querosene e tiner em ambiente hídrico.....	78
52	Comportamento do vale de atenuação da LPG para soluções de Cr (III) e Cr (VI) em diferentes concentrações. As linhas conectando os pontos correspondem às curvas empíricas, e são apenas guias visuais.....	80
53	Comportamento do quinto vale de atenuação de duas LPG em série para soluções de Cr (III) e Cr (VI) com diferentes concentrações.....	81

54	Deslocamento do comprimento de onda do vale 3 da CLPG na presença do vapor de etanol e das amostras de hidrocarbonetos. A linha ligando os pontos experimentais é apenas um guia visual.....	82
55	Comprimento de onda de Bragg em função do índice de refração do meio externo para com diâmetros de 15, 10, 9 e 8 $\mu\text{m}$ . A linha ligando os pontos experimentais representa o ajuste empírico, equação 31.....	83
56	Sensibilidade ao índice de refração do meio externo para FBG com diâmetros de 15, 10, 9 e 8 $\mu\text{m}$ obtida a partir da derivada numérica da função de ajuste.....	84
57	Resposta da FBG com um diâmetro de 8 $\mu\text{m}$ à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste empírico, equação 30.....	85
58	Variação da sensibilidade da FBG (8 $\mu\text{m}$ de diâmetro) e função da temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras, em função do aumento de temperatura.....	86
59	Resposta do comprimento de onda Bragg a variação de temperatura quando a rede está imersa em água. Os símbolos fechados (●) representam o resultados experimentais e os símbolos abertos (○) representam os resultados corrigidos.....	89
60	Comportamento do comprimento de onda quando o índice de refração da amostra diminui devido ao efeito termo-óptico em função da temperatura. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.....	90
61	Comportamento do comprimento de onda quando o índice de refração da amostra diminui devido ao efeito termo-óptico em função da temperatura. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.....	90

## LISTA DE TABELAS

1	Parâmetros das redes mostradas nas figuras de 15 a 22.....	47
2	Características espectrais das redes mostradas na figura 29, 31 E 33.....	52
3	Parâmetros das redes mostradas na figura 30.....	55
4	Parâmetros das redes mostradas na figura 31.....	56
5	Parâmetros da rede SE01.....	58
6	Parâmetros da rede SE05.....	59
7	Parâmetros da rede SE10.....	61
8	Índice de refração e sensibilidades, em 1550 nm, das amostras utilizadas nas caracterizações das sensibilidades.....	64
9	Coefficiente termo-óptico de acoplamento para diferentes meios externos.....	68
10	Sensibilidade à deformação longitudinal e coeficiente fotoelástico da LPG para diferentes externos.....	69
11	Sensibilidade à deformação longitudinal da CLPG para diferentes externos .....	76
12	Comparação entre os comprimentos de onda do vale de atenuação, medidos e calculados, para uma variação de temperatura de 20 °C a 40 °C .....	78
13	Comprimentos de onda medidos para a caracterização da LPG como sensor de hidrocarbonetos em ambiente hídrico.....	79
14	Deslocamentos dos vales de atenuação das redes em séries e de uma rede para uma variação de índice de refração de 1,00 a 1,33.....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE01	- Rede gravada aplicando 1 arco elétrico por ponto
AE02	- Rede gravada aplicando 2 arco elétrico por ponto
AE03	- Rede gravada aplicando 3 arco elétrico por ponto
BTEX	- Benzeno, tolueno, etilbenzeno e os xilenos (orto, para e meta)
CLPG	- <i>Cascaded long period gratings</i> (redes de período long acopladas em série)
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
FBG	- <i>Fiber Bragg Gratings</i> (redes de Bragg)
FWHM	- <i>Full width at half maximum</i> (largura de banda a meia altura)
HC 1	-Hidrocarboneto 1 (benzina)
HC 2	-Hidrocarboneto 2 (tíner)
HC 3	-Hidrocarboneto 3 (mistura de 50% de tíner e 50% de aguarrás)
HC 4	-Hidrocarboneto 4 (aguarrás)
HC 5	-Hidrocarboneto 5 (querosene)
Hi-bi	- <i>High birefringence</i> (alta birefringência)
LED	- <i>Ligth emission diode</i> (diodo emissor de luz)
LPG	- <i>Long Period Gratings</i> (redes de período longo)
MA20	- Rede gravada utilizando uma massa de 20g
MA25	- Rede gravada utilizando uma massa de 25g
MA30	- Rede gravada utilizando uma massa de 30g
MA35	- Rede gravada utilizando uma massa de 35g
MA40	- Rede gravada utilizando uma massa de 40g
OSA	- <i>Optical Spectrum Analyzer</i> (analisador de espectros óticos)
PVC	- Poli (álcool polivinílico)
RP01A1	- Primeira rede gravada aplicando 1 arco no teste da reprodutibilidade
RP02A1	- Segunda rede gravada aplicando 1 arco no teste da reprodutibilidade
RP03A1	- Terceira rede gravada aplicando 1 arco no teste da reprodutibilidade
RP01A2	- Primeira rede gravada aplicando 2 arcos no teste da reprodutibilidade
RP02A2	- Segunda rede gravada aplicando 2 arcos no teste da reprodutibilidade
RP03A2	- Terceira rede gravada aplicando 2 arcos no teste da reprodutibilidade
SE01	- Redes em séries com 1 cm de separação entre elas
SE05	- Redes em séries com 5 cm de separação entre elas

SE10 - Redes em séries com 10 cm de separação entre elas  
UV - Ultravioleta



## RESUMO

Este trabalho descreve a produção e a caracterização de redes de período longo (LPG) e redes de Bragg corroídas como elemento sensor. Tanto a produção quanto às caracterizações das redes de período longo foram realizadas no Laboratório de Laser da UTFPR e a produção e caracterização das redes de Bragg corroídas foram realizadas no Laboratório de Óptica Coerente da Universidade de Aveiro, Portugal. 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 das redes de período longo foi o da aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico, sendo produzidas redes com períodos de 598 e 600  $\mu\text{m}$  operando na terceira janela de transmissão em torno de 1,55  $\mu\text{m}$ . As redes de período longo e as redes de Bragg corroídas foram caracterizadas quanto as suas sensibilidades ao índice de refração, temperatura e deformações longitudinais (esta última caracterização foi realizada apenas para as redes de período longo), assim com a sensibilidade cruzada a estes parâmetros. A resposta das redes de período longo 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 vapores de hidrocarbonetos ambiente atmosférico, indica a possibilidade da utilização deste dispositivo na detecção de vazamentos de hidrocarbonetos em refinarias ou postos de abastecimentos. Estas redes também foram caracterizadas para monitorar a concentração de cromo (III e VI) em soluções aquosas, os resultados indicam a possibilidades de monitorar em tempo real os processos de tratamento destes produtos, e assim otimizar este processo. As redes de Bragg foram utilizadas para a caracterização de propriedades ópticas de materiais, o resultado obtido para o etanol mostrou boa concordância com os valores apresentados na literatura, indicando que esta é uma técnica adequada para este fim.

## ***ABSTRACT***

This work describes the production and characterization of long period gratings (LPG) and etched fiber Bragg gratings as sensors. Both the production and characterization were carried out at the Laser Laboratory of UTFPR and the production and characterization of etched fiber Bragg gratings were carried out at Coherent Optics Laboratory of University of Aveiro, Portugal. 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 and 600  $\mu\text{m}$  operating at the third window transmission around 1.55  $\mu\text{m}$ . The long period gratings and the etched fiber Bragg gratings were characterized as a function of modification on the refractive index of the external surrounding environment, of temperature changes and strain (this last parameter was carried out only for long period gratings), the cross sensitivity also was characterized. The refractive index response of long period grating at two different conditions, one of them for presence of gasoline blend in water environment and another one for vapors of some hydrocarbon in closed container, points to the use of this device for hydrocarbon leakage detection at refineries and gas stations. Long period gratings e results obtained for ethanol agrees with the data find in literature, showing that this is a good technique for this goal.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As empresas de petróleo enfrentam diariamente problemas decorrentes de vazamentos, derrames e acidentes durante a exploração, refinamento e operação de transporte e armazenamento do petróleo e seus derivados. O vazamento em dutos ou tanques de armazenamento pode causar uma poluição significativa do meio ambiente e ter resultados catastróficos se não detectada e localizada em seu estágio inicial. Os danos causados ao meio ambiente podem levar um longo período de tempo para serem reparados, envolvendo altos custos e denegrindo a imagem da empresa envolvida perante a sociedade. Os locais mais comuns onde estes acidentes ocorrem são as refinarias, portos e tubulações, os quais freqüentemente estão próximos a rios, mangues e ao oceano aumentando o problema devido ao fluxo de água destes locais. Os atuais sistemas de detecção estão fundamentados na monitoração da pressão e do fluxo dos produtos quando estes estão sendo transportados ou armazenados além da observação visual, o que pode acarretar em um grande período de tempo para a detecção de eventuais problemas.

Outra preocupação relacionada a derramamentos de combustíveis é a contaminação de aquíferos que sejam utilizados como fonte de abastecimento de água para o consumo humano. Nestes casos os locais onde este tipo de contaminação ocorre com freqüência são os postos de combustíveis. Os hidrocarbonetos monoaromáticos constituintes da gasolina, benzeno, tolueno, etilbenzeno e os três xilenos orto, meta e para, chamados compostos BTEX, são os constituintes da gasolina que têm maior solubilidade em água e, portanto, são os contaminantes que primeiro irão atingir o lençol freático (CORSEUIL, 1992). Estes contaminantes são considerados substâncias perigosas por serem depressores do sistema nervoso central e por causarem leucemia em exposições crônicas. Dentre os BTEX, o benzeno é considerado o mais tóxico com padrão de potabilidade de 5 µg/l, segundo as normas do Ministério da Saúde (CONAMA - resolução nº 357/05).

Portanto o desenvolvimento de sistemas com alta sensibilidade e resposta rápida para a detecção e localização dos vazamentos de hidrocarbonetos torna-se um importante objeto de

estudo. Além disto, é desejável que os sistemas sensores apresentem características que permitam sua operação em ambientes hostis ou inflamáveis sem risco de incêndio ou explosão.

Outro assunto que tem recebido grande atenção da sociedade, no campo de preservação ambiental, é o cuidado com o uso correto da água. Existem diversas formas de contaminar este recurso natural, tais como a contaminação por resíduos industriais contendo metais pesados. As emissões de resíduos industriais e a contaminação de ambientes hídricos, em especial por metais pesados, têm provocado muitas discussões a respeito da preservação da natureza e do uso racional de recursos hídricos. Esses desequilíbrios originam impactos cujas conseqüências podem ser agudas ou crônicas (BAIRD, 2002), tanto para o meio ambiente quanto para a saúde do homem. Um destes metais pesados é o Cromo, que em forma de elemento livre condensado não é tóxico. Contudo, suas formações catiônicas são extremamente perigosas. O estado mais comum encontrado na troposfera é o Cr (III), que possui baixa toxicidade. Por sua vez, o Cr (VI), amplamente aplicado em processos industriais, é extremamente danoso, podendo provocar anemia e degenerações hepáticas, renais e pulmonares.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA - estabeleceu em sua Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, que a quantidade máxima de Cromo total que uma fonte poluidora pode despejar nos corpos d'água é 0,5 mg/L, sendo que as temperaturas das soluções devem ser inferiores a 40 °C não podendo causar uma variação superior a 3 °C na zona de mistura.

Assim, a aplicação de tecnologias voltadas para o controle em tempo real de ambientes hidrográficos assume elevado grau de importância na fiscalização e na conservação do meio, além de promover o desenvolvimento sustentável.

No campo da preservação ambiental, as redes em fibra (redes de período longo, LPG – *long period grating* e as redes de Bragg, FBG – *fiber Bragg gratings*) são elementos sensores muito interessantes, pois permitem o uso de diversos transdutores em único enlace óptico possibilitando a monitoração de uma grande área de interesse. As redes em fibra podem ser codificadas em comprimento de onda, sendo que desta forma é possível identificar o local monitorado através da frequência de ressonância da rede. As características intrínsecas da fibra tais como a passividade elétrica, imunidade eletromagnética, tamanho e peso reduzidos e a possibilidade de monitoração remota e em tempo real tornam estes dispositivos ideais para tais aplicações.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

Os atuais sensores à fibra óptica resultaram de dois importantes avanços da ciência realizados na década de 60: o desenvolvimento do laser (1960) e das fibras 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 óptica têm despertado cada vez mais o interesse dos pesquisadores. Os estudos têm se voltado principalmente às novas técnicas de produção e interrogação destes sensores, às suas aplicações e ao desenvolvimento de fibras (conseqüentemente novos sensores) com novas características.

Entre os sensores à fibra existe uma classe especialmente interessante: os sensores intrínsecos. O interesse nestes tipos de sensores é resultante de características como baixa perda por inserção, conservação da integridade da fibra, tamanho e peso reduzidos.

### 1.2.1 Redes de Bragg corroídas

As redes de Bragg são dispositivos bem conhecidos e nos últimos anos muitos trabalhos têm mostrado sua aplicação na área de sensoriamento. As aplicações mais estudadas têm sido para medidas de temperatura, deformações e medidas simultâneas destes dois parâmetros. Técnicas de interrogação alternativas também têm sido estudadas e divulgadas na literatura até o momento (Caucheteur *et al*, 2005, Paterno *et al*, 2006).

Nos últimos anos uma nova característica tem sido estudada: a sensibilidade ao índice de refração do meio externo (Schoroeder *et al*, 2001). Uma das formas para que as FBG tornem-se sensíveis ao índice de refração do meio externo é através da redução do diâmetro da casca da fibra. Desta forma o índice efetivo do modo fundamental passa a ser influenciado pelo índice de refração do meio externo.

Cusano *et al* (2005), mostraram a relação entre o índice de refração efetivo do modo de núcleo e o índice de refração do meio externo para fibras com diversos diâmetros de casca. Como esperado a redução do diâmetro aumenta a sensibilidade da rede a este parâmetro, pois o campo evanescente do modo de núcleo tem uma interação mais forte com o meio externo.

Baseados nesta sensibilidade sensores químicos (Sang *et al*, 2006 e Pereira *et al*, 2004) e bioquímicos (Chryssis *et al*, 2005) têm sido propostos. Chryssis *et al*, (2006) também mostraram que o uso de modos de alta ordem de fibras corroídas com diâmetros iguais ou menores que o do núcleo pode aumentar a sensibilidade de rede em até 6 vezes.

Nos estudos de medidas de índice de refração com sensores a fibra uma especial atenção deve ser dada a variações de temperatura. Devido ao efeito termo-óptico o índice de refração do meio externo irá mudar devido a variações de temperatura. Devido a este fenômeno muitos trabalhos têm estudado medidas simultâneas de temperatura e índice de refração e algumas técnicas têm sido propostas para este tipo de medida. Pereira *et al* (2004) propuseram a utilização de duas redes, uma corroída e outra não corroída, onde apenas a rede corroída apresentou sensibilidade à temperatura e ao índice de refração enquanto a rede não corroída apresentou sensibilidade apenas à temperatura. Técnica semelhante a esta foi estudada por Zhou *et al*, (2006a) e Chen *et al*, (2005), mas a fibra foi corroída em apenas um sentido radial formando uma geometria em D. Neste mesmo trabalho os autores mostraram as características de sensibilidade para redes gravadas em fibras multimodo. Baseados no mesmo princípio Iadicco *et al*, (2006) propuseram uma FBG microestruturada, onde o espectro de reflexão apresenta novas características que podem ser utilizadas para medidas simultâneas. Sang *et al*, (2007) também propuseram uma técnica semelhante utilizando uma FBG parcialmente corroída, onde apenas a região corroída apresentou sensibilidade à temperatura e índice de refração enquanto a parte não corroída apresentou sensibilidade apenas à temperatura.

Recentemente muitos trabalhos envolvendo FBG e medidas de índice de refração têm estudado redes inclinadas. Tanto redes com pequena inclinação (Zhao *et al*, 2006) quanto redes com alta inclinação (Zhou *et al*, 2006b) tem mostrado sensibilidades ao índice de refração do meio externo. Redes com pequena inclinação acoplam luz do modo de núcleo para modos contra-propagantes de casca, o aumento da inclinação da rede fará com que o acoplamento ocorra para modos de radiação e após esta condição o aumento do ângulo ocasionará acoplamento para modos co-propagantes de casca. Redes com alta inclinação podem apresentar sensibilidade ao índice de refração da mesma ordem de magnitude das sensibilidades encontradas nas LPG. Além disso, os modos apresentaram baixa sensibilidade à temperatura o que é uma característica desejada em aplicações de refratometria.

### 1.2.2 O surgimento das redes de período longo

Em 1995 na *Conference on Optical fiber Communication* Vengsarkar *et al* (VENGSARKAR *et al*, 1995) demonstram pela primeira vez um novo dispositivo intrínseco a fibra: as redes de período longo. Este dispositivo consiste de uma modulação periódica do

índice de refração do núcleo da fibra, que atua como uma rede de difração no interior da mesma. A luz que se propaga no modo fundamental de núcleo, ao incidir nesta rede, é difratada e as componentes que satisfazem a condição de casamento de fase são acopladas para modos de casca. Os modos de casca não possuem boas condições de guiamento de forma que a potência óptica acoplada para estes modos é atenuada rapidamente devido a perdas na interface da casca com o meio externo, gerando vales de atenuação no espectro de transmissão. Vengsarkar *et al* (1995) mostraram a potencialidade deste dispositivo como filtros de rejeição de banda para aplicações em comunicações ópticas.

As primeiras LPG foram gravadas utilizando um laser UV e fibras fotossensíveis; sistemas de gravação que utilizam este princípio podem operar em 2 modos: um focalizando o feixe laser ponto-a-ponto na fibra e outro utilizando uma máscara de amplitude. A seguir serão discutidos os principais aspectos destes sistemas que são ilustrados nas figuras 1 (a) e 1 (b).

O sistema, figura 1 (a), é composto por um conjunto de lentes que são utilizadas para se obter o padrão de feixe desejado, podendo expandir ou contrair o feixe dependendo da configuração. Um estágio de translação faz com que o feixe se desloque ao longo de uma máscara de amplitude, que é posicionada logo acima da fibra. A máscara de amplitude consiste de um filme composto de um material que absorve a radiação UV (geralmente um metal) depositado sobre um substrato composto de um material transparente ao UV. O filme possui um padrão de transmitância, podendo ser retangular ou senoidal, que será o mesmo da modulação de índice que forma a rede.

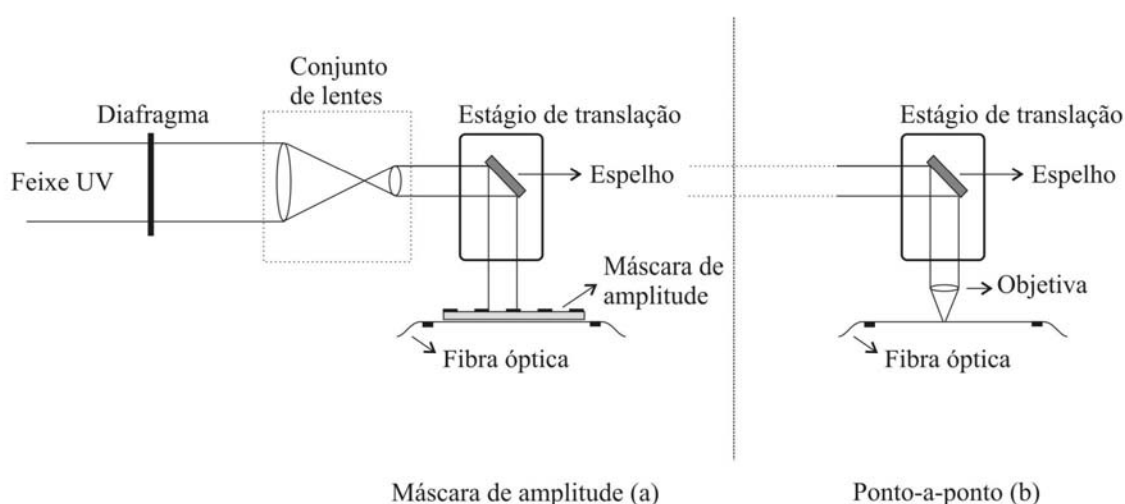


Figura 1 – (a) Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica que faz uso de uma máscara de amplitude. (b) Técnica ponto-a-ponto, ambas fazendo uso da fotossensibilidade da fibra a radiação ultravioleta.

Esta técnica permite a gravação de redes uniformes, pois as máscaras de amplitude podem ser produzidas através de técnicas muito precisas. Além de possibilitar o projeto de características especiais com maior precisão ela permite reprodução de redes idênticas. Uma desvantagem desta técnica é a necessidade de um número variado de máscaras de amplitude para obter redes com diferentes características espectrais e períodos.

No modo ponto-a-ponto, figura 1 (b), insere-se no sistema uma lente objetiva para focalizar o feixe laser sobre uma pequena região da fibra e retira-se a máscara de amplitude. O estágio translador é utilizado para deslocar o feixe laser ao longo da fibra e um diafragma é utilizado para permitir ou não que o feixe laser atinja a fibra. Assim o sistema permite a focalização do feixe em pontos periódicos da fibra, sendo que a periodicidade pode ser escolhida a partir do passo do estágio translador. A vantagem desta configuração é a flexibilidade na escolha do período da rede, mas a uniformidade do período passa a depender da precisão no deslocamento do estágio de translação.

A posição do vale de atenuação apresenta uma dependência com o período da rede; desta forma é possível produzir redes em comprimentos de ondas específicos desde que o sistema de gravação apresente um bom controle da periodicidade da rede. Esta característica levou a utilização das LPG como equalizadores de ganho de amplificadores a fibra dopada com Érbio (VENGSARKAR *et al*, 1.996b e WYSOCKI *et al*, 1.997).

### 1.2.3 Aplicação na área de sensoriamento

Além da dependência da posição do vale de atenuação com o período da rede, variações de temperatura, deformações mecânicas ou de índice de refração do meio externo também ocasionam modificações no comprimento de onda de acoplamento. Bathia e Vengsarkar (1.996) publicaram um trabalho mostrando a potencialidade das LPG no campo de sensores. As LPG foram produzidas utilizando um laser exímero de KrF, operando em 248 nm, e máscaras de amplitude recobertas com cromo possuindo um perfil de transmitância retangular. As redes foram gravadas em cinco tipos de fibras de sílica dopadas com germânio e hidrogenadas, utilizando diferentes períodos. Como elemento sensor de temperatura a rede que apresentou maior sensibilidade foi aquela gravada em uma fibra monomodo operando em 980 nm, sendo o período de 210  $\mu\text{m}$ . O coeficiente de sensibilidade medido para esta rede foi 0,154 nm/°C. A rede gravada em uma fibra padrão da Corning, operando em 1.300 nm, com um período de 320  $\mu\text{m}$  apresentou uma menor sensibilidade, 0,046 nm/°C. A caracterização



destas redes para deformações longitudinais mostrou que a rede gravada na fibra Corning FLEXCOR apresentou o maior coeficiente,  $15,21 \text{ nm}/\mu\epsilon$  ( $1\mu\epsilon$  é igual à deformação de  $1\mu\text{m}$  em uma base de  $1\text{m}$ ) enquanto que o menor coeficiente foi apresentado pela rede gravada em uma fibra padrão com dispersão deslocada,  $-7,27 \text{ nm}/\mu\epsilon$ . Além disto o aumento da deformação ocasiona uma diminuição na intensidade de potência transmitida. Foram realizadas também medidas das sensibilidades quanto ao índice de refração do meio externo. Neste caso as redes foram imersas em óleos com índices de refração dentro do intervalo de 1,404 a 1,452. Para esta situação a rede gravada na fibra padrão da Corning operando em 1.300 nm apresentou um deslocamento máximo de  $-62,4 \text{ nm}$  e a rede gravada em uma fibra convencional da AT&T operando em 1.300 nm apresentou um deslocamento máximo de  $-23,0 \text{ nm}$ .

A sensibilidade ao índice de refração do meio externo chamou a atenção dos pesquisadores, pois esta é uma característica que as redes de Bragg, já conhecidas anteriormente às LPG, não possuem. Patrick *et al* (1997), mostraram que as LPG que têm suas condições de acoplamento satisfeitas para maiores comprimentos de onda, sendo este fato relacionado ao acoplamento para modos de maior ordem, apresentam maiores sensibilidades ao índice de refração externo quando o valor este parâmetro se aproxima do índice de refração da casca. Patrick *et al* (1998), verificaram que a variação de índice na região de 1,00 a 1,44 resulta em um deslocamento do comprimento de onda de ressonância para menores valores, sendo mais pronunciado a partir de 1,40 e para os modos de maior ordem. Entre 1,45 e 1,46 ocorre uma mudança abrupta, o acoplamento para o modo de maior ordem deixa de existir e os espectros de acoplamento para modos de menor ordem apresentam um alargamento. Este fato ocorre porque quando o índice de refração do meio externo se iguala ao valor do índice da casca a região de índice casca-meio deixa de existir e o guia comporta-se com um guia de casca infinita. Para mudanças de índices maiores do que 1,46 o espectro de acoplamento o modo de maior ordem reapareceu e aumentou a eficiência com o aumento do índice; também foi observado um deslocamento do comprimento de onda de ressonância para maiores valores.

Liu *et al*, (1.999) mostraram que as características espectrais da resposta de uma LPG podem ser modificadas introduzindo um deslocamento de fase em um local da rede ou gravando duas redes em série. Eles obtiveram expressões analíticas que descrevem os espectros de transmissão das redes nessas configurações. Seus resultados mostram que com a introdução de um deslocamento de fase na rede é possível dividir o vale de atenuação em dois vales posicionados simetricamente em relação ao vale original, ou ainda tornar o vale mais

plano e largo. Estas características permitiram otimizar o projeto de uma LPG para equalização de ganho de um amplificador a fibra dopada com Érbio. A outra configuração estudada foi a de LPG em série, sendo que esta configuração é obtida gravando duas LPG idênticas na mesa fibra, com uma certa separação entre elas. Além de mostrar uma boa concordância com resultados experimentais, a simulação mostrou que o aumento da distância entre as LPG aumenta o número de vales e diminui sua largura de banda. Para uma distância de 5 centímetros foram observados 9 vales espaçados de 7,9 nm e para um distancia de 19 cm foram observados 17 vales espaçados de 2,9 nm. Eles verificaram ainda que a largura de banda dos vales depende da abertura numérica da fibra. Redes com espectros de transmissão mais estreitos podem proporcionar características mais interessantes para aplicações em sensoriamento, como por exemplo, uma melhor resolução.

Em 1999 Zhang *et al* (1999) gravaram redes em fibras fotossensíveis co-dopadas com boro e germânio, utilizando um laser de argônio com frequência dobrada. Neste experimento foram utilizadas as técnicas ponto-a-ponto e a que faz uso de uma máscara de amplitude. As redes gravadas com a máscara de amplitude apresentaram menor largura de banda, mas foram necessários maiores números de pontos o que tornou essas redes três vezes maiores do que aquelas gravadas com a técnica ponto-a-ponto. Ambas as técnicas produziram redes com eficiência de aproximadamente  $-18$  dB. Eles observaram que variações de  $10 \mu\text{m}$  no período da rede produziram uma diferença de dezenas de nanômetros na posição do comprimento de onda de acoplamento. Foram analisadas também as características de redes gravadas em fibras *hi-bi* (*high birefringence*) e *bow-tie* da *Fibercore*. Os resultados mostraram que para um estado de polarização de  $45^\circ$  são observados quatro vales de atenuação que correspondem à divisão de dois modos de casca em cada um de seus dois estados ortogonais de polarização. O aumento da birrefringência provoca um aumento na separação entre os vales correspondentes aos estados de polarização. Esta característica permite a utilização de LPG como elemento sensor de tensões transversais. Neste trabalho a aplicação de uma carga de 4 kg em uma rede de 3 cm resultou em uma separação entre os vales de 20 nm o que resultou em uma sensibilidade de 500 nm/kg/mm.

Faciai *et al* (FACIAI *et al*, 2001) mostraram que a sensibilidade da LPG ao índice de refração do meio externo possibilita seu uso como sensor de concentração. Eles realizaram medidas para determinar as concentrações de soluções aquosas de cloreto de sódio, cloreto de cálcio e etileno glicol, desde a condição de saturação até a de água destilada. Os resultados mostraram que as resoluções alcançadas,  $-0,004$  nm L/g para o  $\text{CaCl}_2$ ,  $-0,002$  nm L/g para o

NaCl e  $-0,002 \text{ nm L/g}$  para o  $(\text{CH}_2\text{OH})_2$ , são comparáveis ou melhores do que aquelas frequentemente obtidas com o refratômetro Abbe.

A técnica de gravação de LPG utilizando radiação UV em fibras hidrogenadas é a mais utilizada, pois a hidrogenação é um processo que possibilita o aumento da fotossensibilidade da fibra e requer menos recursos financeiros que a aquisição de fibras fotossensíveis. Uma característica indesejável desta técnica é a mudança das características espectrais das redes após o processo de escrita devido à difusão do hidrogênio residual para fora da fibra. Kawano *et al* (2001) analisaram esta técnica do ponto de vista da fotossensibilidade e da estabilidade das características do espectro de transmissão. Eles comparam estas características gravando redes em fibras hidrogenadas e em fibras que após a hidrogenação foram pré-expostas a luz UV. Eles verificaram que a pré-exposição da fibra a luz UV aumenta a fotossensibilidade, sendo este aumento proporcional à densidade de energia. Apesar do comprimento de onda do vale de atenuação apresentar um deslocamento após o processo de gravação, este deslocamento é bem menor do que os verificados em processos de gravação que não passam pela pré-exposição. Redes gravadas por meio da exposição à radiação UV necessitam ser submetidas a um tratamento térmico (recozimento) após o término do processo de gravação para estabilização da estrutura interna da fibra no local onde houve a modulação de índice e conseqüentemente estabilização das características espectrais da rede.

Em muitas aplicações a sensibilidade cruzada das LPG torna-se uma característica indesejada, pois impossibilita a interpretação correta da resposta da rede. Bathia *et al* (1997) mostraram que é possível diminuir a sensibilidade à temperatura ou às deformações mecânicas através da escolha apropriada do modo (modificando o período da rede) para o qual a luz será acoplada. Eles produziram redes com uma sensibilidade térmica de apenas  $-0,0018 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  para uma faixa de temperatura de 25 a 50  $^\circ\text{C}$ . Para isso a rede foi gravada com um período de apenas 40  $\mu\text{m}$ . Redes com sensibilidades a deformações mecânicas de apenas  $-40 \text{ nm}/\epsilon$  foram obtidas gravando uma rede com período de 340  $\mu\text{m}$ .

Han *et al* (2.000) mostraram que também é possível diminuir a sensibilidade térmica através do controle dos elementos dopantes do núcleo da fibra. Em seu trabalho a LPG foi gravada em uma fibra cujo núcleo foi dopado com  $\text{GeO}_2$  e  $\text{B}_2\text{O}_3$ , que possuem coeficientes termo-ópticos com sinais opostos ao do  $\text{SiO}_2$ . A rede gravada nesta fibra apresentou uma sensibilidade de  $0,002 \text{ nm/}^\circ\text{C}$  dentro de uma faixa de operação de  $-30$  a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Recentemente Chen *et al* (2004) utilizaram o mesmo princípio demonstrado por Bathia *et al* (1997) para produzir redes com baixa sensibilidade a ambos os parâmetros:

temperatura e deformações mecânicas. A rede gravada com um período de 440  $\mu\text{m}$  apresentou uma sensibilidade térmica de 0,003  $\text{nm}/^\circ\text{C}$  e uma sensibilidade a deformações mecânicas de 15  $\text{nm}/\varepsilon$ . Estas sensibilidades são 30 vezes e 100 vezes, respectivamente, menores quando comparadas com as sensibilidades de redes convencionais. Esta rede foi caracterizada como sensor de curvaturas e apresentou uma sensibilidade da mesma ordem das redes convencionais para este parâmetro.

Ishaq *et al* (2005) mostraram que a resposta da LPG pode ser modificada pela deposição de um filme com espessura da ordem de 100 nm sobre a casca da fibra. A deposição do filme melhora a resposta da rede a variações de índices de refração do meio externo maiores que o índice de refração da casca, pois modifica os índices efetivos dos modos de casca. Pelo mesmo motivo há também um aumento da sensibilidade da rede a índices menores que o índice da casca. Eles mostraram que para medidas da concentração de etileno glicol e água a sensibilidade aumenta com o aumento da concentração podendo ser o dobro para uma concentração de 100%. Além disso, é possível produzir um filme que tenha seu índice alterado em resposta a uma espécie química, oferecendo um novo sensor químico de alta capacidade.

Uma nova aplicação, mostrada por Tan *et al* (2005) demonstrou o potencial do uso de LPG como sensor de umidade relativa. Em seus estudos a LPG foi recoberta com uma camada de gelatina, que possui a característica de alterar o índice de refração com a umidade relativa. Ao invés de mensurarem o deslocamento em comprimento de onda eles analisaram a variação na eficiência da rede com o aumento da umidade relativa. Os resultados mostraram que o sensor possui alta sensibilidade na região de alta umidade relativa, 90% a 99%, além de alta reprodutibilidade.

O recobrimento das redes com materiais que possuem uma interação específica com o parâmetro de interesse tem sido muito estudado nos últimos anos. Tang *et al* (Tang *et al*, 2006) demonstraram a aplicação de LPG recobertas com colóides de ouro para a detecção de agrupamento de biomoléculas (antígenos e anticorpos). Além de aumentar a sensibilidade da rede ao índice de refração os agrupamentos aderem sobre o colóide de ouro modificando o índice tornando possível a sua detecção. Simietana *et al*, (Simietana *et al*, 2007) mostraram que filmes de carbono também aumentam a sensibilidade ao índice de refração e podem ser utilizados na detecção de concentrações químicas.

Na mais recente conferência internacional na área de sensores a fibra óptica, a *Third European Workshop on Optical Fibre Sensors – EWOFs 2007*, foram apresentados trabalhos onde demonstram a aplicação de LPG acopladas em série na monitoração da cura por

radiação UV de resinas epoxy (Buggy *et al*, 2007). LPG recobertas com PVA (*polyvinyl alcohol*) para a detecção de umidade relativa na região de 33% a 97% (Venugopalan *et al*, 2007).

#### 1.2.4 Redes termo-induzidas

Uma técnica alternativa para gravar LPG sem o uso de radiação UV e fibras fotossensíveis é produzir deformações periódicas na fibra com um laser de CO<sub>2</sub>.

O laser de CO<sub>2</sub> emite em 10,6 μm, sendo que nesta região a sílica possui uma forte absorção óptica. Ao incidir lateralmente na fibra, sob uma tensão longitudinal constante, a luz passa a ser absorvida e transformada em calor. Quando o laser deixa de incidir sobre a fibra o ponto de aquecimento passa por uma alta taxa de resfriamento resultando na alteração de índice de refração. O aquecimento da fibra tensionada provoca também uma alteração no diâmetro da fibra na região onde o laser está focalizado e isto pode contribuir para a alteração do índice de refração (ZHU *et al*, 2003). A figura 2 ilustra um sistema de gravação de LPG que faz uso de um laser de CO<sub>2</sub> (na mesma figura está ilustrado o perfil transversal da alteração de índice ocasionado pela absorção óptica da sílica).

O recozimento do local onde ocorreu a deformação aumenta a eficiência das redes (NARAYANAN *et al*, 1.997). Redes com um período de 610 μm foram gravadas por Narayanan *et al* (1.997), focalizando o feixe de um laser pulsado de CO<sub>2</sub> em uma região de 70 μm de uma fibra nua com dispersão deslocada. Após este processo os pontos onde ocorreram as deformações pelo laser foram recozidos através de um arco elétrico. Este método permitiu a gravação de uma LPG com uma eficiência de -23 dB localizada em 1.536 nm, sendo necessários apenas 10 pontos de interação produzindo um dispositivo de 6 mm de comprimento. A sensibilidade térmica desta rede foi de 0,068 nm/°C e a sensibilidade a deformação foi -1,2 nm/με; além disso a rede apresentou uma sensibilidade à polarização da luz incidente: o máximo deslocamento devido a essa sensibilidade foi 1,6 nm e a alteração na eficiência foi 0,1 dB.

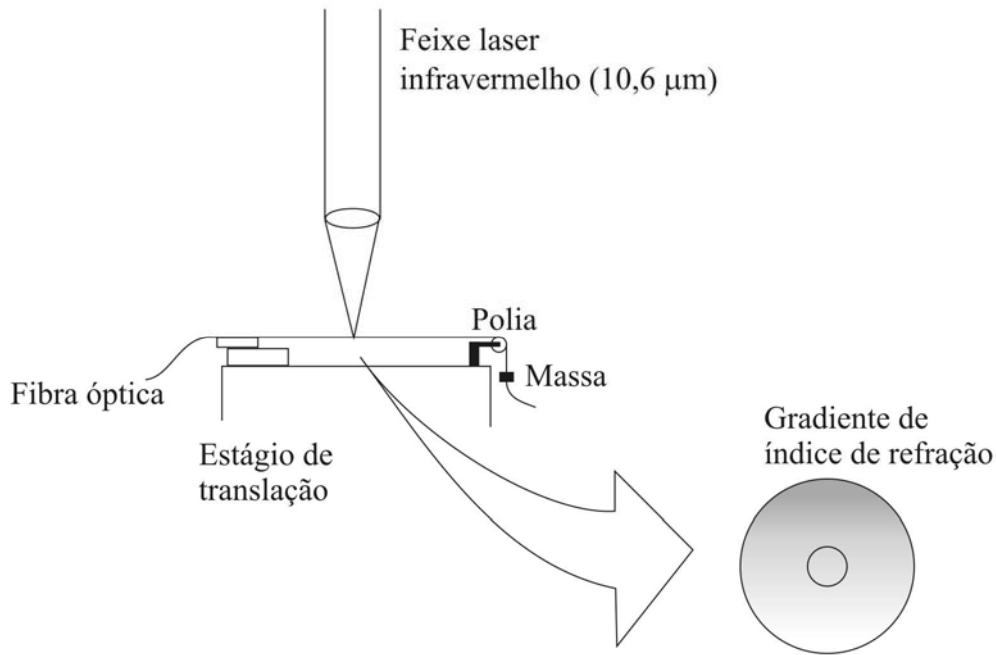


Figura 2 – Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica ponto-a-ponto utilizando um laser de CO<sub>2</sub>. O destaque na figura ilustra a alteração gradual do índice de refração da fibra causada pela absorção da radiação.

Davis *et al* (1.998a) analisaram as relações entre a sensibilidade de fibras hidrogenadas com a densidade de energia incidente durante a gravação e o número de pontos de interação, na técnica que utiliza o laser de CO<sub>2</sub>. Para a produção das redes foram utilizadas fibras com dispersão deslocada hidrogenadas e não hidrogenadas e um feixe laser com potência de 0,5 W focalizado em uma região da fibra de 140 μm de diâmetro. O período das redes foi 480 μm e a duração dos pulsos foi 300 ms para as fibras não hidrogenadas e 200 ms para as fibras hidrogenadas. Apesar da utilização de pulsos com menor duração temporal nas fibras hidrogenadas, o número de pontos necessários para formar a rede foi menor (20 pontos) do que o necessário para formar a rede nas fibras não hidrogenadas (40 pontos), o que sugere que a hidrogenação, apesar de não ser necessária, aumenta a sensibilidade da fibra. Utilizando uma técnica conhecida como interferometria transversa foram analisados os perfis de índice de refração das fibras na região onde a rede foi gravada. Para as fibras não hidrogenadas o índice na casca aumenta 0,02 % no lado em que o feixe laser incidiu. A alteração do índice de refração apenas no lado em que o laser incidiu indica que absorção da sílica em 10,6 μm resulta na conversão de toda a energia em calor nos primeiros 20 μm do vidro.

A eficiência das redes produzidas através da técnica que utiliza um laser de CO<sub>2</sub>, apresentou uma dependência com a potência do laser de gravação dentro dos limites de -0,1 a -1,0 dB/mJ além de uma relação linear com o número de períodos. Estas características foram

observadas por Davis *et al*, (1.998b) durante a gravação de redes com 480  $\mu\text{m}$  de período e 40 pontos de interação. A rede gravada utilizando pulsos com 0,4 W de potência e 270 ms de duração apresentou um vale de ressonância com uma eficiência de  $-23,9$  dB localizado em 1.538 nm ao término dos 40 pontos. Quando a duração do pulso do laser passou de 270 para 290 ms o vale de ressonância aumentou sua eficiência até um máximo e em seguida com o aumento do número de pontos foi observada a diminuição de sua eficiência até se extinguir, quando então surge outro vale de ressonância em 1.490 nm com eficiência de  $-20$  dB. Eles verificaram também uma dependência com a polarização da luz incidente na rede, cerca de 1,7 dB, pequena quando comparada com a eficiência da rede  $-23,9$  dB.

Uma forma alternativa de produzir redes termo-induzidas é a aplicação periódica de arcos elétricos ao longo da fibra, esta técnica foi mostrada por Kosinski e Vengsarkar (1.998). Esta técnica faz uso do processo de aquecimento e resfriamento em pontos periódicos da fibra para formar a rede. Durante o processo de aplicação do arco a taxa de resfriamento da fibra na região de aquecimento é superior a  $1000$   $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  (REGO *et al*, 2001). 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.

A figura 3 ilustra um sistema de gravação de LPG que faz uso de uma máquina de emendas de fibra ópticas para gerar o arco elétrico. Neste sistema a fibra sem a capa é colocada entre os eletrodos de uma máquina de emendas, uma das extremidades é fixada a um estágio translador e a outra extremidade passa por uma polia e uma massa é presa à fibra. A massa submete a fibra a uma tensão longitudinal constante durante todo o processo de gravação. A LPG é produzida ponto-a-ponto mediante a aplicação de um arco elétrico na fibra que em seguida é deslocada, pelo estágio translador, uma distância que corresponde ao período da rede.

Uma das características mais interessantes e que foram muito exploradas nas redes termo-induzidas é a estabilidade térmica. Godbout *et al* (1.998), gravaram redes em fibras padrão de telecomunicações da Corning utilizando a técnica do arco elétrico. As caracterizações térmicas destas redes mostraram que elas não apresentaram degradação até uma temperatura de  $500$   $^{\circ}\text{C}$ . Após o resfriamento a rede apresentava o mesmo comprimento de onda de ressonância e uma diminuição de 2 dB na atenuação. Esta última característica foi atribuída à difusão de dopantes para o núcleo. A sensibilidade térmica foi menor do que  $0,23$   $\text{nm}/^{\circ}\text{C}$ . Godbout *et al* não atribuíram a formação da rede às mesmas razões de Kosinski e Vengsarkar (1.998). Ao microscópio não foram observadas deformações no núcleo ou na casca em redes com boa eficiência; utilizando uma técnica de campo próximo refratado foi

possível mostrar que não havia difusão de dopantes do núcleo e também que diferença de índice entre núcleo e casca não variava mais do que  $5 \times 10^{-4}$ . Para tentar explicar a formação da rede, Godbout *et al* postularam que ocorre um aumento na absorção de radiação no infravermelho apenas no núcleo, o que produziria uma mudança de índice negativa no núcleo.

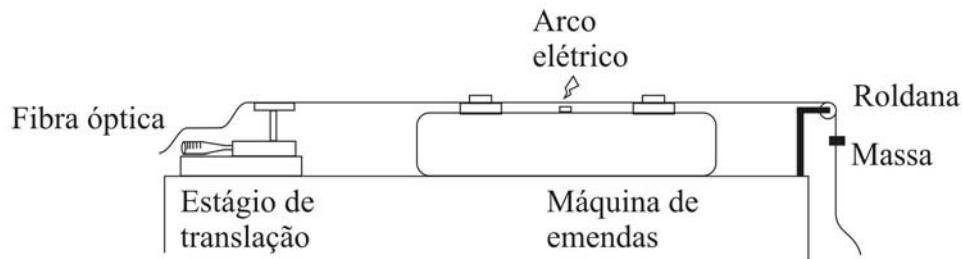


Figura 3 – Sistema de gravação de LPG utilizando a técnica ponto-a-ponto empregando um arco elétrico proveniente de uma máquina de emendas de fibras ópticas.

Em 2002 Humbert e Malki (2.002) também realizaram caracterizações térmicas de redes gravadas em fibras da Corning por meio da aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico. A primeira caracterização foi realizada aquecendo a rede de 30 a 160 °C. A variação em comprimento de onda foi quase linear com coeficientes angulares 58, 59 e 70 pm/°C para os modos LP<sub>02</sub>, LP<sub>03</sub> e LP<sub>04</sub> respectivamente. Em seguida a LPG passou por três processos de recozimento a diferentes temperaturas (200, 400 e 600 °C) durante 1 hora cada um. Nenhuma degradação ou deslocamento em comprimento de onda foi observado, indicando boa estabilidade da rede a estas temperaturas. Uma outra rede foi caracterizada aquecendo-a até uma temperatura de 1.200 °C. Durante esta caracterização foi observado que quando a temperatura se aproxima de 800 °C o deslocamento em comprimento de onda começa a diminuir e após 900 °C volta a aumentar. A região abaixo de 800 °C possui um coeficiente angular que varia de 78 pm/°C a 110 pm/°C. Para temperaturas acima de 880 °C o coeficiente angular é 350 pm/°C. A região entre 800 °C e 880 °C possui uma inclinação pequena e os autores a denominam de região plana. Eles acreditam que este comportamento é devido à expansão térmica que a partir desta temperatura passa ter um efeito significativo. A rede foi submetida a dois recozimentos de 6 horas à temperatura de 750 °C para verificar o comportamento da rede nesta faixa de temperatura. Após o primeiro recozimento o modo LP<sub>04</sub> sofreu um deslocamento de 4 nm para menores valores de comprimento de onda e após o segundo recozimento o comprimento de onda se desloca 6 nm em direção a maiores valores. A análise temporal desses deslocamentos mostrou que eles evoluem para um valor de mínimo que é atribuído ao aumento do índice de refração da casca. Em seguida o comprimento de



onda cresce e tende a um valor final. Este comportamento foi atribuído à diminuição das tensões internas na fibra que são formadas durante o processo de fabricação da fibra. Estes resultados indicam que a relaxação das tensões internas não é a principal causa da formação da rede, pois durante o recozimento de 6 horas a 750 °C a rede não sofreu degradação.

### 1.2.5 Redes induzidas mecanicamente

Além das técnicas de gravação que utilizam o arco elétrico ou lasers UV e de CO<sub>2</sub>, existe outra técnica que produz LPG a partir da modulação de índice causada pela deformação mecânica em pontos periódicos da fibra. Esta deformação pode ser obtida através da corrosão da casca em regiões periódicas utilizando HF (LIN e WANG, 1999). As regiões da fibra que sofrem a corrosão possuem um raio menor do que as regiões que não sofreram exposição ao ácido, figura 4. Assim quando estas fibras passam pela ação de uma força externa as regiões de menor raio sofrem uma menor deformação, pois esta é inversamente proporcional ao raio da fibra. Lin e Wang (1999) produziram LPG por meio desta técnica recobrimo a fibra com finas camadas de metal em forma de anéis com espessura de aproximadamente 120 nm distantes 400 μm umas das outras. As regiões da fibra expostas ao ácido sofrem a corrosão pelo HF até atingir um diâmetro de aproximadamente 42 μm ( $r_c$ ), sendo 125 μm ( $r_n$ ) o diâmetro da fibra nas regiões não atacadas.

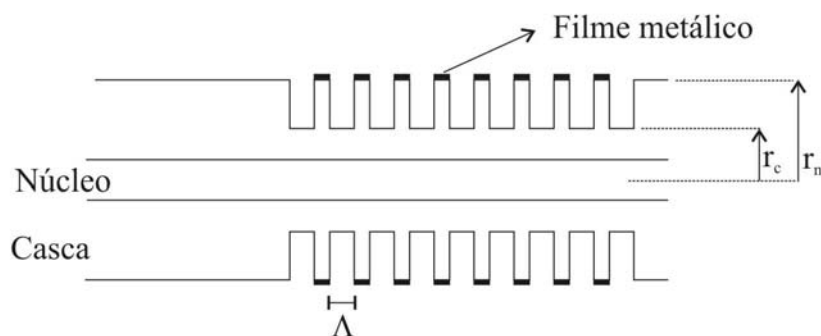


Figura 4 – Ilustração do perfil longitudinal de uma fibra óptica na região onde uma LPG foi gravada por meio da corrosão da casca pelo ácido HCl.

A rede gravada apresentou uma perda menor do que -1,2 dB quando nenhuma deformação é aplicada a fibra e uma perda maior do que -29 dB para uma deformação de aproximadamente 0,58 με. Esta rede apresentou uma característica nova quando comparada

com as redes produzidas pelas técnicas já descritas: a sintonia da eficiência através da deformação aplicada. O deslocamento do comprimento de onda de ressonância, para a deformação mencionada foi menor do que 2,2 nm.

Apesar da nova característica da sintonia da eficiência, as redes gravadas pela técnica mostrada por Liu e Wang (1.999) apresentam a desvantagem de uma fragilização da fibra devido à corrosão da casca. Recentemente Rego *et al* (2003), desenvolveram um sistema para induzir mecanicamente LPG sem a necessidade de danificar a fibra. Seu sistema consistia de posicionar a fibra sobre um tubo metálico com ranhuras em V perpendiculares à direção do comprimento da fibra. Em seguida um fio de nylon circundava o tubo e a fibra na mesma posição das ranhuras, quando uma tensão é aplicada ao fio este pressiona a fibra contra as ranhuras causando uma deformação mecânica naquele ponto, figura 5.

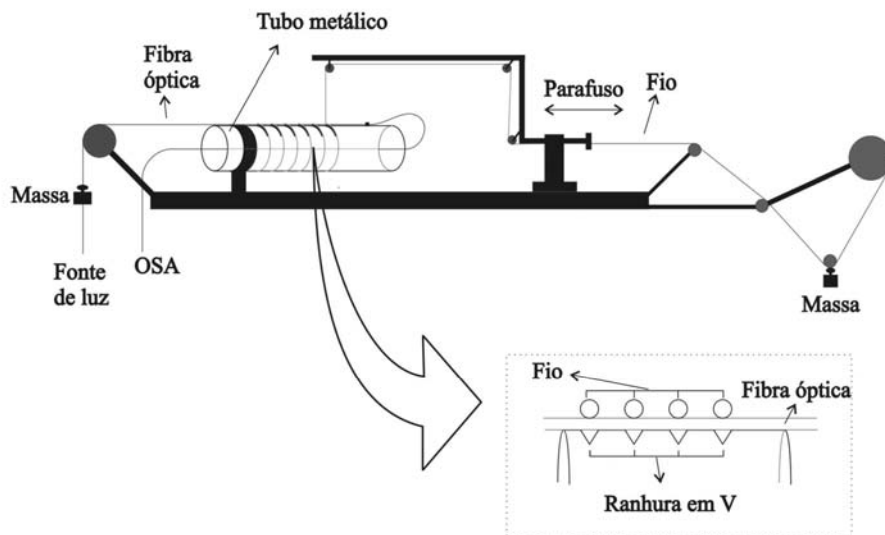


Figura 5 – Produção de LPG utilizando um fio de nylon e ranhuras sobre um tubo metálico para induzir mecanicamente LPG. O detalhe ampliado na figura representa a seção transversal do tubo paralela à fibra.

Esta montagem proporciona a flexibilidade de diversos parâmetros, permitindo o estudo de suas influências na formação da rede. Para uma rede, formada em uma fibra com o revestimento de proteção (capa), foi verificado que a eficiência da rede aumenta quase linearmente com o aumento do número de voltas do fio de nylon (o número de voltas representa o número de pontos que forma a rede) a uma taxa de 0,08 dB/volta. A posição do comprimento de onda de ressonância pode ser ajustada modificando a distância entre as ranhuras. O aumento da tensão no fio de nylon ou do diâmetro do fio ou da profundidade das ranhuras em V provocam um aumento na eficiência da rede, que chegou a aproximadamente

-12 dB. A rede foi caracterizada quanto às deformações longitudinais e a sensibilidade alcançada foi de  $-0,62 \text{ pm}/\mu\epsilon$ . A sensibilidade térmica também foi determinada, sendo  $0,05 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Foram analisadas as características quando o fio de nylon é substituído por um fio de cobre sendo que nesta situação a sensibilidade térmica da rede aumentou para  $0,07 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Uma superfície plana foi colocada sobre o fio de nylon para a caracterização da rede como sensor de carga, resultando numa sensibilidade de  $20 \text{ dB/kg}$ . Redes produzidas por meio desta técnica possuem um excelente controle sobre a eficiência, além da manutenção da integridade da fibra e de ser um processo reversível.

### 1.3 OBJETIVOS

Na primeira etapa deste trabalho será estudado o processo de gravação das LPG analisando a influência dos principais parâmetros do processo, de modo a compreender como estes influenciam as características espectrais. A técnica empregada será a aplicação ponto-a-ponto de um arco elétrico. Os parâmetros a serem estudados são a tensão sobre a fibra durante o processo de escrita, o número de arcos aplicados a cada ponto e reprodutibilidade do processo.

Na segunda etapa do trabalho serão estudadas as sensibilidades da rede aos parâmetros índice de refração do meio externo, temperatura e deformação longitudinal. Ainda nesta etapa serão analisadas as sensibilidades cruzadas entre estes parâmetros.

A terceira etapa consiste em analisar o desempenho das LPG quando caracterizadas como elementos sensores para a detecção de hidrocarbonetos derivados de petróleo. Nesta etapa serão realizadas caracterizações em ambientes hídricos com amostras de hidrocarbonetos comerciais no estado líquido, simulando uma situação de vazamento do produto em rios, no mar ou mangues. Outra forma que um vazamento pode ser detectado é a presença do vapor do combustível em uma atmosfera fechada, por exemplo, na região entre as camadas de um tanque de armazenamento subterrâneo. A LPG também será caracterizada para detecção da presença de vapor de combustíveis comerciais em uma atmosfera fechada. Ainda na etapa de caracterização serão realizadas caracterizações para distinguir os estados de oxidação do cromo (+3 e +6) em soluções aquosas em pequenas concentrações.

Por fim um segundo tipo de sensor também será estudado, as redes de Bragg com a casca corroída. Neste estudo serão analisadas as sensibilidades ao índice de refração e a temperatura em função do diâmetro da casca da fibra.

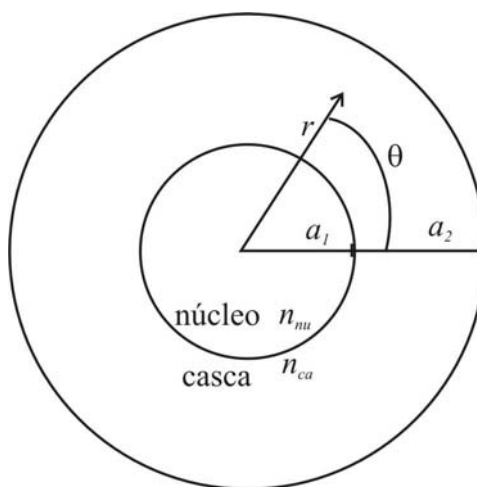


## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS EM FIBRAS ÓPTICAS

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 um guia de onda cilíndrico (serão apresentadas as principais equações, um desenvolvimento detalhado pode ser encontrado no Apêndice A.). É considerada uma fibra com núcleo de raio  $a_1$  e índice de refração  $n_{nu}$  e com casca de raio  $a_2$  e índice de refração  $n_{ca}$ , cuja seção transversal é mostrada na Figura 6.



meio externo

Figura 6: Geometria da fibra de índice degrau usada no estudo dos modos de propagação.

A equação de propagação para ondas eletromagnéticas em um meio dielétrico pode ser separada em duas componentes uma com dependência temporal e outra com dependência espacial:

$$T(t) = T_0 e^{-i\omega t} \quad (1)$$

O termo de dependência espacial deve ser escrito em coordenadas cilíndricas devido à simetria da fibra. Assim temos:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{X}(\bar{r})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{X}(\bar{r})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{X}(\bar{r})}{\partial z^2} + k^2 = 0 \quad (2)$$

Esta equação pode novamente ser separada em termos das variáveis  $r$ ,  $\theta$  e  $z$ , resultando em:

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = -\beta^2 Z(z) \quad (3)$$

$$\frac{d^2 \Theta(\theta)}{d\theta^2} - \delta_2 \Theta(\theta) = 0 \quad (4)$$

$$r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr} + [(k^2 - \beta^2)r^2 - l^2] R(r) = 0 \quad (5)$$

As equações (1) e (3) descrevem a propagação do campo no tempo ao longo do eixo da fibra. Esta propagação é da forma:

$$E(z, t) = e^{-i(\omega t + \beta z)} \quad (6)$$

A distribuição azimutal do campo ao longo da seção transversal é dada pela solução da equação (4):

$$\Theta(\theta) = \Theta_0 \begin{cases} \text{sen } l\theta \\ \text{cos } l\theta \end{cases} \quad (7)$$

onde  $l$  é um inteiro positivo ou negativo.

A distribuição radial do campo, segundo a equação (5), é descrita pelas funções de Bessel na região do núcleo e pelas funções modificadas de Bessel na região da casca, para que as soluções satisfaçam as condições de contorno.

Para o caso de fibras óticas, onde a diferença de índice de refração entre núcleo e casca é pequena ( $\ll 1$ ), 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.

## 2.2 REDES EM FIBRAS ÓTICAS

As redes em fibra são uma modulação periódica do índice de refração do núcleo e/ou da casca de uma fibra ótica. Esta modulação atua como uma rede de difração para a luz guiada no núcleo da fibra (EDORGAN, 1.997). Esta difração pode ser descrita por:

$$n \sin \theta_1 = n \sin \theta_2 + m \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (8)$$

onde:

- $\theta_1$  e  $\theta_2$  são o ângulo de incidência da luz e o ângulo da luz difratada, respectivamente,
- $n$  é o índice de refração do meio e  $\Lambda$  o período da rede,  $\lambda$  é o comprimento de onda no qual ocorre a difração e  $m$  é um número inteiro que representa a ordem da difração.

Sendo  $\beta_i = (2\pi / \lambda) n_{ef\_i}$  a constante de propagação do  $i$ -ésimo modo e  $n_{ef\_i} = n \sin \theta_i$  o índice de refração efetivo do  $i$ -ésimo modo, temos:

$$\beta_1 = \beta_2 + m \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (9)$$

Na equação (9)  $\beta_1$  é a constante de propagação do modo incidente,  $\beta_2$  é a constante de propagação do modo para o qual a luz é acoplada e o segundo termo do lado direito da equação representa o vetor da rede. As figuras 7 e 8 ilustram o acoplamento em dois casos distintos e a relação entre o período da rede e as constantes de propagação dos modos envolvidos. Nestas figuras  $\Delta\lambda$  representa a largura de banda da fonte ótica.

A figura 7 ilustra o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo propagante e contra-propagante. Este tipo de acoplamento resulta na reflexão de uma estreita banda da potência ótica incidente que satisfaz a condição de casamento de fase da rede, equação (9). Os valores positivos e negativos no eixo  $\beta/2\pi$  representam as direções de propagação. Neste

acoplamento o vetor da rede é maior do que no caso onde o acoplamento ocorre para modos co-propagantes (que será discutido mais adiante) e conseqüentemente o período da rede é menor. O acoplamento ilustrado na figura 7 ocorre tipicamente em redes de Bragg, cujo período é submicrométrico.

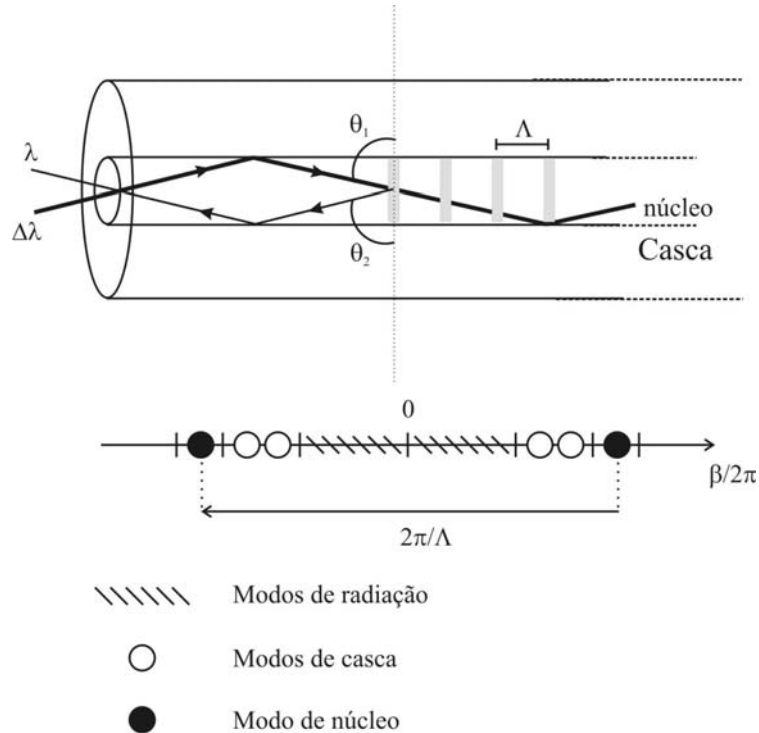


Figura 7. Diagrama ilustrativo representando o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo propagante e contra propagante. Neste diagrama é ilustrada a relação entre o período da rede e o modo para o qual a luz é acoplada.

Para as redes de Bragg a condição de casamento de fase, equação (9), resulta em acoplamentos em comprimentos de onda ( $\lambda_B$ , comprimento de onda de Bragg) dados por:

$$\lambda_B = 2n_{ef\_nu}\Lambda \quad (10)$$

onde  $n_{ef\_nu}$  é o índice de refração efetivo do modo de núcleo e  $\Lambda$  é o período da rede.

A equação (10) mostra a dependência do comprimento de onda com o índice de refração efetivo do modo de núcleo com o período da rede. Mudanças de temperatura modificam estes dois parâmetros e um deslocamento no comprimento de onda de Bragg é esperado. Portanto a sensibilidade térmica é devido a dois efeitos: a expansão térmica e o efeito termo-óptico da sílica. Estes efeitos são representados no deslocamento do comprimento de onda como:



$$\Delta\lambda_T = \lambda_B \left( \frac{1}{n_{ef\_nu}} \frac{\Delta n_{ef\_nu}}{\Delta T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} \right) = \lambda_B (\alpha + \xi) \Delta T \quad (11)$$

onde  $\alpha$  e  $\xi$  são os coeficientes de expansão térmica e termo-óptico, respectivamente. Para a sílica, os valores de  $\alpha$  e  $\xi$  são da ordem de  $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  e  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , respectivamente; a contribuição devido a  $\xi$  pode ser desprezada quando não há grandes variações de temperatura.

As FBG não são intrinsecamente sensíveis ao índice de refração do meio externo, pois a potência óptica está confinada no interior da fibra próxima ao núcleo. Esta sensibilidade pode ser obtida reduzindo-se o diâmetro da casca da fibra até um valor no qual o campo evanescente passe a interagir com o meio externo. Quanto menor for o diâmetro da casca da fibra maior será a interação entre o campo evanescente e o meio e conseqüentemente maior a sensibilidade a este parâmetro. Trabalhos (Cusano *et al*, 2005) recentes tem demonstrado que diâmetros inferiores a 20  $\mu\text{m}$  apresentam tal sensibilidade.

Os deslocamentos no comprimento de onda de ressonância devido à variação do índice de refração do meio externo em FBG com o diâmetro da casca reduzidos são dados por:

$$\Delta\lambda_T = 2\Lambda\Delta\eta_p\Delta n_{ex} \quad (12)$$

onde  $\Lambda$  é o período da rede,  $\eta_p$  é a fração da potência óptica total do modo não perturbado que flui na região corroída e  $\Delta n_{ex}$  é a variação do índice de refração do meio externo.

Os índices de refração dos meios materiais mudam com a temperatura devido ao efeito termo-óptico. Portanto em FBG corroídas o deslocamento do comprimento de onda devido às mudanças na temperatura pode ser representado por:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_T + \Delta\lambda_n \quad (13)$$

onde  $\Delta\lambda_T$  representa a contribuição dada pela equação (11) e  $\Delta\lambda_n$  representa a contribuição dada pela equação (12).

A figura 8 ilustra o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo e um modo co-propagante de casca. Em fibras típicas com diâmetro de 125  $\mu\text{m}$  existem centenas de modos de casca possíveis (EDORGAN, 1997) em comprimentos de onda na região do infravermelho.

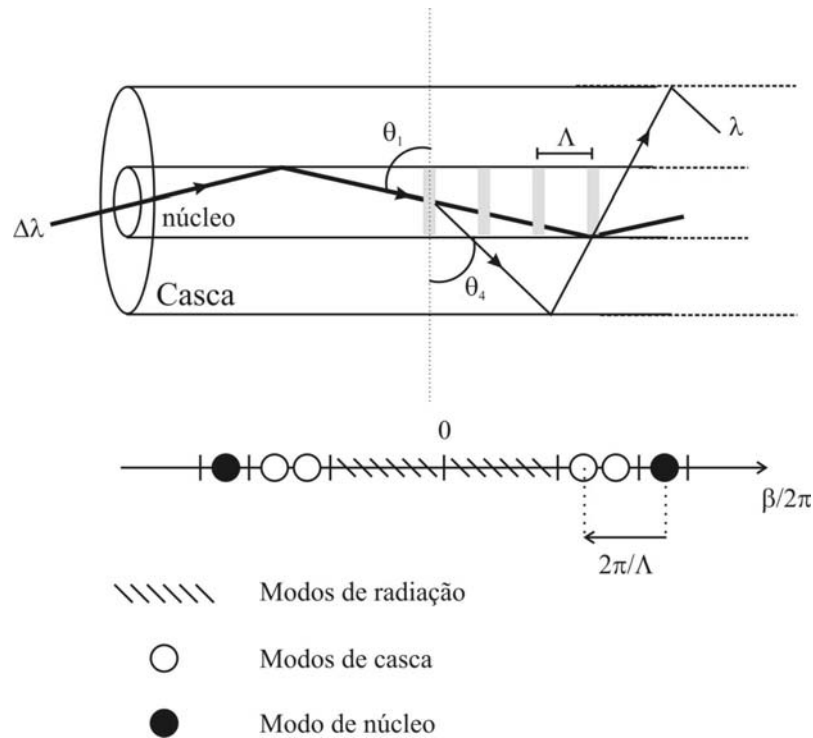


Figura 8. Diagrama representando o acoplamento entre o modo fundamental de núcleo e um modo de casca co-propagante. Neste diagrama é ilustrada a relação entre o período da rede e os modos acoplados.

Para o caso de redes de período longo, onde o acoplamento ocorre para modos co-propagantes de casca, a primeira ordem de difração é dominante e tem-se que  $m = -1$ . Assim podemos escrever a equação (9) como:

$$\lambda^n = (n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^m) \Lambda \quad (14)$$

onde:

- $\lambda^n$  é o comprimento de onda de ressonância do  $n$ -ésimo modo de casca,
- $n_{ef\_ca}^n$  é o índice de refração efetivo do  $n$ -ésimo modo de casca,
- $n_{ef\_nu}$  é o índice de refração efetivo do modo de núcleo.

Nesta equação pode-se observar a dependência do comprimento de onda de ressonância com o período e os índices de refração efetivos dos modos de núcleo e de casca. Mudanças nestes parâmetros resultam em um deslocamento no comprimento de onda de ressonância. A potência óptica acoplada para modos de casca decai rapidamente devido a espalhamentos na interface casca/meio externo. Este decaimento gera vales discretos de atenuação no espectro de transmissão. Como a potência óptica pode ser acoplada para mais de

um modo, o espectro de transmissão de uma rede de período longo pode conter mais de um vale de atenuação.

A eficiência do acoplamento pode ser expressa em termos da transmissão (STARODUBOV *et al*, 1.998),  $t$ , da potência óptica no núcleo no comprimento de onda dado pela equação (14):

$$t = \cos^2\left(\frac{Dx}{2}\right) \quad (15)$$

onde  $x$  é o comprimento da rede e  $D$  é o coeficiente de acoplamento.

A equação (15) mostra que com o aumento do comprimento da rede a intensidade de luz no núcleo da fibra varia periodicamente. Para comprimentos da rede múltiplos de  $\pi/D$  o acoplamento atinge seu valor máximo e para múltiplos de  $\pi/2D$  o acoplamento atinge seu valor mínimo (transmitância máxima).

O coeficiente de acoplamento e o comprimento da rede também modificam outro parâmetro da rede, a largura de banda ( $\Delta\lambda_{FWHM}$ ) (Kashyap, 1999):

$$\Delta\lambda_{FWHM} = \frac{(\lambda^n)^2}{(n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n)x} \sqrt{\frac{4D}{\pi}} x \quad (16)$$

A dependência do comprimento de onda de ressonância com o índice de refração efetivos dos modos de casca é o principal fator que possibilita a utilização das LPG como elemento transdutor para sensoriamento de deformações mecânicas, variações de temperatura e de índice de refração do meio externo (BATHIA e VENGSARKAR, 1996). Mudanças nestes parâmetros provocam uma alteração no índice de refração efetivo do modo de casca e conseqüentemente um deslocamento no comprimento de onda de ressonância.

O deslocamento do comprimento de onda de ressonância devido a variações de temperatura e de deformações mecânicas pode ser expresso como (QUIN *et al*, 2000):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda^n}{\lambda^n} = & \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} + \frac{1}{(n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n)} \frac{\Delta(n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n)}{\Delta T} \right] \Delta T \\ & + \left[ \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta \varepsilon} + \frac{1}{n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n} \frac{\Delta(n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n)}{\Delta \varepsilon} \right] \Delta \varepsilon \end{aligned} \quad (17)$$

fazendo  $\frac{\Delta\Lambda}{\Lambda} = \Delta\varepsilon$  podemos simplificar a equação (17) como:

$$\frac{\Delta\lambda^n}{\lambda^n} = (\alpha + \xi)\Delta T + (1 + p)\Delta\varepsilon \quad (18)$$

onde

$$\alpha \equiv \left( \frac{1}{\Lambda} \frac{\Delta\Lambda}{\Delta T} \right) \quad (19)$$

é o coeficiente de expansão térmica,

$$\xi \equiv \left[ \frac{1}{n_{ef\_nu}^n - n_{ef\_ca}^n} \frac{\Delta(n_{ef\_nu}^n - n_{ef\_ca}^n)}{\Delta T} \right] \quad (20)$$

é o coeficiente termo-óptico, e

$$p \equiv \left[ \frac{1}{n_{ef\_nu}^n - n_{ef\_ca}^n} \frac{\Delta(n_{ef\_nu}^n - n_{ef\_ca}^n)}{\Delta\varepsilon} \right] \quad (21)$$

é o coeficiente fotoelástico. O coeficiente de expansão térmica é da ordem de  $10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (TAKAHASHI *et al*, 1996), enquanto que o coeficiente termo-óptico, para fibras de sílica, geralmente é da ordem de  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (QUIN *et al*, 2000). Portanto a sensibilidade térmica das LPG depende principalmente do efeito termo-óptico. Pelas equações (20) e (21) é possível verificar que tanto o coeficiente termo-óptico quanto o coeficiente fotoelástico dependem da ordem do acoplamento.

As respostas das LPG a variações do índice de refração do meio externo foram estudadas por Chiang *et al* (2000). Eles mostraram que os deslocamentos do comprimento de onda central podem ser descritos por:

$$\delta\lambda_0 \approx \frac{u_\infty^2 (\lambda^n)^2 \Lambda}{8\pi^3 n_{ca} r^3} \left[ \frac{1}{(n_{ca}^2 - n_{ex0}^2)^{1/2}} - \frac{1}{(n_{ca}^2 - n_{ex}^2)^{1/2}} \right] \quad (22)$$

onde  $u_\infty$  é uma das raízes da função de Bessel de primeira espécie,  $n_{ex0}$  é o índice de refração do meio no qual a LPG está inicialmente inserida e  $n_{ex}$  é o índice de refração do segundo meio, com o qual a rede entra em contato e que causa o deslocamento. O segundo termo da equação (22) mostra que a sensibilidade da rede ao índice de refração do meio externo aumenta de forma significativa quando o índice de refração do meio externo se aproxima do índice de refração da casca da fibra.

A sensibilidade ao índice de refração ( $S$ ) pode ser obtida a partir da derivada da equação (22):

$$S = \frac{d\lambda}{dn_{ex}} = -\frac{u_\infty^2 \lambda_0^3 A}{8\pi^3 n_{cl} \rho^3} \left[ \frac{n_{ex}}{(n_{cl}^2 - n_{ex}^2)^{3/2}} \right] \quad (23)$$

onde todos os parâmetros foram definidos anteriormente.

Quando o meio externo possui índice de refração próximo ao índice de refração da casca a sensibilidade à temperatura não pode ser descrita apenas pelo primeiro termo do lado direito da equação (18). He *et al* (2.002) mostraram que nestas condições que a variação do índice de refração do meio devido à variação de temperatura (efeito termo-óptico) provoca um efeito não-linear no deslocamento do comprimento de onda de ressonância que pode ser descrito por:

$$\frac{\Delta\lambda^n}{\lambda^n} = (\alpha + \xi)\Delta T + \frac{\gamma}{\lambda^n} \Delta T \quad (24)$$

onde

$$\begin{aligned} \gamma \equiv & -\frac{u_\infty^2 (\lambda^n)^3 n_{ex} \Lambda \alpha_{ex}}{8\pi^3 r^3} \times \left\{ (n_{ca}^2 - n_{ex}^2)^3 \left[ (n_{nu}^2 - n_{ca}^2) \times \left( \frac{a_1}{r} \right)^2 \left( \frac{J_0^2(u_\infty a_1 / r) + J_1^2(u_\infty a_1 / r)}{J_0^2(u_\infty) + J_1^2(u_\infty)} \right) \right. \right. \\ & \left. \left. + n_{ca}^2 - \frac{u_\infty^2 (\lambda^n)^2}{4\pi^2 r^2} \right] + \frac{u_\infty^2 (\lambda^n)^3}{4\pi^3 r^3} (n_{ca}^2 - n_{ex}^2)^{5/2} \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (25)$$

onde  $\alpha_{ex}$  é o coeficiente termo-óptico do meio no qual a rede está inserida,  $J_0$  e  $J_1$  são as funções de Bessel de primeiro tipo de ordem zero e de primeira ordem, respectivamente e os outros parâmetros foram definidos anteriormente.

A resposta espectral de uma LPG pode ser influenciada por diversos parâmetros. Desta forma a medida de cada parâmetro deve ser realizada com dois sensores ou numa configuração em que forneçam diferentes respostas a cada parâmetro ou então pelo menos um dos sensores sofra influência de apenas um parâmetro (OTHONO e KALLI, 1999).

O espectro de transmissão característico de uma LPG pode ser visto na figura 9. Neste espectro podem ser vistos 3 vales de atenuação que correspondem ao acoplamento entre o modo fundamental de núcleo  $LP_{01}$  e os modos de casca  $LP_{02}$ ,  $LP_{03}$  e  $LP_{04}$ . Este espectro foi obtido a partir de uma simulação numérica utilizando o *software* comercial IFOgratings. A rede simulada possui um período de  $600\ \mu\text{m}$ , 45 pontos gravados, modulação de índice de refração igual a  $4 \times 10^{-4}$  e o perfil de modulação de índice utilizado foi o retangular. A largura espectral e a eficiência estão relacionadas ao modo de casca para o qual a potência óptica é acoplada. Para os modos de maior ordem o campo eletromagnético transversal apresenta uma distribuição radial mais próxima à interface casca-meio; desta forma estes modos apresentam maior interação com o meio externo e conseqüentemente maior sensibilidade a suas alterações.

Outros parâmetros que influenciam as características espectrais das LPG são a uniformidade do período da rede e a amplitude da modulação de índice. A não uniformidade na periodicidade da rede provoca um alargamento espectral enquanto que uma maior modulação de índice provoca um aumento na eficiência da LPG.

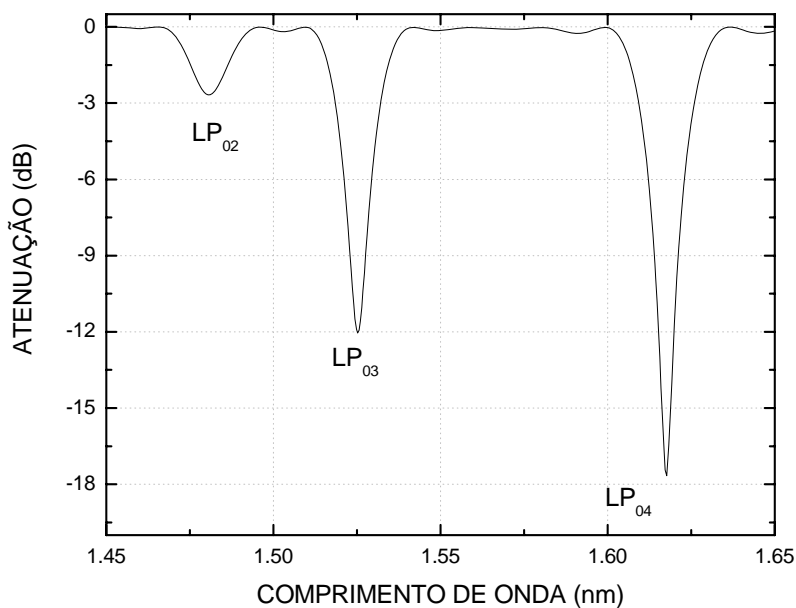


Figura 9 – Espectro de transmissão característico de uma LPG simulado no *software* IFOgratings (Optiwave Corporation).

O comprimento de onda no qual o acoplamento acontece pode ser escolhido a partir de um período previamente determinado, mas a largura e a forma do vale de atenuação são parâmetros que não podem ser controlados efetivamente durante o processo de gravação.

Duas LPG, com uma eficiência de  $-3$  dB, podem ser gravadas na mesma fibra com uma distância  $L$  entre elas, esta configuração atua como um interferômetro Mach-Zehnder (DIANOV *et al*, 1996). O princípio de funcionamento deste interferômetro é ilustrado na figura 10.

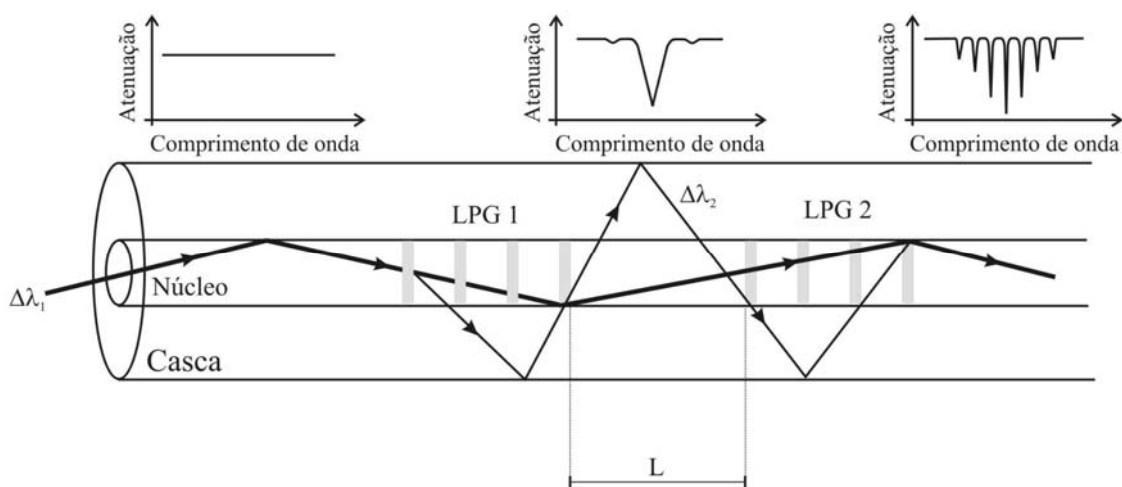


Figura 10 – Diagrama representando o acoplamento entre duas LPG idênticas com eficiência de 3 dB, gravadas em série na mesma fibra distantes de um comprimento  $L$ . O espectro de transmissão em cada segmento da fibra também é ilustrado na figura.

A primeira LPG acopla metade da potência óptica de uma fonte de banda larga que se propaga no núcleo para os modos de casca em comprimentos de onda que satisfazem a condição de casamento de fase equação (14). Assim a potência óptica é dividida em dois regimes diferentes de propagação, isto é a propagação no núcleo e a propagação na casca. Estes diferentes regimes de propagação constituem os braços do interferômetro Mach-Zehnder. A propagação ao longo da distância  $L$  dará origem a uma diferença de fase entre os dois braços do interferômetro. Isto porque os modos de casca possuem índices de refração efetivos diferentes do índice de refração efetivo do modo de núcleo. Esta diferença de fase originará um padrão franjas de interferência quando a potência óptica for re-acoplada para o núcleo pela segunda LPG. O índice de refração efetivo dos modos de casca depende de parâmetros externos como a temperatura, deformações mecânicas e também do índice de

refração do meio externo que define as condições de contorno do guia (para o caso de propagação na casca). Desta forma variações nestes parâmetros ocasionam modificações no índice de refração efetivo destes modos e conseqüentemente uma mudança no atraso de fase relativo entre os braços do interferômetro. Esta mudança é observada no espectro de transmissão como um deslocamento, em comprimento de onda, da posição das franjas. Este é o princípio que permite sua utilização em sensoriamento.

O espaçamento, em comprimento de onda, entre dois vales vizinhos é dado por (LIU *et al*, 1999):

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda^2}{(n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n)L} \quad (26)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda de ressonância e os outros parâmetros foram definidos anteriormente.

O espaçamento entre vales vizinhos diminui com o aumento da distância entre as redes, o que provoca também um aumento no número de vales. Vales mais estreitos permitem uma determinação na posição do comprimento de onda de ressonância mais precisa, o que resulta em uma melhor resolução em aplicações de sensoriamento. Por outro lado vales mais próximos entre si limitam a distinção dos deslocamentos das franjas. Desta forma a largura de banda das franjas é limitada, para propósitos de sensoriamento, pela separação entre elas.

Outra forma de produzir redes acopladas em série é clivar a fibra (corte perpendicular à direção de propagação) próxima a uma das extremidades da rede. Desta forma após propagar-se ao longo da rede a potência óptica acoplada para os modos de casca e a remanescente no núcleo seguem em direção a extremidade clivada. Ao incidirem na extremidade clivada terão parte da potência óptica refletida de volta e a segunda incidência na rede provocará o re-acoplamento para o núcleo gerando o fenômeno de interferência. Nesta configuração as redes atuam como um interferômetro de Michelson. Esta configuração pode facilitar o encapsulamento do dispositivo.



## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

#### 3.1 MATERIAIS, INFRA-ESTRUTURA E DESENVOLVIMENTO

Nas subsecções seguintes serão descritos os materiais e procedimentos utilizados para a produção e caracterização dos dispositivos estudados neste trabalho, assim como a metodologia adotada para análise dos dados.

##### 3.1.1 Produção das redes de período longo

As redes de período longo foram produzidas através da técnica ponto-a-ponto com a aplicação de um arco elétrico proveniente de uma máquina de emendas de fibras ópticas (Siemens modelo S46999-M7-A71). Nesta técnica, arcos elétricos são aplicados consecutivamente ao longo do comprimento de uma fibra monomodo padrão de telecomunicações (ABCXTal com comprimento de onda de operação na terceira janela de comunicações (1.550 nm) em uma região na qual a capa de proteção é retirada. Durante o processo a fibra é mantida sob uma tensão longitudinal constante fixando uma massa em uma das extremidades da fibra, enquanto a outra extremidade é presa a um estágio de translação com uma resolução linear de 5  $\mu\text{m}$ . Durante todo o processo o espectro de transmissão da fibra é acompanhado através de um analisador de espectros ópticos (OSA – *Optical Spectrum Analyser*) da *Anritsu* modelo MS9710B, podendo operar com uma resolução entre 1 e 0,07 nm com uma estabilidade em comprimento de onda de  $\pm 5$  pm. Um LED superluminescente da *MRV Communications* com comprimento de onda central em 1.547,1 nm e largura de banda a meia altura de 54,8 nm é utilizado com fonte óptica.

O processo de gravação consiste em aplicar um arco elétrico em um ponto da fibra, deslocando em seguida o estágio de translação (deslocamento controlado por computador) de uma distância  $\Lambda$ , que representa o período da rede. O acompanhamento do espectro de transmissão da fibra a cada ponto gravado permite determinar, após a gravação da primeira

rede, qual o número de pontos que produz a máxima eficiência para um determinado conjunto de parâmetros. Os parâmetros utilizados na máquina de emendas foram: intensidade do arco 12 mA, tempo de duração do arco 0,5 segundos. A figura 11 ilustra os sistemas de gravação e de leitura.

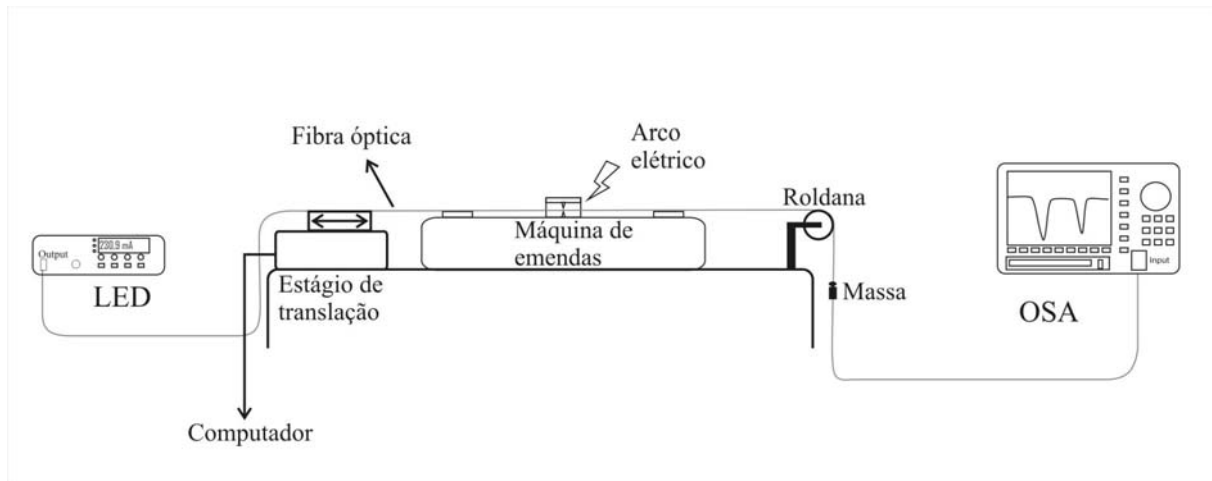


Figura 11 – Sistema de gravação de LPG ponto-a-ponto utilizando um arco elétrico proveniente de uma máquina de emendas de fibras ópticas.

Para verificar a influência da tensão na fibra durante o processo de gravação, foram produzidas redes utilizando massas de 20 g, 25 g, 30 g, 35 g e 40 g. Todas as redes foram produzidas com o mesmo período (595  $\mu\text{m}$ ) e mantendo-se os parâmetros da máquina de emendas constantes. A escolha do período foi realizada a partir de trabalhos anteriores (KAMIKAWACHI, 2003) e o aspecto mais relevante para esta escolha foi a posição do vale de atenuação. O período de 595  $\mu\text{m}$  produz redes com vale de atenuação dentro da faixa espectral do LED.

O número de arcos aplicados a cada ponto da fibra durante o processo de gravação é outro parâmetro que pode influenciar as características espectrais das redes. Esta análise foi realizada gravando-se redes com parâmetros iguais, à exceção do número de arcos aplicados. Redes foram gravadas aplicando-se 1, 2 e 3 arcos por ponto, utilizando um período de 595  $\mu\text{m}$  e uma tensão constante na fibra devido ao peso de uma massa de 30 g.

A influência tanto da tensão sobre a fibra como do número de arcos aplicados a cada ponto, durante o processo de gravação, pode ser quantificada a partir do coeficiente de acoplamento. Para determinar este coeficiente, o espectro de cada rede é medido a cada intervalo de 10 pontos gravados. Estes dados permitem determinar a transmitância, no comprimento de onda de ressonância em função do comprimento da rede e assim utilizando a equação (15) pode-se determinar o coeficiente de acoplamento.

Outro aspecto do sistema de gravação importante a ser estudado é a reprodutibilidade do processo de gravação. Este estudo foi realizado comparando-se as características espectrais de 3 redes gravadas em seqüência. O período das redes gravadas também foi 595  $\mu\text{m}$  e a massa utilizada para tensionar a fibra foi de 30 g. Na primeira seqüência apenas 1 arco foi aplicado a cada ponto e com 60 pontos de interação. Uma segunda seqüência de redes foi gravada, mas agora foram aplicados 2 arcos a cada ponto sendo necessários apenas 40 pontos de interação.

Além das redes convencionais foram produzidas 3 redes acopladas em série, com diferentes espaçamentos entre elas (1 cm, 5 cm e 10 cm). Estas redes foram produzidas utilizando uma massa de 30 g para tensionar a fibra e aplicando-se 3 arcos a cada ponto.

### 3.1.2 Determinação dos parâmetros das redes

Para determinar a posição em comprimento de onda do vale de atenuação, são ajustados uma ou mais curvas gaussianas sobre os espectros de transmissão de cada rede. Não apenas os ajustes, mas também todas as análises são realizados utilizando o *software Origin* versão 6.1 ou 7.5. Os gráficos dos espectros de transmissão de cada LPG gravada são obtidos a partir da razão (linear ou em dB) entre o espectro de transmissão da fibra medido imediatamente antes do início do processo de gravação e o espectro de transmissão da fibra, medido após a gravação de um número adequado de pontos.

A determinação das eficiências assim como das larguras de banda das redes é feita diretamente do gráfico, em dB, do espectro de transmissão da rede. A largura de banda da rede é a largura do vale de atenuação, em 3 dB. Este procedimento é adotado para a determinação dos parâmetros de todas as redes gravadas, inclusive as redes acopladas. Além disto, ele deve ser realizado com os dados obtidos durante o processo de gravação, pois ao separar a fibra com a rede dos conectores originais e fazer novas emendas as perdas nos novos pontos de emenda são diferentes e ocasionam modificações no espectro de transmissão da rede.

### 3.1.3 Produção das redes de Bragg corroídas

Em uma segunda etapa deste trabalho foi estudado um outro tipo de sensor de índice de refração baseado em redes em fibra, as redes de Bragg corroídas. Esta etapa do trabalho foi realizada no laboratório de Óptica Coerente do departamento de Física da Universidade de Aveiro (Aveiro, Portugal) junto ao grupo de óptica. Este trabalho foi realizado durante o estágio de doutoramento no exterior de 6 meses do estudante, sob a supervisão do professor doutor João de Lemos Pinto e com a colaboração da doutora Ilda Abe. As redes de Bragg foram gravadas em fibras fotossensíveis da Fiber Core (FiberCore PS1250/1500) com 125  $\mu\text{m}$  de diâmetro. A técnica de gravação utiliza um interferômetro de máscara de fase iluminado com radiação ultravioleta proveniente de um laser de argônio operando em 244 nm.

As redes têm um comprimento estimado de 2 mm, derivado do diâmetro do feixe laser. As redes de Bragg são quimicamente corroídas prendendo a rede a um suporte de PVC e imergindo o suporte com a fibra em ácido hidrófluorídrico (HF). A velocidade de corrosão e o comportamento do comprimento de onda durante o processo de corrosão dependem da concentração do ácido; nestas experiências a concentração foi de aproximadamente 15 % em água. O diâmetro da FBG é reduzido através da imersão da fibra no ácido. Diferentes diâmetros foram obtidos através de diferentes tempos de imersão. Após a imersão o processo de corrosão é neutralizado imergindo a fibra em uma solução de NaOH dissolvido em água. Para determinar a taxa de corrosão e analisar o comportamento do comprimento de onda da rede a primeira FBG é completamente corroída e a evolução espectral do comprimento de onda de Bragg é monitorada ao longo do tratamento.

O sistema utilizado na produção e caracterização das redes de Bragg corroídas era composto por um analisador de espectros ópticos com resolução de 0.1 nm e estabilidade em comprimento de onda de  $\pm 5$  pm e um amplificador a fibra dopada com érbio como fonte óptica.

#### 3.1.4 Caracterização das sensibilidades da LPG e das LPG acopladas em série

A LPG foi caracterizada com o propósito de determinar as sensibilidades ao índice de refração, à temperatura e à deformações longitudinais. Além disto, estes estudos permitiram analisar a sensibilidade cruzada que o dispositivo apresenta a estes parâmetros.

A caracterização das sensibilidades da LPG é realizada inserindo a rede em um recipiente de vidro com 4 aberturas, duas para inserção e retirada das amostras, e 2 para o posicionamento da fibra com a rede, figura 12. Para evitar interferências na resposta do dispositivo devido a deformações e curvaturas, uma das extremidades da fibra é presa a um

suporte fixo enquanto na outra extremidade, após passar por uma roldana, uma pequena massa (30 g) é presa. Na caracterização da sensibilidade à deformação longitudinal a extremidade da fibra que atravessa a roldana é presa a um estágio de translação com resolução linear de 5  $\mu\text{m}$  que causa a deformação e a massa de 30 g é retirada da fibra.

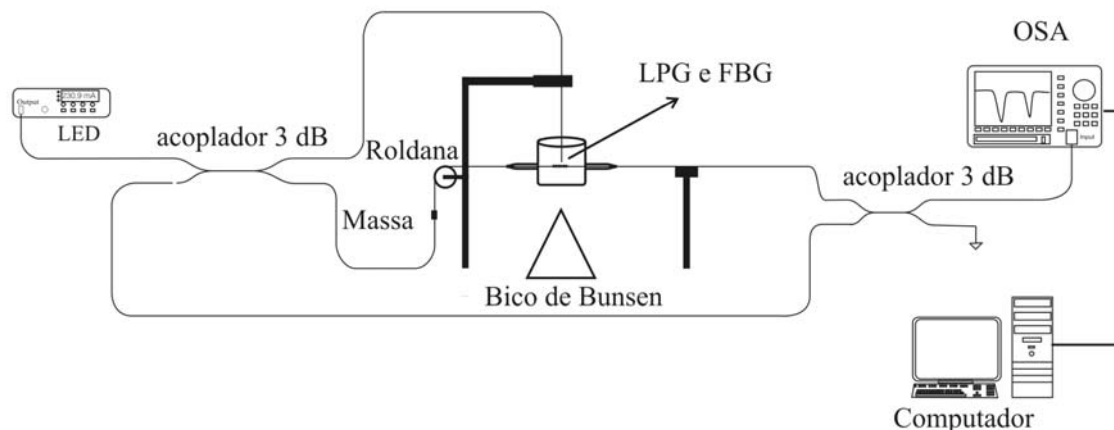


Figura 12 – Sistema utilizado na caracterização das sensibilidades da LPG.

As respostas da LPG a diferentes amostras com diferentes índices de refração são determinadas inserindo no recipiente aproximadamente 40 mL de amostras com índices de refração previamente determinados. Este volume permite que a rede se posicione a aproximadamente 2 cm da superfície da amostra minimizando os efeitos da evaporação da amostra. A determinação do índice de refração das amostras é realizada utilizando um refratômetro de Abbe da Bausch & Lomb (número de catálogo 33.46.10) para medir o índice de refração em 3 diferentes comprimentos de onda 488,0 nm, 514,5 nm (de um laser de argônio) e 632,8 nm (de um laser de He-Ne). O índice de refração de cada amostra em 1,55  $\mu\text{m}$  foi calculado utilizando uma equação de Cauchy de segunda ordem. As amostras utilizadas foram: ar, água, etanol, nafta, tiner, aguarrás e querosene. Durante as medidas a temperatura das amostras é monitorada e mantém-se em  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ .

A caracterização da sensibilidade da LPG à temperatura é realizada inserindo uma das amostras no recipiente e aquecendo o recipiente até uma temperatura de aproximadamente 55  $^\circ\text{C}$  e então o espectro de transmissão da rede é medido durante o resfriamento das amostras

a cada 5 °C. Este procedimento é repetido para cada uma das amostras. A temperatura é monitorada com um termômetro digital com resolução de 1 °C.

Para medir a sensibilidade da LPG a deformações longitudinais cada uma das amostras é inserida no recipiente e o estágio de translação é deslocado de 50 µε. Durante a caracterização da sensibilidade à deformação, a temperatura é monitorada e mantém-se constante em  $21 \pm 1$  °C.

Ao final de cada uma das medidas, que envolvem hidrocarbonetos (ou mistura de hidrocarbonetos), o recipiente e a fibra são limpos inserindo alternadamente no recipiente álcool e água. Os ciclos de limpeza (álcool e água) são repetidos até que o espectro de transmissão da rede apresente as mesmas características de quando a rede estava imersa em água antes da inserção dos hidrocarbonetos.

Os mesmos procedimentos adotados na caracterização das sensibilidades ao índice de refração do meio externo, à temperatura e a deformações longitudinais das LPG são utilizados na caracterização das LPG acopladas em séries. Adicionalmente, a contribuição de cada um dos segmentos (LPG + cavidade + LPG), para a sensibilidade ao índice de refração, é determinada medindo-se o espectro de transmissão do dispositivo quando cada segmento está individualmente imerso em água e quando todo o dispositivo está imerso.

### 3.1.5 Aplicações da LPG como sensor

As caracterizações para detecção de hidrocarbonetos em ambientes hídricos são realizadas imergindo a LPG em água e então monitorando o comprimento de onda de ressonância ao longo do tempo. Após um intervalo de tempo, uma amostra de hidrocarboneto é adicionada à água e subseqüentemente o comprimento de onda é medido a cada 30 segundos. As moléculas dos hidrocarbonetos são apolares enquanto que a molécula da água é polar, o que impede que as substâncias formem uma mistura homogênea. Assim, as amostras de hidrocarbonetos (gasolina, querosene, tiner e aguarrás) apresentam-se separadas e, na parte superior da mistura localizam-se estes constituintes por apresentarem menor densidade. A válvula de drenagem no fundo do recipiente é então aberta para permitir que a água escoe até a amostra entrar em contato com a rede. Depois disso, uma nova quantidade de água é injetada no recipiente, através de uma seringa, para que o nível da amostra aumente até que a água cubra o sensor novamente. (Quatro tipos diferentes produtos comerciais foram utilizados: gasolina, querosene, tiner, e aguarrás).

A LPG é sensível tanto ao índice de refração do meio externo quanto à temperatura. Assim, variações na temperatura podem ocasionar deslocamentos adicionais e prejudicar a interpretação dos dados. Portanto uma rede de Bragg é inserida no sistema óptico para analisar o seu desempenho na correção do deslocamento da LPG devido à variação de temperatura.

As sensibilidades térmicas das redes são analisadas aquecendo-se a água no recipiente de 20 °C a 60 °C. Durante o processo de aquecimento, a temperatura e o espectro de transmissão (LPG e FBG) são medidos em intervalos de temperatura de 5 °C. Os coeficientes de sensibilidade térmica da LPG ( $\alpha_{LPG}$ ) e da FBG ( $\alpha_{FBG}$ ) são empregados na equação (27) para corrigir o deslocamento espectral da LPG causado apenas pela mudança de temperatura.

$$\lambda_c = \lambda_m + \alpha_{LPG} \frac{(\lambda_f - \lambda_i)}{\alpha_{FBG}} \quad (27)$$

Nesta equação,  $\lambda_c$  é a posição corrigida do comprimento de onda da LPG,  $\lambda_m$  é o comprimento de onda medido da LPG para uma temperatura T,  $\lambda_f$  e  $\lambda_i$  são respectivamente o comprimento de onda da FBG medidos para uma temperatura T e para 20 °C. Para analisar o método de correção, os valores de  $\lambda_m$  e  $\lambda_f$  são medidos para diversas temperaturas de 20 °C até 60 °C e então os resultados da equação (27) são comparados com os valores medidos de  $\lambda_c$  para 20 °C.

Após estas medidas a mesma rede passou por caracterizações para analisar a sua resposta quando em contato com cromo nos estados de oxidação do cromo +3 e +6. Nestas medidas, o espectro de transmissão da LPG é medido na presença de amostras de soluções de Cr (III) ou Cr (VI) com volume de 50 mL. Para ambos os estados de oxidação, 3 diferentes concentrações foram analisadas: 5,2 mg/L, 2,6 mg/L e 1,3 mg/L. Um termômetro com resolução de 1 °C foi utilizado para monitorar a temperatura durante todo o experimento. As soluções de cromo foram preparadas pelo Departamento de Química da UTFPR.

### 3.1.6 Aplicações das LPG acopladas em série como sensor

As LPG acopladas em série foram caracterizadas para a detecção de vapores de hidrocarbonetos. A resposta do dispositivo à presença do vapor é medida através da

introdução de uma pequena quantidade de amostra (5 mL) no interior do recipiente de vidro, o qual possui apenas uma pequena abertura, utilizada para inserir a amostra. No procedimento adotado, o comprimento de onda é monitorado enquanto o dispositivo esta inicialmente imerso em ar; após aproximadamente 130 segundos a amostra é inserida no recipiente. O dispositivo entra em contato apenas com a amostra na fase de vapor. Quando o deslocamento do comprimento de onda atinge um valor de estabilização, a parte superior do recipiente é completamente aberta e o comprimento de onda continua a ser monitorado enquanto o vapor deixa o recipiente. As amostras utilizadas nesta caracterização foram: etanol, tiner, gasolina e querosene. A temperatura no interior do recipiente é monitorada com um termômetro digital, com resolução de 0,1 °C.

As LPG acopladas em série também foram caracterizadas quanto a presença de Cr (III) e Cr (VI) utilizando o mesmo procedimento adotado para a caracterização da LPG. Nesta caracterização foram utilizadas soluções com as seguintes concentrações: 2,6; 1,3; 0,65 e 0,32 mg/L

### 3.1.7 Caracterização das sensibilidades da FBG corroída

A resposta da FBG a diferentes amostras com diferentes índices de refração é determinada inserindo o suporte de PVC com a rede em um becker com aproximadamente 60 mL de amostras com índices de refração previamente determinados. A determinação do índice de refração das amostras é realizada utilizando um refratômetro de Abbe para medir o índice de refração em 3 diferentes comprimentos de onda 589,3 nm (linha D de uma lâmpada de sódio), 543,5 nm e 632,8 nm (de lasers de He-Ne). O índice de refração de cada amostra em 1,55  $\mu\text{m}$  foi calculado utilizando uma equação de Cauchy de segunda ordem. As amostras utilizadas foram: ar, água, etanol, benzina, tiner, uma mistura de 50% de tiner e 50% de aguarrás, aguarrás e querosene, que serão identificadas como HC 1, HC 2, HC 3, HC 4 e HC 5, respectivamente. Durante as medidas a temperatura da amostra é monitorada e mantém-se em  $21,0 \pm 0,1$  °C.

A caracterização da sensibilidade à temperatura da FBG corroída é realizada inserindo uma das amostras no becker e aquecendo o recipiente até uma temperatura de aproximadamente 50 °C. O dispositivo é mantido 3 cm abaixo da superfície da amostra para minimizar a influência da evaporação. O espectro de transmissão da rede é medido durante o resfriamento das amostras a cada 1 °C. Este procedimento é repetido para cada uma das



amostras. A temperatura é monitorada com um termômetro digital com resolução de 0,1 °C. Esta caracterização é realizada para 4 diferentes diâmetros de casca 15, 10, 9 e 8  $\mu\text{m}$ .



## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 PRODUÇÃO DAS REDES DE PERÍODO LONGO

##### 4.1.1 Influência da tensão na fibra

A influência da tensão a qual a fibra está submetida foi avaliada utilizando diferentes massas (20, 25, 30, 35 e 40 g) presas à fibra durante o processo de gravação. As redes produzidas para esta caracterização serão denominadas MA<sub>xy</sub>, onde xy é o valor da massa utilizada. Neste experimento os parâmetros da máquina de emendas foram mantidos constantes (tempo de duração do arco de 0,5 segundos e intensidade de corrente elétrica igual a 12 mA) e apenas um arco é aplicado à fibra neste procedimento.

A figura 13 mostra os espectros de transmissão da rede MA<sub>20</sub> após a gravação de 10, 20, 30, 40, 50, 55 e 60 pontos, o período utilizado foi 595  $\mu\text{m}$ . Na figura 13 a eficiência da rede está representada em decibel. A eficiência da rede aumenta com o aumento de seu comprimento. Desta forma para qualquer que seja o parâmetro utilizado (tensão na fibra ou número de arcos) haverá sempre um comprimento no qual a rede atinge a máxima eficiência e para comprimentos superiores a este a rede diminui sua eficiência devido ao re-acoplamento de potência óptica para o núcleo. No sistema de gravação utilizado o número de pontos máximo está limitado em aproximadamente 60 pontos devido ao limite do parafuso micrométrico.

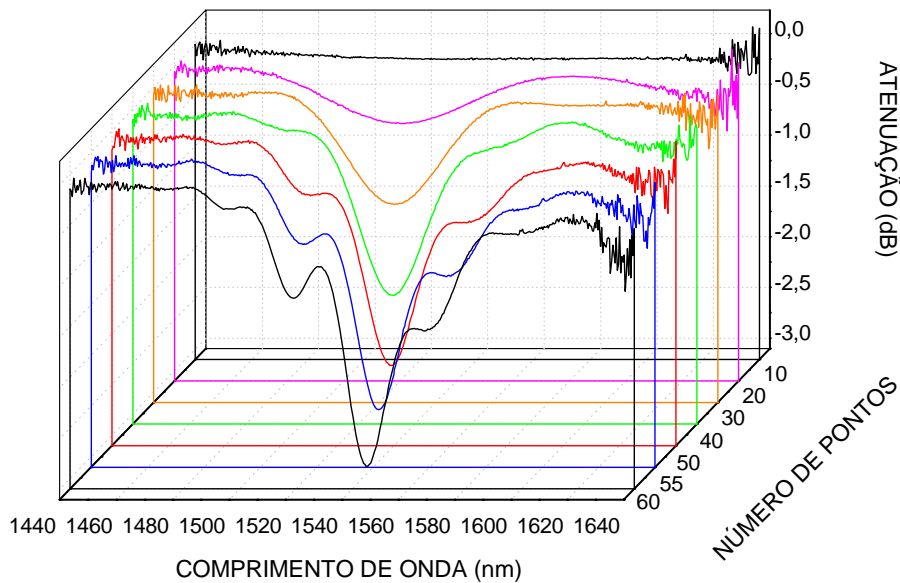


Figura 13 – Evolução do espectro de transmissão da rede MA20 com o aumento do número de pontos.

A avaliação e a comparação da influência da variação dos parâmetros de gravação pode ser feita a partir do coeficiente de acoplamento. O coeficiente de acoplamento pode ser determinado a partir da transmitância normalizada do espectro da rede em função do comprimento da rede, equação (15). Este modelo não leva em consideração as perdas por espalhamento na interface casca-meio e também as perdas devido à propagação nos modos de casca na região onde há a modulação de índice (o arco elétrico modula não somente o índice do núcleo como também o índice da casca e isso provoca o aumento das perdas por espalhamento). Estas perdas são consideradas multiplicando-se a equação (15) por um fator  $e^{\frac{-bx}{k}}$ , onde  $b$  e  $k$  são parâmetros de ajuste e  $x$  é a distância de propagação. Então o coeficiente de acoplamento é obtido através do ajuste desta função nos dados da transmitância em função do comprimento da rede. A figura 14 mostra o resultado do ajuste desta equação na determinação do coeficiente de acoplamento, este resultado corresponde à rede MA20.

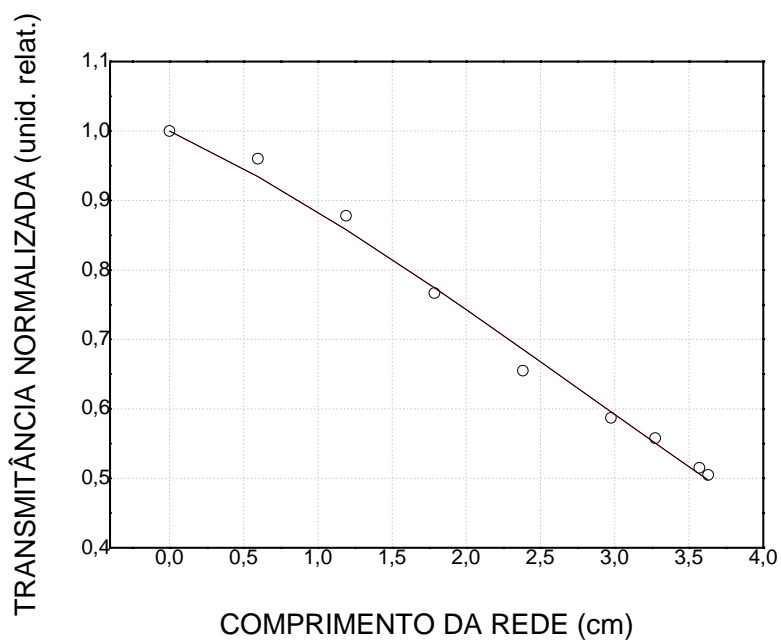


Figura 14 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA20. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

O mesmo procedimento foi adotado para as redes gravadas com massas de 25, 30, 35 e 40 g denominadas MA25, MA30, MA35 e MA40 respectivamente. Os resultados são mostrados nas figuras de 15 a 22 e os parâmetros de cada uma das são mostrado na tabela 1.

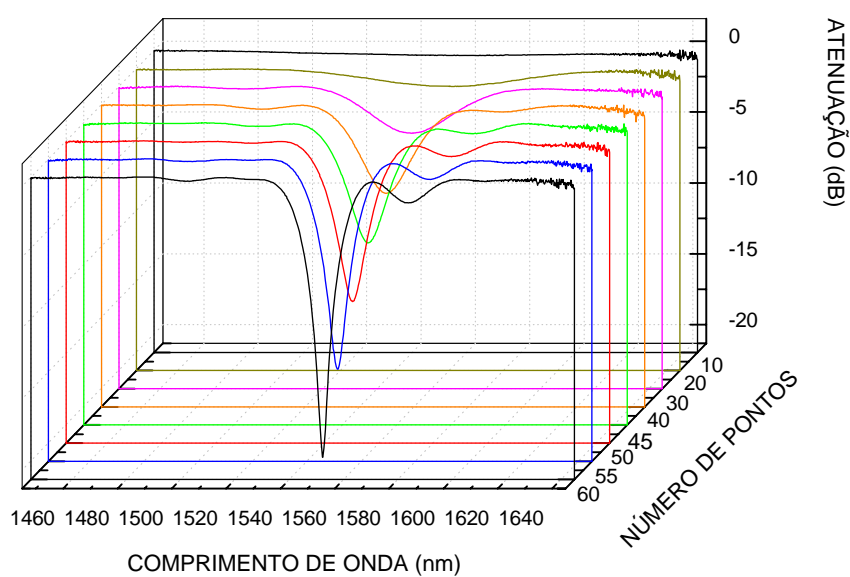


Figura 15 – Evolução do espectro de transmissão da rede MA25 com o aumento do número de pontos.

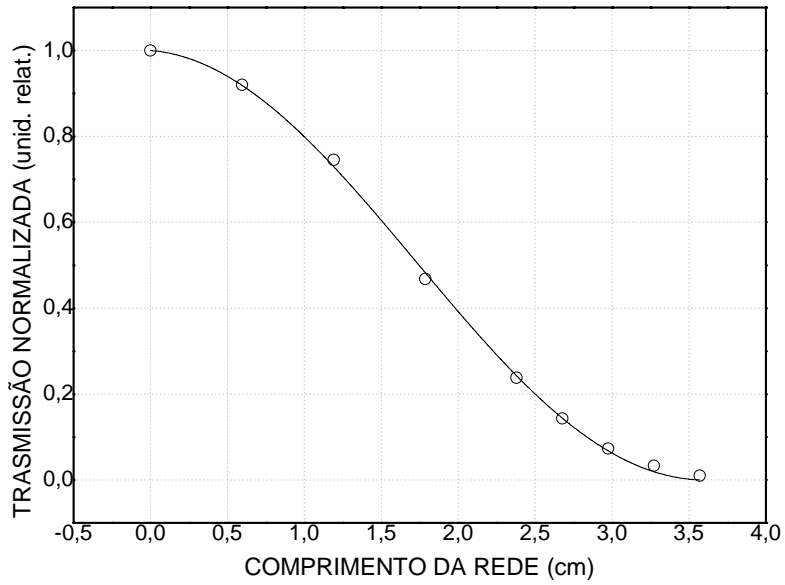


Figura 16 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA25. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

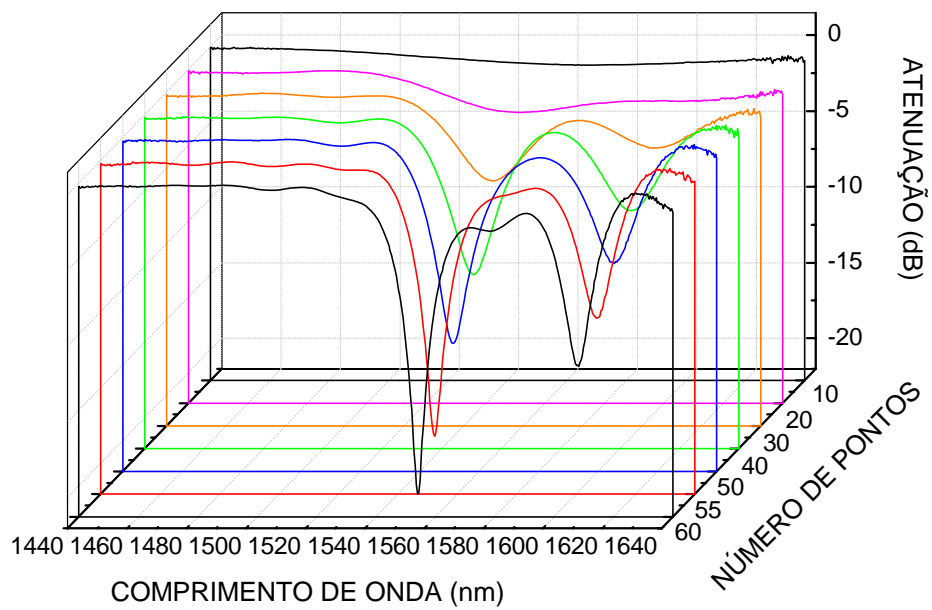


Figura 17 – Evolução do espectro de transmissão da rede MA30 com o aumento do número de pontos.

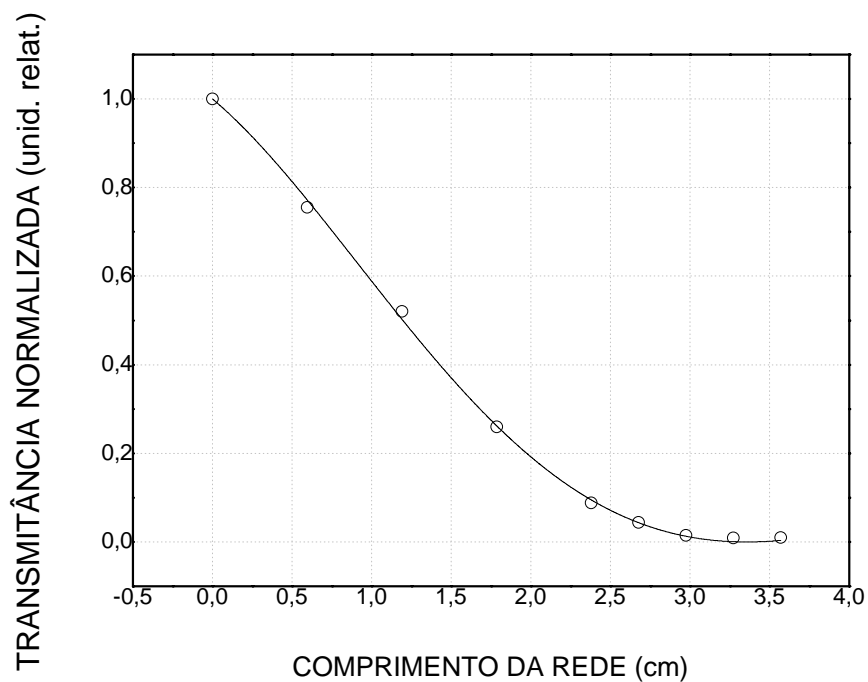


Figura 18 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA30. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

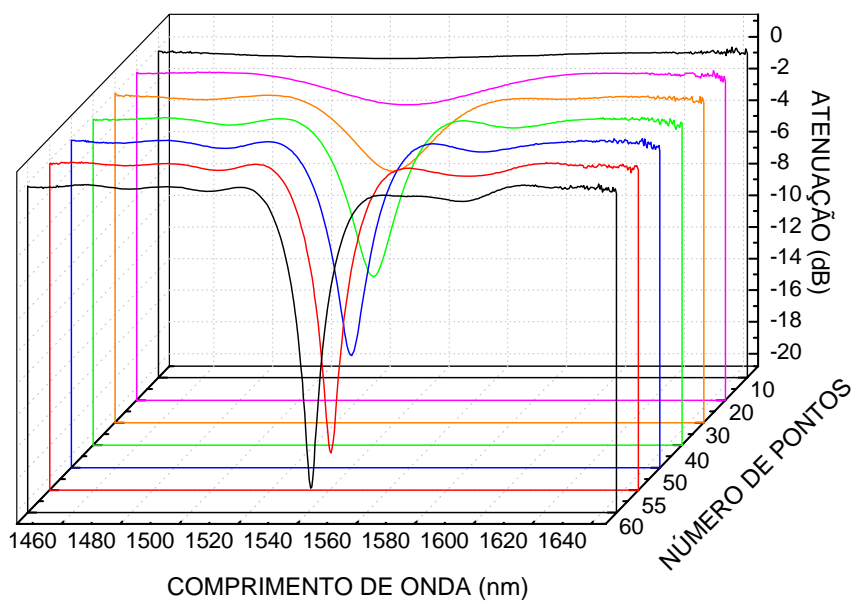


Figura 19 – Evolução do espectro de transmissão da rede MA35 com o aumento do número de pontos.

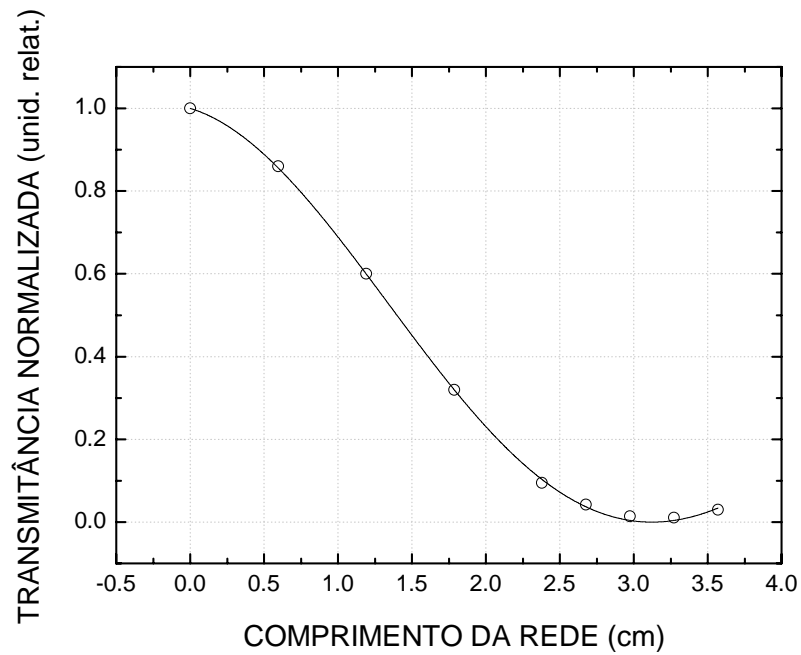


Figura 20 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA35. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

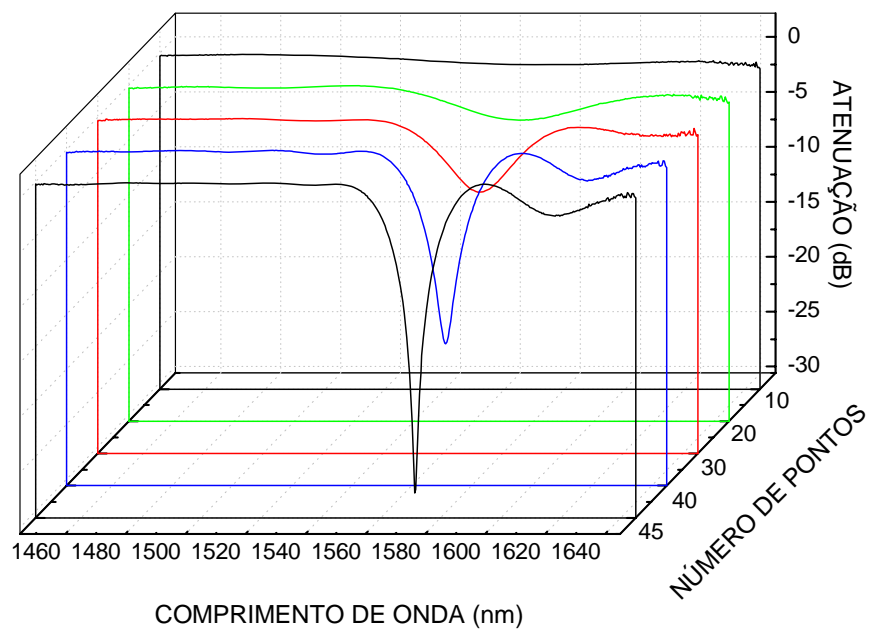


Figura 21 – Evolução do espectro de transmissão da rede MA40 com o aumento do número de pontos.



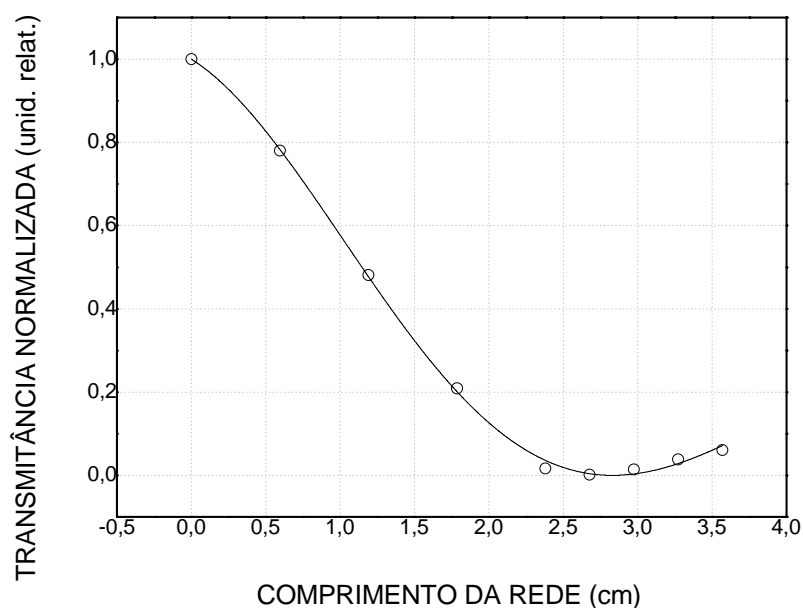


Figura 22 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede MA40. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

Tabela 1: Parâmetros das redes mostradas nas figuras de 15 a 22

		Largura de Banda $\Delta\lambda_{FWHM}$ (nm)	Comprimento de onda (nm)	Eficiência (dB)	Número de pontos para máxima eficiência	Coefficiente de acoplamento ( $\text{rad cm}^{-1}$ )
MA20		$40,0 \pm 0,1$	$1.545,68 \pm 0,05$	-2,9	60	$0,31 \pm 0,66$
MA25		$16,6 \pm 0,1$	$1.551,16 \pm 0,02$	-19,7	60	$0,87 \pm 0,02$
MA30	Vale 1	$44,4 \pm 0,1$	$1.555,53 \pm 0,05$	-20,5	55	$0,94 \pm 0,04$
	Vale 2	$20,4 \pm 0,1$	$1.609,50 \pm 0,05$	-12,0		---
MA35		$22,4 \pm 0,1$	$1.541,62 \pm 0,09$	-19,7	55	$1,01 \pm 0,01$
MA40		$22,8 \pm 0,1$	$1.571,31 \pm 0,05$	-28,3	45	$1,11 \pm 0,01$

As incertezas nos valores mostrados na tabela 1 e na tabela 2 são resultados dos ajustes numéricos.

A rede MA 30 apresentou 2 vales de ressonância dentro da faixa espectral analisada. O coeficiente de acoplamento do vale 2 desta rede não foi obtido pois não foi possível determinar com precisão qual o comprimento da rede em que este acoplamento se inicia. Pois os espectros de transmissão foram medidos a cada 10 pontos e este vale começa a surgir entre o intervalo de pontos gravados de 20 e 30 pontos.

O aumento da tensão à qual a fibra está submetida provoca o aumento da eficiência da rede, isso porque há um aumento na deformação no local onde o arco elétrico é aplicado. Este

aumento da deformação local pode ser observado através do aumento do coeficiente de acoplamento para cada uma das redes mostrado na tabela 1. Outra característica interessante que pode ser observada é o aumento da largura de banda com o aumento da tensão à qual a fibra é submetida. A rede com a menor largura de banda (16,6 nm) foi àquela gravada com uma massa de 25 g presa à fibra. Para as outras redes gravadas com massas maiores pode-se observar um aumento na largura de banda. Em dois casos, para a rede MA20 e o vale 1 da rede MA30, os vales de ressonância apresentaram uma grande largura de banda (40,0 e 44,4 nm, respectivamente) isso foi devido aos lobos laterais que surgiram muito próximos ao vale de ressonância. Para estes 2 casos foram ajustadas múltiplas gaussianas para analisar a largura de banda sem a influência dos lobos laterais, para a rede MA 20, o ajuste forneceu uma largura de banda de  $(16,27 \pm 0,37)$  nm e para a rede MA 30 a largura de banda obtida foi  $(18,18 \pm 0,25)$  nm. O aumento da largura de banda é esperado, pois é diretamente proporcional a raiz quadrada do coeficiente de acoplamento e inversamente proporcional a raiz quadrada do comprimento da rede, equação (16), desta forma o aumento no coeficiente de acoplamento e a diminuição do comprimento da rede resultam em um aumento na largura de banda.

As redes MA20 e MA35 apresentaram lobos laterais de ambos os lados do vale principal enquanto que as redes MA25, MA30 e MA40 apresentaram lobos laterais mais pronunciados apenas na região de maiores comprimentos de onda. Segundo Bhatia (1996) o surgimento de lobos laterais em apenas um dos lados do vale de ressonância é resultado da variação da máxima modulação de índice em cada ponto e/ou do índice efetivo do modo guiado ao longo do comprimento da rede. Redes com esta característica são conhecidas como redes apodizadas. Esta não uniformidade na modulação de índice ao longo do comprimento da rede pode ser devida a mudanças nas condições ambientais (umidade), degradação dos eletrodos, poeira na fibra ou nos eletrodos ou por mudanças relativas entre a fibra e os eletrodos. Quando a distribuição da modulação de índice de refração e do índice efetivo do modo guiado ao longo do comprimento da rede é constante os lobos laterais surgem de maneira simétrica em ambos os lados do vale de ressonância. As redes que mais se aproximam desta condição são as redes MA20 e MA35.

Outro fato que pode ser observado é que para a rede MA30 houve o surgimento de dois vales de ressonância separados por aproximadamente 54 nm. Cada um dos vales corresponde a diferentes modos de casca. Para as outras redes gravadas também existem modos de maior e menor ordem do que aqueles representados nas figuras 13, 15, 19 e 21, o

que impede a sua visualização nos gráficos desta figuras é a limitada largura de banda da fonte óptica e a separação em comprimento de onda entre os vales de ressonância.

#### 4.1.2 Influência do número de arcos elétricos aplicados a cada ponto

O segundo parâmetro a ser analisado é o numero de arcos elétricos aplicados a cada ponto. Para estas caracterizações foi escolhida a massa de 30 g para tensionar à fibra durante o processo de escrita. As redes gravadas com esta massa não apresentaram a eficiência máxima, de forma que os possíveis efeitos da aplicação de mais de um arco possam ser notados com maior facilidade. O período foi mantido em 595  $\mu\text{m}$  assim como os parâmetros da máquina de emendas (intensidade de corrente 12 mA e tempo de duração do arco 0,5 segundos). As redes produzidas para esta caracterização serão denominadas AE0y, onde y é o número de arcos elétricos aplicados a cada ponto.

As figuras 23, 25 e 27 mostram a evolução dos espectros de transmissão das redes gravadas com a aplicação de 1, 2 e 3 arcos elétricos por ponto, respectivamente. As figuras 24, 26 e 28 representam os ajustes utilizados para a determinação do coeficiente de acoplamento destas redes. Os parâmetros destas redes são mostrados na tabela 2.

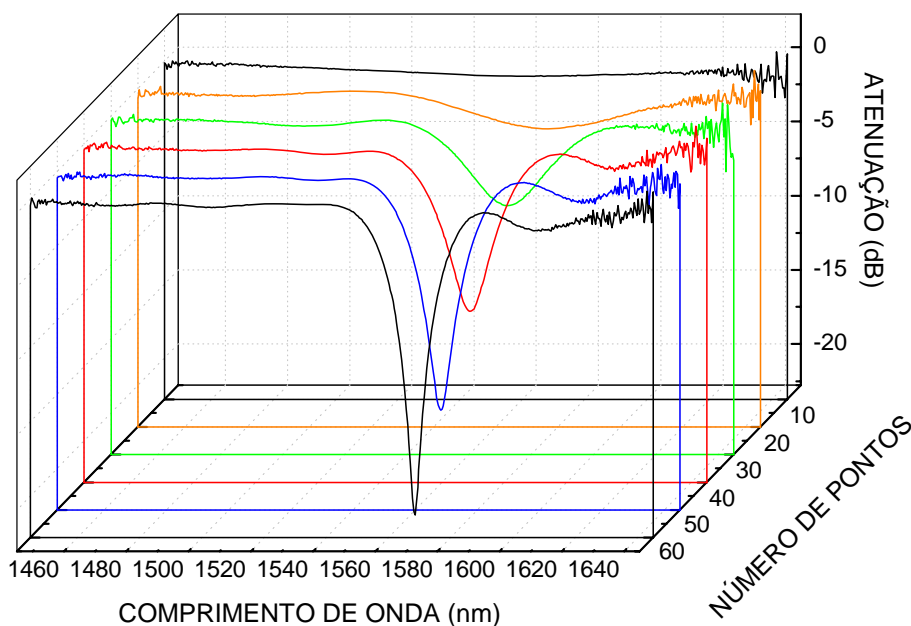


Figura 23 – Evolução do espectro de transmissão da rede AE01 com o aumento do número de pontos.

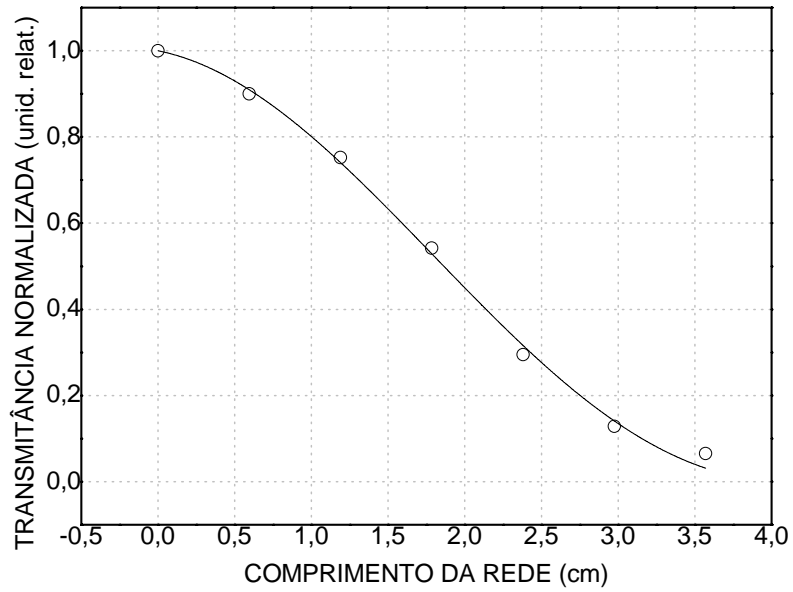


Figura 24 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE01. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

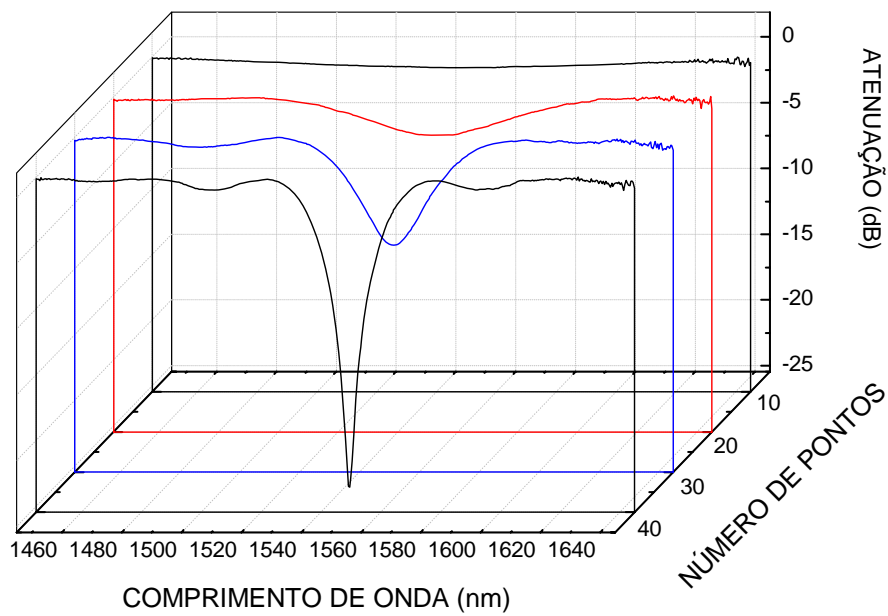


Figura 25 – Evolução do espectro de transmissão da rede AE02 com o aumento do número de pontos.

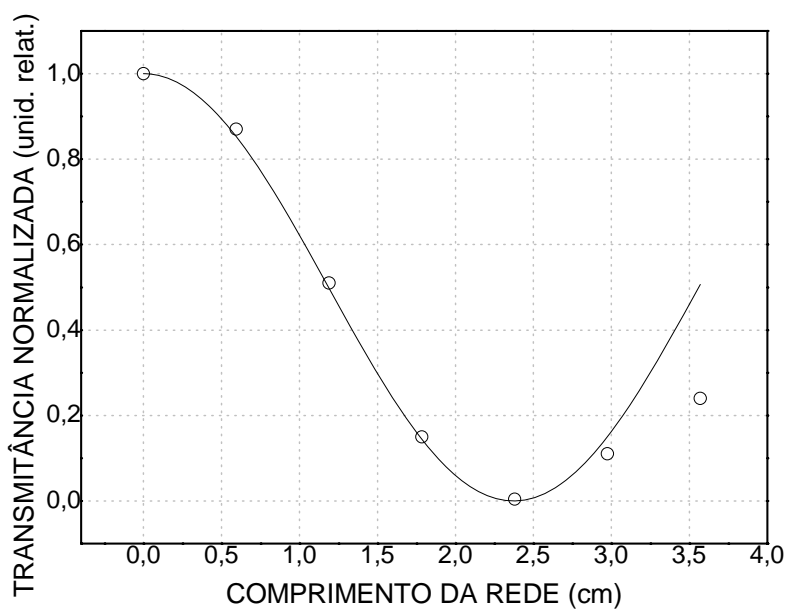


Figura 26 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE02. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

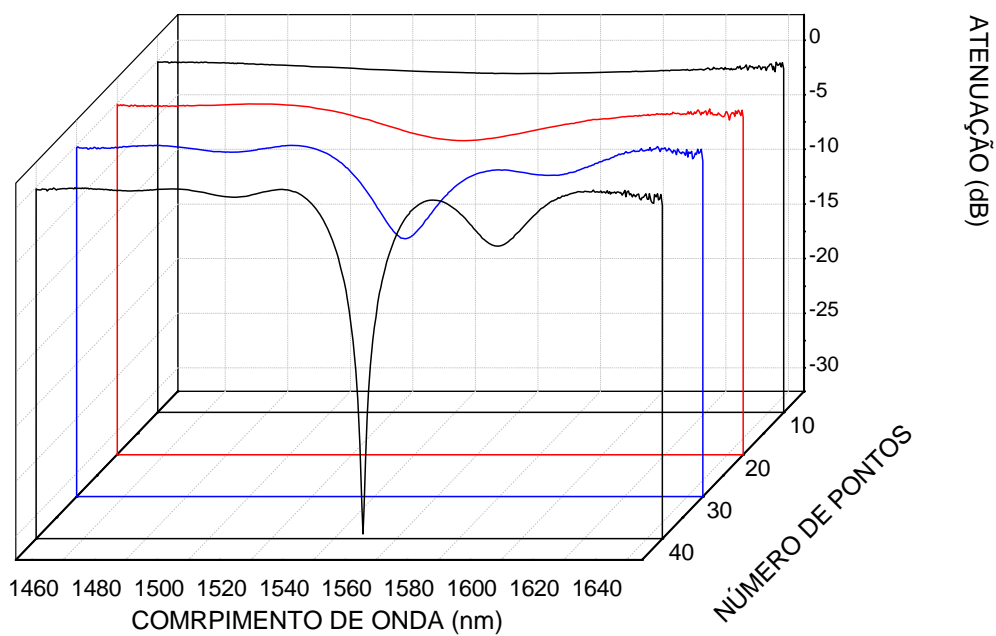


Figura 27 – Evolução do espectro de transmissão da rede AE03 com o aumento do número de pontos.

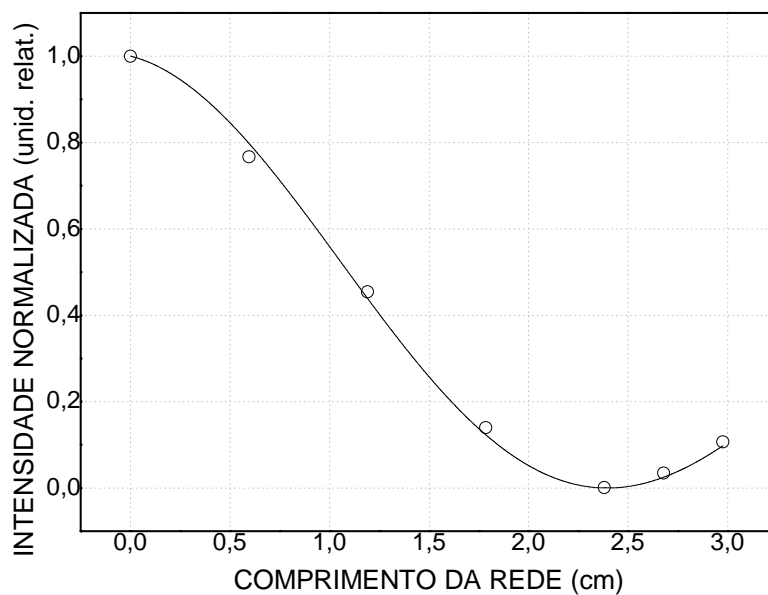


Figura 28 – Transmitância normalizada versus o comprimento da rede para a rede AE03. A linha contínua representa o ajuste da equação 15 utilizada para a determinação do coeficiente de acoplamento.

O aumento do número de arcos aplicados a cada ponto aumenta a eficiência, como pode ser verificado nos dados apresentados na tabela 2. Este fato se deve ao aumento da modulação de índice no local onde o arco elétrico é aplicado, resultando no aumento do coeficiente de acoplamento. Como discutido anteriormente o aumento do coeficiente de acoplamento causa um aumento na largura de banda. Para estes casos as larguras de banda foram determinadas com o ajuste de múltiplas gaussianas para desconsiderar o efeito dos lobos laterais.

Tabela 2: Características espectrais das redes mostradas na figura 29, 31 E 33.

	Largura banda $\Delta\lambda_{FWHM}$ (nm)	Comprimento de onda (nm)	Eficiência (dB)	Número de pontos para a máxima eficiência	Coeficiente Acoplamento ( $\text{rad cm}^{-1}$ )
AE01	$20,1 \pm 0,7$	$1.568,40 \pm 0,05$	-21,3	50	$0,77 \pm 0,06$
AE02	$20,4 \pm 0,6$	$1.549,79 \pm 0,05$	-23,6	40	$1,21 \pm 0,02$
AE03	vale 1	$20,6 \pm 0,1$	$1.549,55 \pm 0,05$	40	$1,31 \pm 0,02$
	vale 2	$22,8 \pm 0,2$	$1.591,80 \pm 0,05$		---

O coeficiente de acoplamento do vale 2 para a rede AE03 não foi determinado pelo mesmo motivo discutido para a rede MA30, na seção 4.1.3.

O espectro de transmissão da rede AE03, mostrado na figura 27 apresenta um vale de menor eficiência (-5,4 dB) em 1591,8 nm. Com a gravação de mais pontos (foram gravados 55 pontos) este vale aumenta a sua eficiência chegando a aproximadamente (-9 dB) enquanto que o vale que surgiu em menores comprimentos de onda diminui sua eficiência para aproximadamente -9 dB, figura 29. Para compreender melhor este comportamento esta rede foi simulada no programa IFOgratings e o resultado da simulação é mostrado na figura 30. O espectro mostrado nesta figura foi obtido simulando 2 redes superpostas com uma variação no período de 4,8 %, sendo que a rede que gera o segundo vale é formada por um número menor de pontos. Este resultado sugere que a não uniformidade no período pode resultar na gravação de duas redes sobrepostas com diferentes períodos o que resulta em duas condições de casamento de fase e conseqüentemente dois vales de ressonância. A diminuição da eficiência do vale posicionado em menores comprimentos de onda, após atingir o máximo valor (em 40 pontos), é devido ao re-acoplamento da potência óptica para o modo de núcleo. No espectro de transmissão mostrado na figura 29, os vales que surgiram em menores comprimentos de onda são devidos ao acoplamento para um modo de menor ordem e não foram verificados nos espectros experimentais. As possíveis causas para esta discordância se devem a diferenças entre os parâmetros da rede simulada e da rede gravada (perfil de modulação de índice, índices de refração da casca e do núcleo da fibra e a periodicidade da rede).

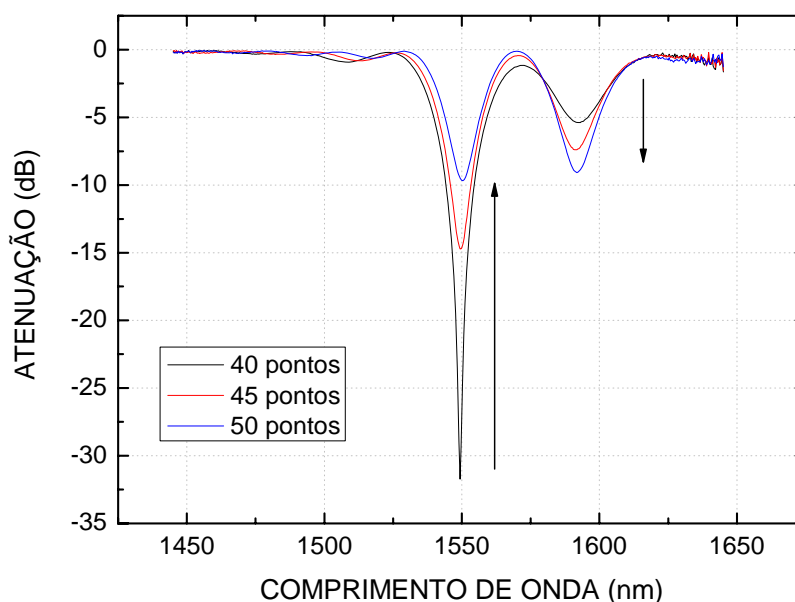


Figura 29 – Evolução do espectro de transmissão da rede AE03 para um número de pontos superior aquele no qual a eficiência é máxima.

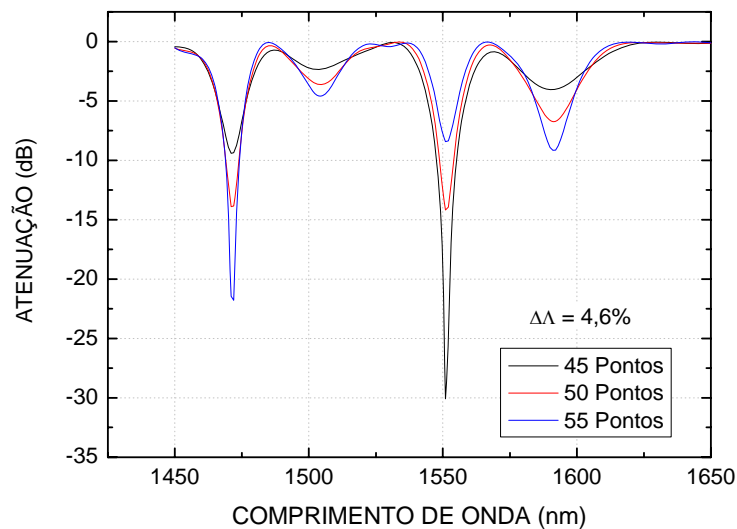


Figura 30 – Evolução do espectro de transmissão da rede AE03, simulada com o programa IFOgratings para um número de pontos superior aquele no qual a eficiência é máxima.

Quando são gravados 40 pontos a rede AE03 atinge a máxima eficiência ( $-31,7$  dB) e em seguida com a gravação de um maior número de ponto a eficiência diminui chegando a  $-9,65$  dB quando são gravados 50 pontos. Esta diminuição está relacionada ao re-acoplamento para o núcleo da potência óptica acoplada para a casca. Enquanto que o vale em comprimentos de onda maior sempre aumenta sua eficiência.

#### 4.1.3 Reprodutibilidade das características espectrais

O procedimento adotado para analisar a reprodutibilidade do sistema foi gravar três redes mantendo todos os parâmetros constantes. As redes foram gravadas em seqüência com um intervalo de meia hora entre cada experimento. Os parâmetros da máquina de emendas foram: intensidade de corrente 12 mA e tempo de duração do arco 0,5 s. As redes foram gravadas com um período de  $600 \mu\text{m}$  transladados manualmente pois o estágio de translação apresentava problemas. A massa utilizada foi de 30 g e o número de pontos 60. Três redes foram gravadas aplicando um arco e outras três redes foram gravadas aplicando dois arcos. Essas redes foram denominadas RP0xAy, onde x indica a posição na ordem de gravação e y indica o número de arcos.



A figura 31 mostra os espectros das redes gravadas com aplicação de apenas um arco enquanto que a figura 32 mostra os espectros de transmissão das redes gravadas com dois arcos.

Os principais parâmetros a serem analisados são o comprimento de onda central, a eficiência e a largura de banda. Os parâmetros das redes gravadas com um e dois arcos serão apresentados nas tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Parâmetros das redes mostradas na figura 31

	Largura de banda (nm)	Comprimento de onda (nm)	Eficiência (dB)	Período nominal	Número de pontos
RP01A1	21,6 ± 0,1	1.576,44 ± 0,05	-11,9	600 μm	60
RP02A1	23,2 ± 0,1	1.571,24 ± 0,05	-8,9	600 μm	60
RP03A1	20,8 ± 0,1	1.569,35 ± 0,05	-11,4	600 μm	60

Todas as redes gravadas com os mesmos parâmetros apresentaram características espectrais diferentes. As RP01A1 e RP03A1 apresentaram larguras de banda e eficiências próximas. Como discutido anteriormente tanto a largura de banda quanto a eficiência dependem do coeficiente de acoplamento que por sua vez depende da modulação de índice causada pela aplicação do arco elétrico. Como a modulação de índice causada pelo arco elétrico depende de vários parâmetros de difícil controle (umidade, desgaste dos eletrodos, poeira sobre a fibra e os eletrodos, etc), esta técnica não permite um controle adequado destas características espectrais. Além disso, o terceiro parâmetro a ser analisado foi o comprimento de onda do vale de ressonância, que teve uma variação de aproximadamente 7 nm para as redes gravadas com aplicação de um arco elétrico e aproximadamente 11 nm para as redes gravadas com a aplicação de 2 arcos elétricos em cada ponto. Estas variações estão associadas à imprecisão do estágio de translação utilizado para deslocar a fibra e definir o período da rede. O estágio utilizado possui uma resolução linear de 5 μm, uma variação desta magnitude no período pode causar deslocamentos no comprimento de onda do vale de ressonância de 13 nm, para uma determinada diferença de índices efetivos (equação 14). Além disto o termo  $(n_{ef\_nu}^n - n_{ef\_ca}^n)$  depende da modulação de índice em cada ponto da rede assim as variações neste parâmetro, devido aos motivos discutidos anteriormente, também ocasionaram diferenças no comprimento de onda de ressonância, equação (14).

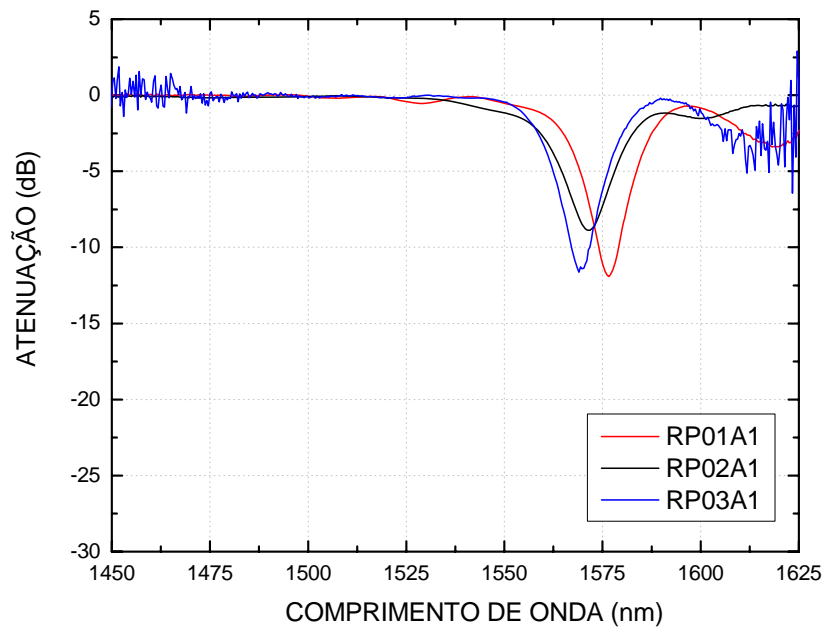


Figura 31 – Espectros de transmissão das redes RP01A1, RP02A1 e RP03A1.

Tabela 4: Parâmetros das redes mostradas na figura 32

		Largura de banda (nm)	Comprimento de onda (nm)	Eficiência (dB)	período nominal	Número De pontos
RP01A2		$27,6 \pm 0,1$	$1.559,78 \pm 0,05$	-24,1	600 $\mu\text{m}$	60
RP02A2		$24,4 \pm 0,1$	$1.567,63 \pm 0,05$	-22,5	600 $\mu\text{m}$	60
RP03A2	Vale 1	$25,2 \pm 0,1$	$1.548,20 \pm 0,05$	-22,7	600 $\mu\text{m}$	60
	Vale 2	$26,8 \pm 0,1$	$1.609,80 \pm 0,05$	-12,9		

As redes gravadas com a aplicação de dois arcos elétricos em cada ponto apresentaram as mesmas características de reprodutibilidade das redes gravadas com a aplicação de apenas um arco.

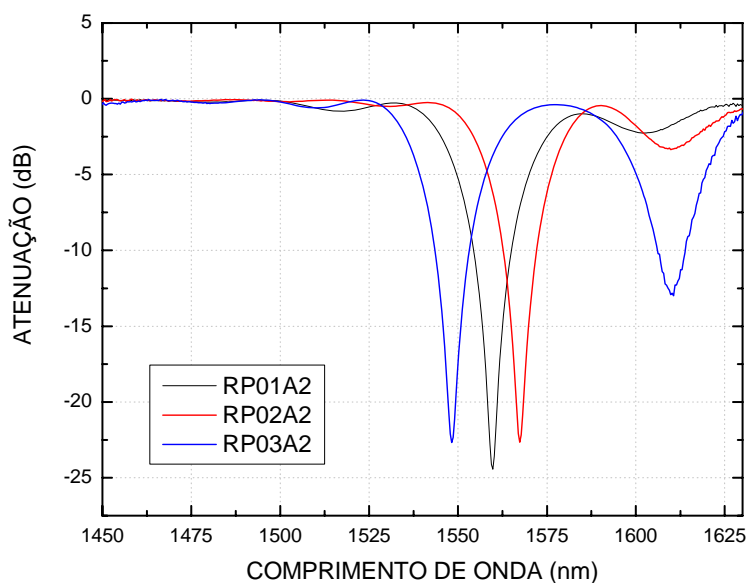


Figura 32 – Espectros de transmissão das redes RP01A2, RP02A2 e RP03A2.

#### 4.1.4 Redes acopladas em série

Nesta subsecção serão apresentados os resultados obtidos na produção de redes acopladas em série (CLPG). Estes dispositivos, que atuam como um interferômetro em fibra, apresentam características espectrais diferentes das características apresentadas pelas LPG, estas características são uma série de vales com menor largura de banda na posição do vale de ressonância de cada uma das redes independentes, posição esta que deve coincidente para ambas as redes. A largura de banda e o número de vales que surgem no espectro de transmissão dependem apenas da distância entre as redes, portanto neste estudo foi analisada a influência deste parâmetro nas características espectrais do dispositivo resultante.

As redes foram gravadas com a aplicação de 3 arcos elétricos em cada ponto, de modo a reduzir o tamanho total do dispositivo e facilitar a inserção no recipiente de caracterização. Os parâmetros da máquina de emendas foram intensidade de arco 12 mA e o tempo de duração do arco 0,5 segundos. Cada uma das redes foi produzida com 20 pontos resultando em um comprimento total do dispositivo de aproximadamente 1 cm (período de 595  $\mu\text{m}$ ). A determinação dos comprimentos de onda dos vales foi realizada ajustando múltiplas curvas gaussianas ao espectro de transmissão e as incertezas foram resultados destes ajustes e a largura de banda foi determinada a 3 dB de eficiência.

As figuras 33, 34 e 35 mostram os espectros de transmissão de três LPG acopladas em série separadas por uma distancia de um, cinco e dez centímetros, respectivamente. Nestas figuras é possível observar o espectro de transmissão logo após a gravação da primeira rede e após a gravação da segunda rede. Essas redes foram denominadas SE<sub>xy</sub>, onde xy indica a distância, em centímetros, entre as redes (cavidade). Os parâmetros das redes SE01 (cavidade de 1 cm), SE05 (cavidade de 5 cm) e SE10 (cavidade de 10 cm) são mostrados nas tabelas 5, 6 e 7 respectivamente. Na tabela 6 são mostrados somente os parâmetros dos sete primeiros e dos três últimos vales, pois os demais vales apresentavam pouca eficiência e estavam muito próximos um do outro, tornando difícil a determinação precisa de seus parâmetros.

Tabela 5: Parâmetros da rede SE01.

	Comprimento de onda (nm)	Largura de banda (nm)	Eficiência
Vale 1	$1.459,05 \pm 0,05$	$11,1 \pm 0,1$	-6,0 dB
Vale 2	$1.481,88 \pm 0,05$	$13,5 \pm 0,1$	-7,0 dB
Vale 3	$1.509,14 \pm 0,05$	$16,2 \pm 0,1$	-6,9 dB
Vale 4	$1.594,23 \pm 0,05$	$17,2 \pm 0,1$	-4,5 dB

O espaçamento médio entre os vales de atenuação da rede SE01 foi de 25 nm.

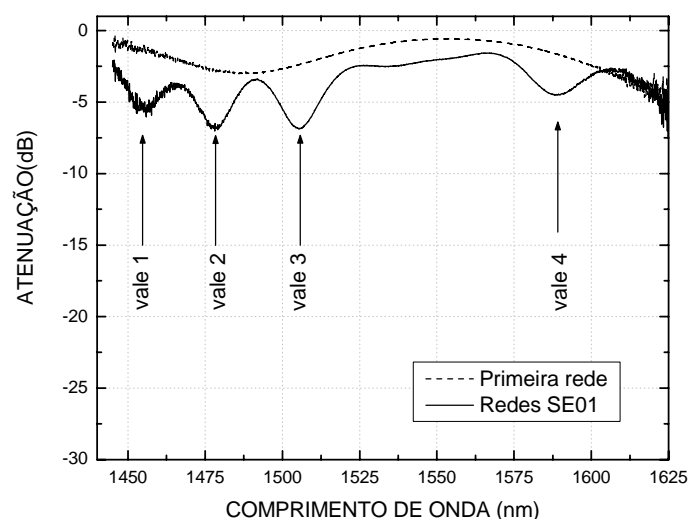


Figura 33 - Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de um cm entre elas. A linha tracejada corresponde à primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.

Tabela 6: Parâmetros da rede SE05.

	Comprimento de onda (nm)	Largura de banda (nm)	Eficiência
Vale 1	$1.459,78 \pm 0,05$	$5,8 \pm 0,1$	-4,3 dB
Vale 2	$1.471,03 \pm 0,05$	$6,3 \pm 0,1$	-6,3 dB
Vale 3	$1.486,42 \pm 0,05$	$9,2 \pm 0,1$	-8,3 dB
Vale 4	$1.497,43 \pm 0,05$	$5,3 \pm 0,1$	-12,3 dB
Vale 5	$1.508,59 \pm 0,05$	$6,3 \pm 0,1$	-10,9 dB
Vale 6	$1.518,75 \pm 0,05$	$4,9 \pm 0,1$	-7,1 dB
Vale 7	$1.527,96 \pm 0,05$	$4,2 \pm 0,1$	-5,5 dB
Vale 12	$1.590,48 \pm 0,05$	$7,0 \pm 0,1$	-5,8 dB
Vale 13	$1.612,54 \pm 0,05$	$7,5 \pm 0,1$	-10,13 dB
Vale 14	$1.627,57 \pm 0,05$	$15,1 \pm 0,1$	-11,77 dB

O espaçamento médio entre os vales de atenuação da rede SE05 foi de 10 nm.

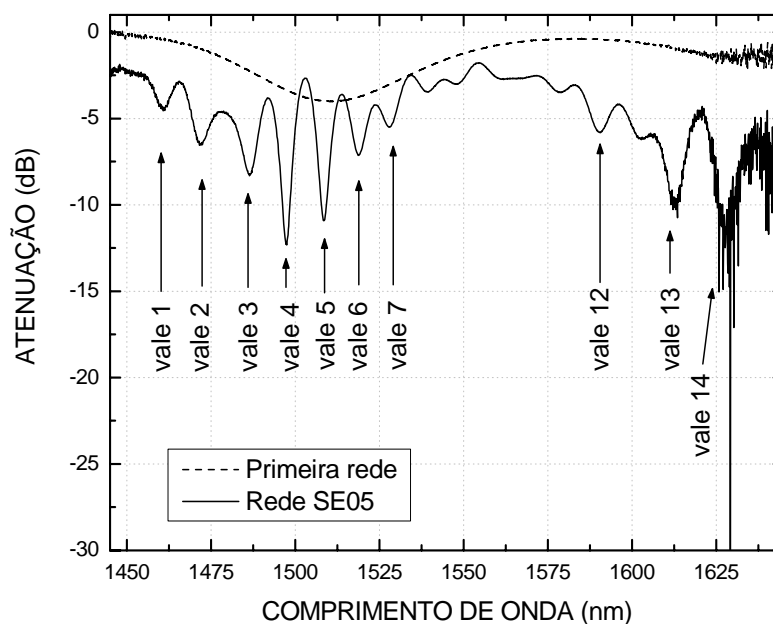


Figura 34 - Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de cinco cm entre elas.

A linha tracejada corresponde a primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.

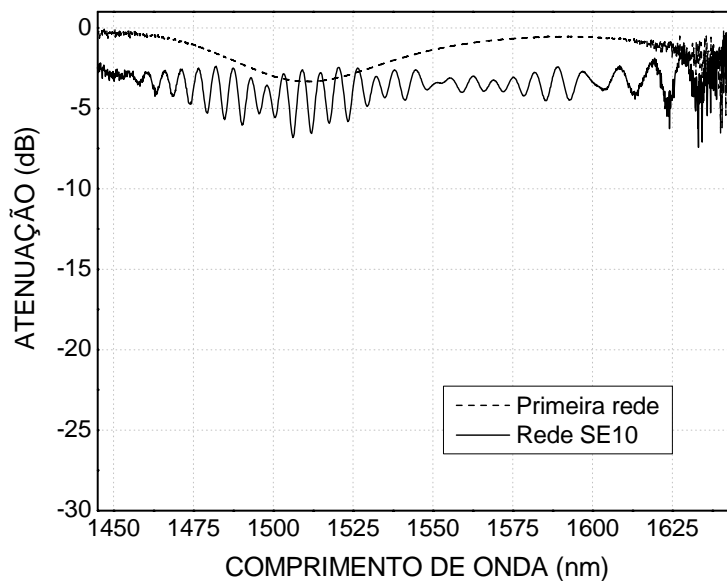


Figura 35 - Espectro de transmissão de duas LPG em série gravadas com uma distancia de 10 cm entre elas. A linha tracejada corresponde a primeira rede e a contínua corresponde às redes em série.

Como esperado o aumento da distância entre as redes diminui a largura de banda (equação 26) de cada uma das franjas de interferência e aumenta o número de vales (mínimos de interferência). Estas características podem ser interessantes para propósitos de sensoriamento, pois resultam em uma determinação mais precisa na posição do vale de atenuação. Por outro lado a proximidade entre cada vale limita a aplicação a casos onde o deslocamento dos vales é menor do que distância entre vales. Isso porque em casos onde os deslocamentos são iguais ou maiores do que a separação dos vales pode causar dificuldades na identificação do vale. Esta situação fica evidente no caso da rede SE10 onde um grande deslocamento torna difícil o acompanhamento de um determinado vale.

Nos espectros de transmissão das redes SE01, SE05 e SE10, mostrados nas figuras 33, 34 e 35, pode-se notar uma alta perda por inserção maior do que  $-2$  dB. Esta alta perda se deve a dois motivos, o primeiro é o descasamento em comprimento de onda dos vales de ressonância da primeira e da segunda LPG o segundo motivo é a eficiência das redes. Para que o interferômetro opere de forma otimizada cada um das redes deve, além de possuir o mesmo comprimento de onda de ressonância, ter uma eficiência de  $-3$  dB, como analisado anteriormente estes são parâmetros de difícil controle no atual sistema de gravação.

Uma característica muito interessante que pode ser observada nos espectros das figuras 33, 34 e 35 é o surgimento de vales na região de maiores comprimentos de onda

( $\lambda > 1.575$  nm). Nestes mesmos gráficos pode-se notar um acoplamento ocorrendo próximo a 1.500 nm e no final da banda da fonte óptica da fonte ( $\lambda > 1.575$  nm) o início de uma atenuação. Este início de atenuação é devido ao acoplamento de maior ordem do que aquele que ocorre próximo a 1.500 nm. O fato de estes vales serem resultado do acoplamento para um modo de maior ordem é interessante para propósitos de sensoriamento, pois quanto maior a ordem do modo maior as suas sensibilidades. A possibilidade de trabalhar com um modo, mesmo que a largura de banda da fonte óptica não cubra toda a região de acoplamento deste modo é uma vantagem que as redes acopladas apresentam em relação às LPG.

Tabela 7: Parâmetros da rede SE10.

	Comprimento de onda (nm)	Largura de banda (nm)	Eficiência
Vale 1	1.457,60 ± 0.05	4,2 ± 0,1	-3,35 dB
Vale 2	1.462,96 ± 0.05	2,4 ± 0,1	-4,24 dB
Vale 3	1.468,30 ± 0.05	2,8 ± 0,1	-4,24 dB
Vale 4	1.473,74 ± 0.05	2,8 ± 0,1	-4,70 dB
Vale 5	1.479,22 ± 0.05	2,7 ± 0,1	-5,28 dB
Vale 6	1.484,55 ± 0.05	2,6 ± 0,1	-5,64 dB
Vale 7	1.490,16 ± 0.05	3,1 ± 0,1	-6,02 dB
Vale 12	1.495,78 ± 0.05	3,3 ± 0,1	-5,03 dB
Vale 13	1.500,34 ± 0.05	2,9 ± 0,1	-5,56 dB
Vale 14	1.506,17 ± 0.05	2,5 ± 0,1	-6,81 dB
Vale 15	1.512,05 ± 0.05	3,0 ± 0,1	-6,56 dB
Vale 16	1.517,54 ± 0.05	2,8 ± 0,1	-5,92 dB
Vale 17	1.523,37 ± 0.05	3,0 ± 0,1	-5,82 dB
Vale 18	1.529,49 ± 0.05	2,8 ± 0,1	-4,87 dB
Vale 19	1.535,01 ± 0.05	3,0 ± 0,1	-4,36 dB
Vale 20	1.541,18 ± 0.05	2,5 ± 0,1	-4,49 dB
Vale 21	1.559,05 ± 0.05	3,2 ± 0,1	-4,00 dB
Vale 22	1.565,86 ± 0.05	3,6 ± 0,1	-3,94 dB
Vale 23	1.572,25 ± 0.05	4,0 ± 0,1	-3,96 dB
Vale 24	1.578,29 ± 0.05	4,5 ± 0,1	-4,21 dB
Vale 25	1.585,14 ± 0.05	3,2 ± 0,1	-4,51 dB
Vale 26	1.592,78 ± 0.05	3,7 ± 0,1	-4,49 dB
Vale 27	1.603,83 ± 0.05	4,8 ± 0,1	-3,79 Db
Vale 28	1.613,25 ± 0.05	4,5 ± 0,1	-4,27 dB
Vale 29	1.623,54 ± 0.05	4,5 ± 0,1	-4,77 dB

O espaçamento médio entre vales da rede SE10 foi de aproximadamente 5 nm.

## 4.2 PRODUÇÃO DAS REDES DE BRAGG CORRÍDAS

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos na produção das redes de Bragg para utilização como sensor de índice de refração.

Os resultados obtidos na monitoração do comprimento de onda de Bragg durante o tratamento químico são mostrados na figura 36. Estes resultados mostram que após um intervalo de 279 minutos o espectro de reflexão desaparece totalmente indicando o final do processo de corrosão, e possibilitam estimar a taxa de corrosão em  $0,448 \pm 0,002 \mu\text{m}/\text{min}$ . A figura 36 também mostra a evolução do diâmetro da fibra ao longo do processo de corrosão.

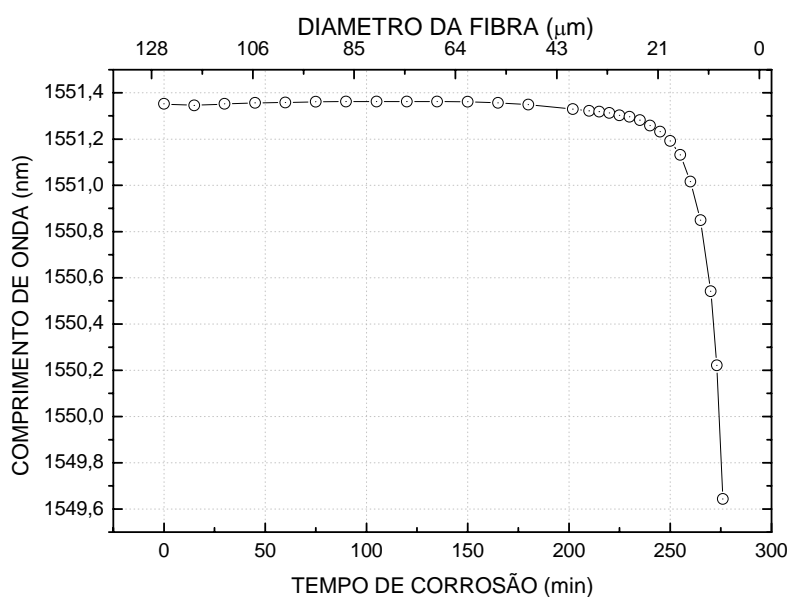


Figura 36 – Evolução do comprimento de onda de Bragg (medido) e diâmetro da fibra (calculado) em função do tempo de corrosão.

Com estes dados uma nova rede foi corroída, mas neste caso o processo de corrosão foi interrompido em intervalos de tempos iguais a 245, 255, 258 e 262 minutos, resultando em redes com diâmetros de ,  $(15,0 \pm 0,5)$ ,  $(10,0 \pm 0,5)$  e  $(9,0 \pm 0,5)$  e  $(8,0 \pm 0,5) \mu\text{m}$ . Para cada um destes diâmetros foi realizada uma caracterização quanto a sua sensibilidade ao índice de refração e uma análise da sensibilidade cruzada entre temperatura e índice de refração que serão discutido em secções posteriores.



### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES DA LPG

#### 4.3.1 Sensibilidade ao índice de refração da LPG

As amostras utilizadas para a caracterização da sensibilidade ao índice de refração do meio externo ( $S$ , equação 23) foram: ar, água, etanol, nafta, tiner, aguarrás e querosene. Utilizando a equação de Cauchy de três termos e os resultados obtidos na caracterização óptica das amostras o índice de refração de cada amostra foi calculado em 1.550 nm, estes valores são mostrados na tabela 8.

Os resultados da caracterização da sensibilidade da rede RP01A1 (parâmetros na tabela 3, pág. 55) ao índice de refração do meio externo (dada em nanômetros por unidade de índice de refração, nm/UIR) são mostrados na figura 37. Nesta figura os pontos representam os dados experimentais, a linha em vermelho representa o ajuste teórico do deslocamento do vale de ressonância em função do índice de refração do meio externo [equação (22)] para valores de índice do meio externo menores que o valor do índice de refração da casca da fibra. A linha contínua representa a sensibilidade da rede ao índice de refração do meio externo obtida a partir da derivada da equação (22) [equação (23)]. Durante a caracterização a temperatura manteve-se em  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ .

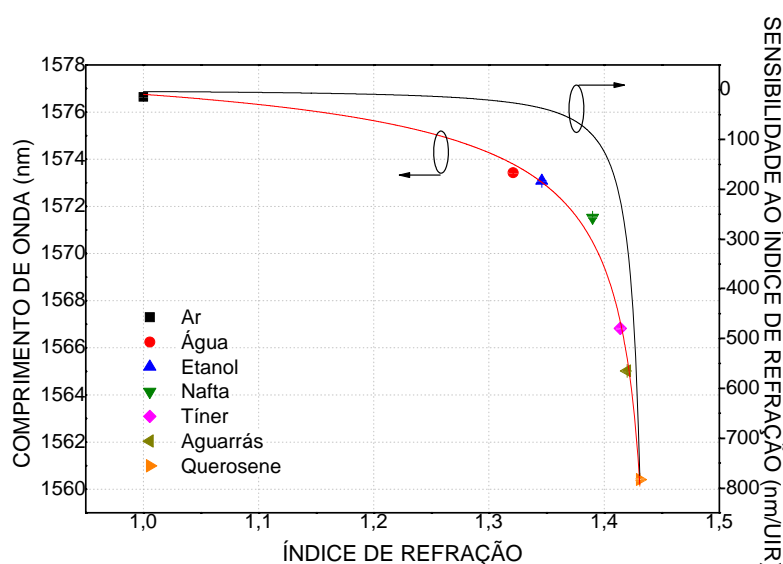


Figura 37 – Resultados experimentais e ajuste teórico da caracterização da sensibilidade ao índice de refração. A sensibilidade é obtida a partir da derivada do ajuste teórico.

Os parâmetros do ajuste mantidos fixos foram:  $\Lambda = 595 \mu\text{m}$ ,  $n_{\text{ex}0} = 1,000$ ,  $r = 62,5 \mu\text{m}$ , e os parâmetros variáveis foram:  $u_{\infty} = (12,12 \pm 0,95)$ ,  $\lambda^m = (1.576,8 \pm 0,5) \text{ nm}$  e  $n_{\text{ca}} = (1,444 \pm 0,004)$ . A raiz de Bessel  $J_0$  mais próxima do valor encontrado no ajuste,  $u_{\infty}$ , é 11,79, correspondendo ao modo de casca de quarta ordem ( $\text{LP}_{04}$ ) (Spiegel, 1973).

Os maiores deslocamentos são obtidos quando o índice de refração do meio externo se aproxima do valor do índice de refração da casca como previsto pela equação (22). Na tabela 8 são mostrados os valores das sensibilidades ao índice de refração do meio externo quando a rede é mantida na presença de cada uma das amostras, para uma temperatura de  $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ . Um aumento de aproximadamente 84 vezes pode ser observado na sensibilidade ao índice de refração externo quando o índice externo varia de 1,000 (ar) para 1,431 (querosene).

Tabela 8: Índice de refração e sensibilidades, em 1550 nm, das amostras utilizadas nas caracterizações das sensibilidades.

Amostras	Índice de refração (em 1550 nm)	Sensibilidade ao índice de refração (nm/UIR)
Ar	1,000	$-5,0 \pm 0,1$
Água	1,321	$-33,9 \pm 0,1$
Etanol	1,346	$-46,3 \pm 0,1$
Nafta	1,390	$-99,8 \pm 0,1$
Tíner	1,414	$-195,1 \pm 0,1$
Aguarrás	1,420	$-244,1 \pm 0,1$
Querosene	1,431	$-418,1 \pm 0,1$

#### 4.3.2 Sensibilidade à temperatura

A resposta da LPG RP01A1 à variação de temperatura quando esta está imersa nas diferentes amostras é mostrada na figura 38. A equação (24) é utilizada para fazer o ajuste aos pontos experimentais, os parâmetros do ajuste são os mesmos utilizados e obtidos no ajuste mostrado na figura 38 e o raio do núcleo utilizado foi  $4 \mu\text{m}$ .

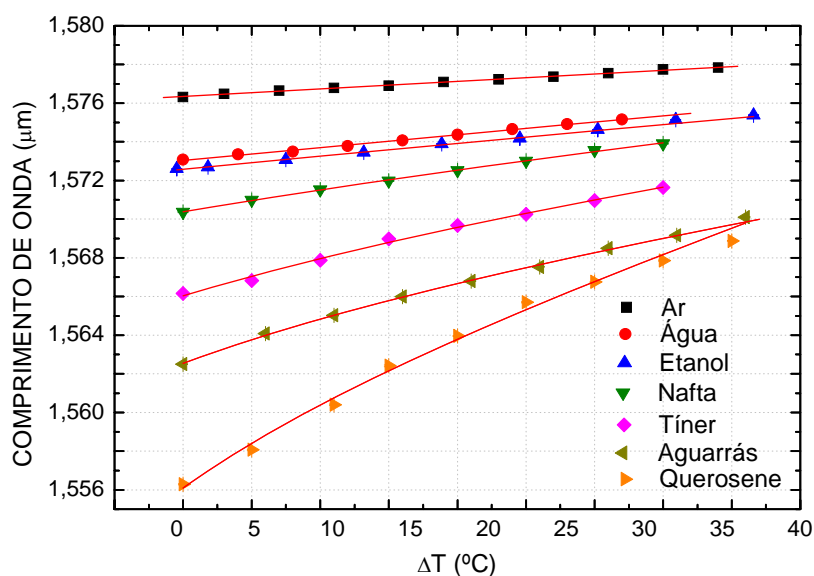


Figura 38 – Resposta da LPG à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste teórico, equação 24.

Como esperado um deslocamento para maiores comprimentos de onda do vale de ressonância pode ser observado com o aumento da temperatura. Para as amostras com maiores valores de índice de refração é possível observar um maior deslocamento do comprimento de onda do vale de ressonância. Além disso para estas mesmas amostras também é possível observar uma não linearidade no deslocamento do comprimento de onda.

A análise destas características no deslocamento em comprimento de onda do vale de ressonância pode ser realizada a partir da sensibilidade à temperatura obtida através da derivada numérica dos ajustes mostrados na figura 38. A figura 39 mostra a variação da sensibilidade à temperatura em função do aumento da temperatura.

No gráfico apresentado na figura 39 nota-se que quando os meios no qual a rede está imersa são ar, água e etanol a sensibilidade térmica mantém-se constante, dentro das incertezas, com a variação de temperatura. Enquanto que quando o meio externo é nafta, tíner, aguarrás ou querosene há uma diminuição na sensibilidade térmica com o aumento da temperatura. Outra característica que pode ser notada pelo gráfico mostrado na figura 39 é o aumento da sensibilidade térmica com o aumento do índice de refração.

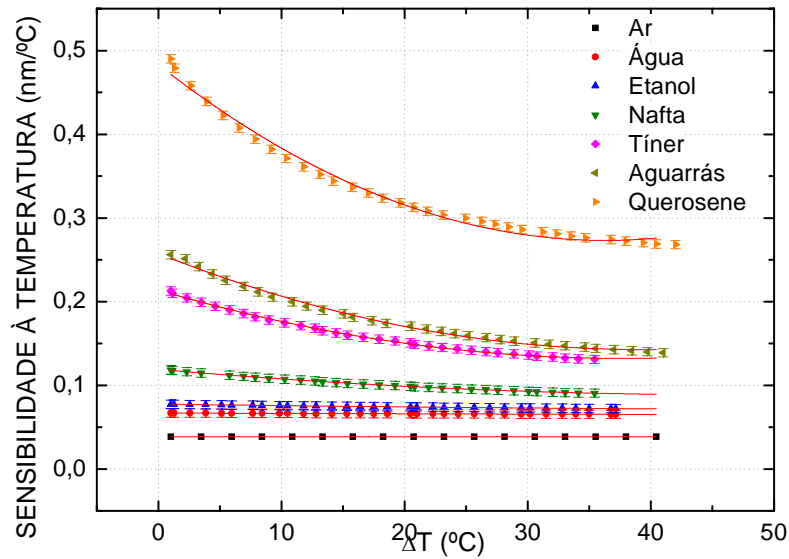


Figura 39 – Variação da sensibilidade da LPG quando a rede está imersa nas diferentes amostras em função do aumento de temperatura.

Estes comportamentos são devidos a dois fatores: a variação do índice de refração do meio externo (resultado do efeito termo-óptico do meio material) e a influência do índice de refração do meio externo no coeficiente termo-óptico de acoplamento, equação (20). O aumento da temperatura causa uma diminuição no índice de refração do meio externo e esta variação causa um deslocamento em comprimento de onda para maiores valores, como pode ser observado no gráfico mostrado na figura 37. Este deslocamento é mais significativo para substâncias com maior índice de refração, pois estas estão na região de alta sensibilidade da rede ao índice de refração externo, esta é uma das contribuições que levam ao aumento da sensibilidade térmica com o aumento do índice. Com a diminuição do índice de refração, devido ao aumento de temperatura, há também um deslocamento da sensibilidade ao índice de refração da região de alta sensibilidade em direção a região de baixa sensibilidade, como também pode ser observado no gráfico da figura 37. Esta variação na sensibilidade ao índice de refração faz com os deslocamentos para maiores comprimentos de onda devidos a diminuição do índice de refração externo (devido ao efeito termo-óptico) seja menor para maiores valores de temperatura e isso causa a não linearidade tanto nos deslocamento do comprimento de onda (figura 38) quanto na sensibilidade térmica (figura 39).

O segundo fator relacionado ao aumento da sensibilidade e as não linearidades observadas é a influência do índice de refração externo no coeficiente termo-óptico de acoplamento. Com pode ser visto pela equação (20) este parâmetro depende do índice de refração efetivo dos modos de núcleo e de casca, o índice de refração efetivo do modo de casca por sua vez depende do índice de refração do meio externo. Portanto variações no índice de refração do meio externo causarão mudanças no coeficiente termo-óptico de acoplamento. O ajuste do modelo proposto por He *et al* (He *et al*, 2002) aos resultados da caracterização da resposta da rede à variação de temperatura fornece os valores do coeficiente termo-óptico quando a rede está imersa em cada uma das amostras. A figura 40 mostra a dependência do coeficiente termo-óptico de acoplamento em função do índice de refração do meio externo e a tabela 9 mostra os valores obtidos.

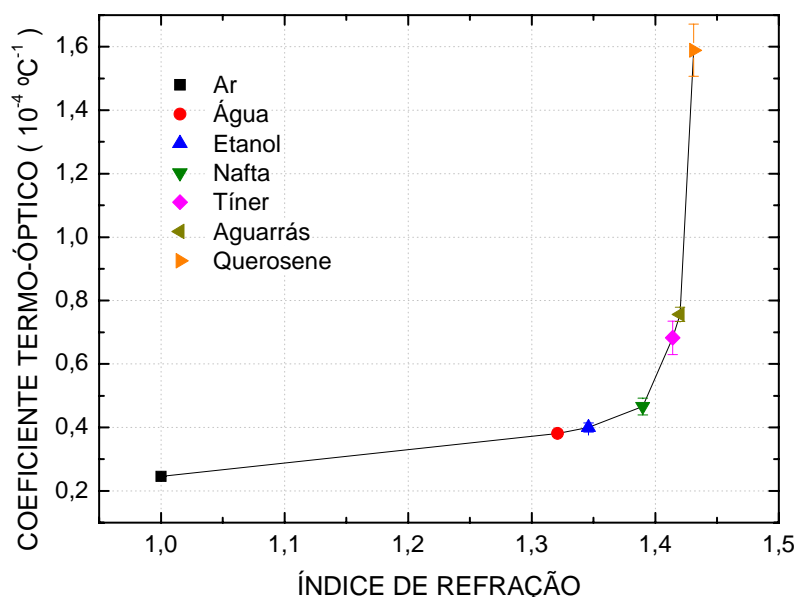


Figura 40 – Dependência do coeficiente termo-óptico de acoplamento com o índice de refração do meio externo. Valores obtidos com os ajustes mostrados na figura 38. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.

No gráfico da figura 40 pode-se observar um aumento no coeficiente termo-óptico de acoplamento com o aumento do índice de refração resultando em um aumento na sensibilidade térmica quando o índice de refração do meio externo também aumenta.

Tabela 9: Coeficiente termo-óptico de acoplamento para diferentes meios externos.

Amostras	Índice de refração (em 1550 nm)	Coeficiente termo-óptico ( $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Ar	1,000	$2,45 \pm 0,04$
Água	1,321	$3,81 \pm 0,09$
Etanol	1,346	$4,00 \pm 0,01$
Nafta	1,390	$4,66 \pm 0,26$
Tíner	1,414	$6,82 \pm 0,52$
Aguarrás	1,420	$7,56 \pm 0,23$
Querosene	1,431	$15,89 \pm 0,82$

#### 4.3.3 Sensibilidade à deformação longitudinal

O gráfico mostrado na figura 41 mostra a resposta da rede à deformação longitudinal quando esta está imersa nas diferentes amostras. A sensibilidade à deformação longitudinal é obtida a partir de um ajuste linear aos resultados experimentais e é mostrada na tabela 10.

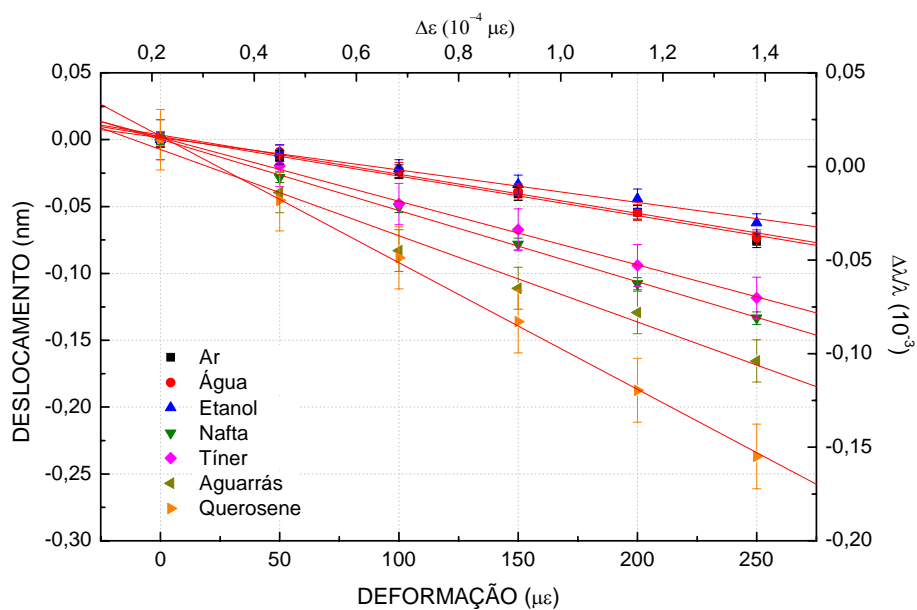


Figura 41 – Eixo da esquerda, resposta da LPG à deformação longitudinal (eixo inferior) na presença de diferentes meios externos. No eixo superior está representada a deformação normalizada do período da rede versus o deslocamento em comprimento de onda normalizado (eixo da direita). As barras de erros estão relacionadas ao eixo esquerdo.

Os resultados obtidos mostram um aumento na sensibilidade com o aumento do índice de refração do meio externo. O coeficiente fotoelástico pode ser obtido a partir do gráfico do deslocamento normalizado ( $\Delta\lambda^m/\lambda^m$ ) versus a deformação normalizada ( $\Delta\varepsilon = \Delta\Lambda/\Lambda$ ) [equação (18)] também mostrado na figura 41. Os valores obtidos para os coeficientes fotoelásticos para cada uma das amostras são mostrados na tabela 10 e no gráfico da figura 42.

Tabela 10: Sensibilidade à deformação longitudinal e coeficiente fotoelástico da LPG para diferentes meios externos.

Amostras	Sensibilidade à deformação longitudinal (pm/ $\mu\varepsilon$ )	Coefficiente fotoelástico ( $\mu\varepsilon^{-1}$ )
Ar	$-0,29 \pm 0,02$	$-0,42 \pm 0,03$
Água	$-0,29 \pm 0,02$	$-0,41 \pm 0,04$
Etanol	$-0,24 \pm 0,03$	$-0,34 \pm 0,04$
Nafta	$-0,53 \pm 0,02$	$-0,75 \pm 0,03$
Tíner	$-0,47 \pm 0,07$	$-0,68 \pm 0,10$
Aguarrás	$-0,64 \pm 0,07$	$-0,92 \pm 0,10$
Querosene	$-0,94 \pm 0,11$	$-1,35 \pm 0,16$

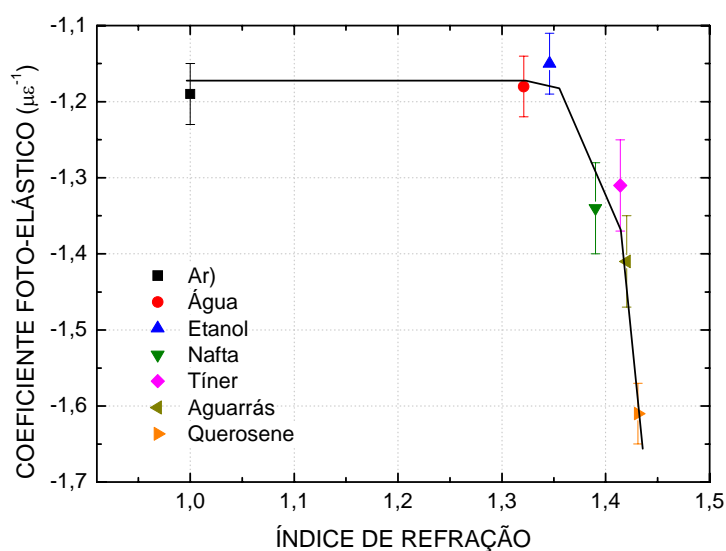


Figura 42 – Dependência do coeficiente elasto-óptico com o índice de refração do meio externo. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.

Assim como no caso do coeficiente termo-óptico, o coeficiente fotoelástico também apresenta uma dependência com o índice de refração do meio externo e consequentemente a sensibilidade a deformações longitudinais depende do índice de refração externo. Esta dependência está relacionada ao coeficiente fotoelástico que é dependente do índice de refração efetivo dos modos de casca [equação (21)].

#### 4.4 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES DA CLPG

##### 4.4.1 Contribuição dos segmentos das redes acopladas em série

A figura 43 mostra o espectro de transmissão da rede SE01 quando apenas uma LPG está imersa em água, quando as duas LPG estão imersas em água e quando todo o dispositivo (LPG + cavidade + LPG) está imerso em água.

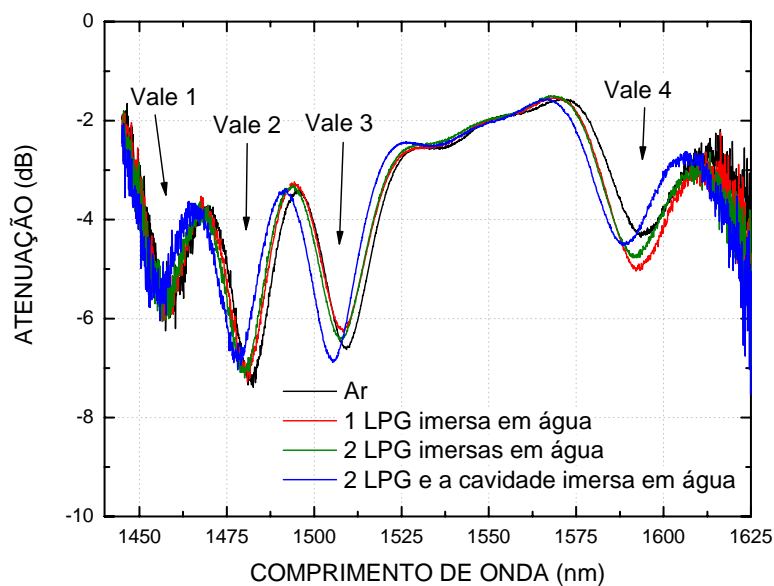


Figura 43 – Espectro de transmissão da CLPG quando cada um dos segmentos (LPG + cavidade + LPG) está imerso em água.

Nesta caracterização os vales 1 e 2 não foram analisados devido às suas posições, em comprimento de onda, estarem próximas ao limite da fonte óptica. A baixa intensidade da



fonte óptica gera uma relação sinal/ruído que resulta em uma grande incerteza na determinação da posição do comprimento de onda dos vales de atenuação.

Os deslocamentos médios dos vales da LPG, do vale 3 e do vale 4 da CLPG para uma mudança de meio externo de ar ( $n = 1,000$ ) para água ( $n = 1,321$ ) foram 1,1, 1,9 e 4,1 nm, respectivamente. Os deslocamentos quando todo o dispositivo está imerso em água é aproximadamente quatro vezes maior do que quando apenas uma LPG está imersa em água. Além disso, quando as duas LPG estão imersas em água o deslocamento em comprimento de onda é duas vezes maior do que quando apenas uma LPG está imersa. Isso mostra que a contribuição mais significativa para o deslocamento em comprimento de onda quando todo o dispositivo está imerso é devido à cavidade. Portanto, o aumento da sensibilidade ao índice de refração deve-se ao fato do dispositivo ser composto por duas LPG e ainda a cavidade que contribui mais significativamente que as LPG.

#### 4.4.2 Sensibilidade da CLPG ao índice de refração do meio externo

Nesta subsecção os resultados obtidos na caracterização da sensibilidade ao índice de refração do meio externo da CLPG SE01 serão comparados com a sensibilidade de uma LPG. A figura 44 mostra os deslocamentos em comprimento de onda da LPG e dos vales 3 e 4 da CLPG quando estes dispositivos estão completamente imersos em cada uma das amostras. Como não há um modelo teórico que descreva os deslocamentos em comprimento de onda dos vales de uma CLPG uma equação racional empírica foi utilizada no ajuste dos dados experimentais:

$$\lambda = \frac{(b + n)}{(a + cn)} \quad (29)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $n$  é o índice de refração e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros de ajuste.

As sensibilidades ao índice de refração da LPG e dos vales das CLPG é obtida a partir da derivada numérica ( $d\lambda/dn$ ) das curvas de ajuste mostradas na figura 44 e são mostradas na figura 45, para uma temperatura de  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Para propósitos de comparação as sensibilidades são consideradas em duas regiões: a de baixa sensibilidade ( $1,000 \leq n \leq 1,350$ ), quando a amostra possui o índice de refração muito menor que o índice de refração da casca da fibra óptica, e a de alta sensibilidade ( $1,415 \leq n \leq 1,431$ ), quando a amostra possui o índice

de refração próximo ao índice de refração da casca da fibra óptica. Os valores destas sensibilidades são calculados no centro das regiões de baixa e alta sensibilidade, em nm/UIR sendo  $-5,7$  e  $-379,0$  (LPG),  $-6,6$  e  $-616,0$  (vale 3 da CLPG) e  $-10,5$  e  $-896,0$  (vale 4 da CLPG).

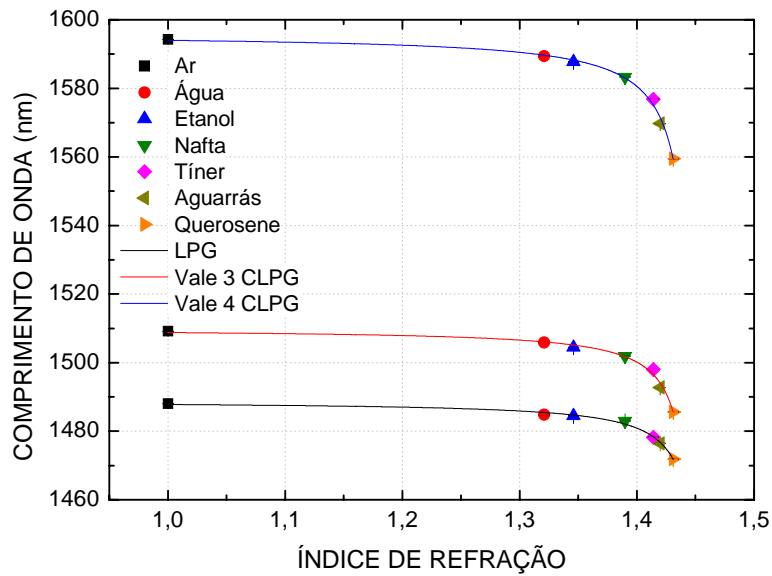


Figura 44 – Resultados experimentais da caracterização da sensibilidade ao índice de refração de uma LPG e dos vales 3 e 4 da CLPG SE01. A curva representa o ajuste empírico dado pela equação 29.

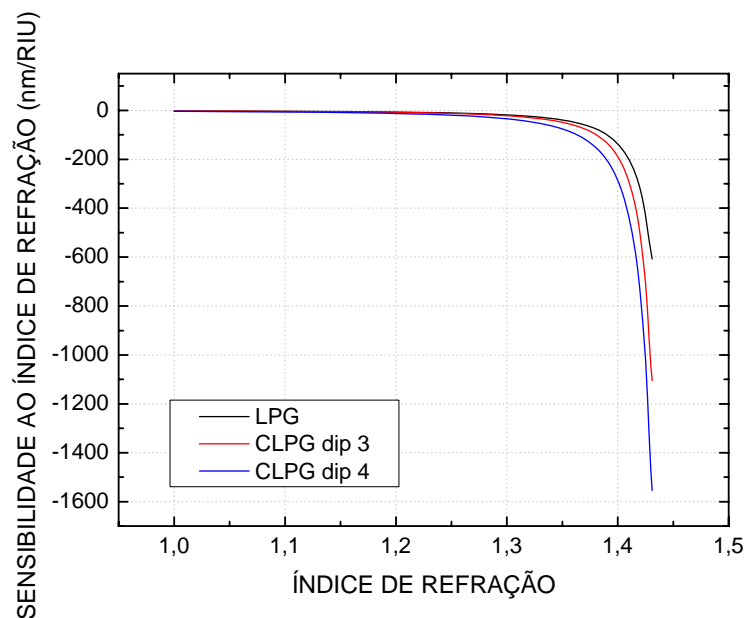


Figura 45 – Sensibilidades ao índice de refração do meio externo para a LPG, o vale 3 da CLPG e o vale 4 da CLPG SE01. As sensibilidades foram obtidas a partir da derivada numérica do ajuste empírico mostrado na figura 44.

Analisando a sensibilidade dos vales 3 e 4 da CLPG pode-se notar, na região de alta sensibilidade, um aumento de aproximadamente 1,6 e 2,4 vezes quando comparado com a sensibilidade da LPG. O vale 4 apresenta uma sensibilidade maior porque ele é gerado pelo acoplamento de um modo de maior ordem do que o vale 3 como discutido no final da subsecção 4.1.5. A máxima sensibilidade obtida  $-1554,1 \text{ nm/UIR}$  permite que o sensor opere com uma resolução de aproximadamente  $6 \times 10^{-6}$  para medidas de índice de refração, se um analisador de espectros ópticos com estabilidade em comprimento de onda de  $\pm 5 \text{ pm}$  é utilizado, enquanto que para a LPG esta resolução é de aproximadamente  $1,6 \times 10^{-5}$ .

#### 4.4.3 Sensibilidade térmica da CLPG

A figura 46 mostra o comportamento do comprimento de onda do vale 3 da CLPG SE01 em função da temperatura, este vale foi escolhido pois com o aumento da temperatura o vale 4 desloca para fora da banda de emissão do LED. Como não há um modelo teórico que descreva este comportamento foram analisados os resultados de vários ajustes de funções empíricas (polinomiais e racionais) e a função que forneceu o resultado (derivada da resposta a variação de temperatura) mais semelhante ao mesmo resultado encontrado com o modelo teórico para o caso da LPG (figura 39) foi:

$$\lambda = \frac{b + cT}{1 + aT} \quad (30)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda (em nm),  $T$  é a temperatura (em °C) e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros de ajuste.

A sensibilidade térmica é obtida a partir da derivada numérica da função de ajuste e é mostrada na figura 47. A figura 48 mostra em detalhe a sensibilidade térmica para as substâncias com menor índice de refração (ar, água, etanol e nafta).

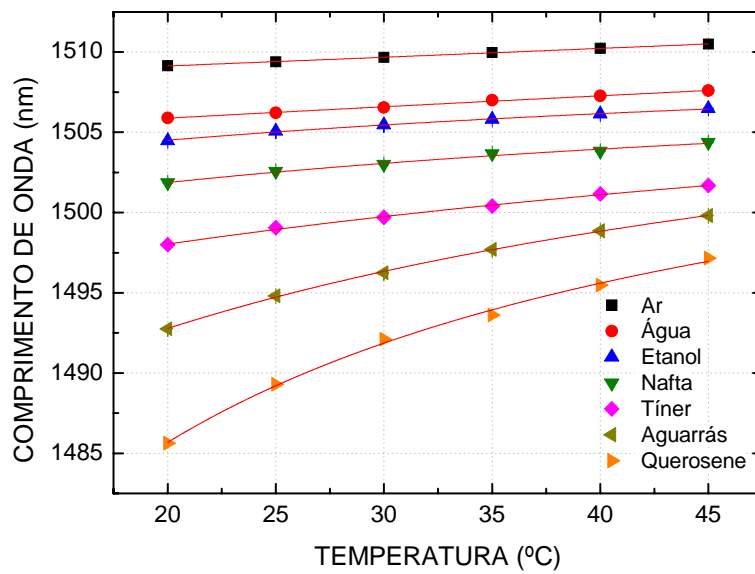


Figura 46 – Resposta do vale 3 da CLPG SE01 à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste empírico, equação 30.

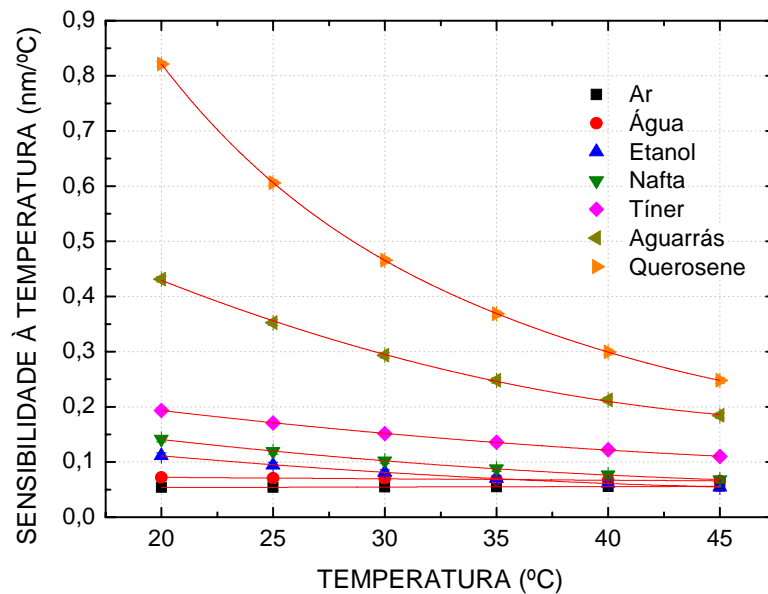


Figura 47 – Variação da sensibilidade da CLPG SE01 quando a rede está imersa nas diferentes amostras em função do aumento de temperatura.

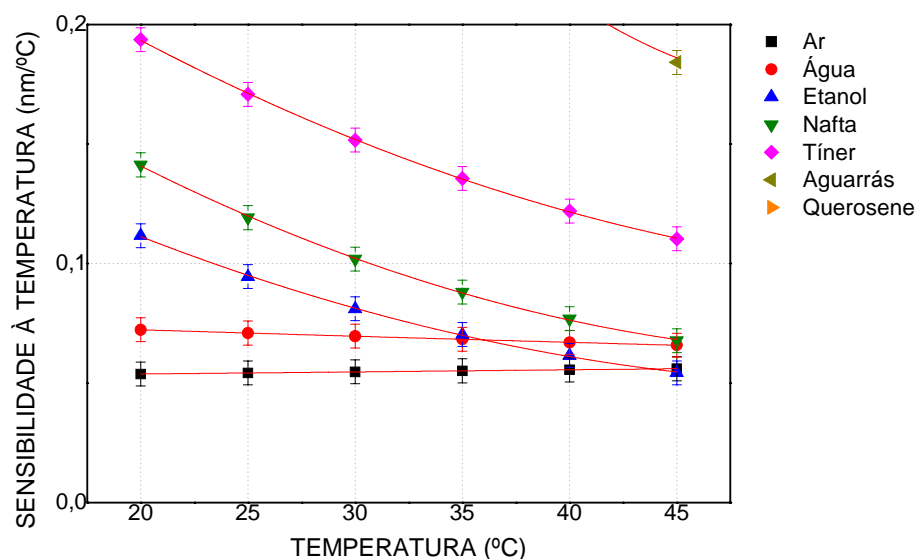


Figura 48 – Variação da sensibilidade da CLPG SE01, em detalhe, quando a rede está imersa nas amostras com menor índice de refração em função do aumento de temperatura.

Assim como no caso da LPG pode-se observar que a sensibilidade à temperatura depende do índice de refração do meio externo e que para determinadas amostras um comportamento não-linear pode ser observado. No caso das CLPG a não linearidade pode ser observada a partir do etanol (que para o caso da LPG esta sensibilidade apresentava um comportamento linear), isto se deve ao fato da maior sensibilidade devido a contribuição das duas redes e da cavidade como observado na secção 4.4.1.

#### 4.4.4 Sensibilidade da CLPG à deformação longitudinal

Os resultados da caracterização da sensibilidade do vale 3 da CLPG SE01 à deformação longitudinal são mostrados na figura 49. Assim como na LPG o aumento da deformação longitudinal causa um deslocamento para menores comprimentos de onda e o aumento do índice de refração externo causa um aumento na sensibilidade. Os valores obtidos para as sensibilidades à deformação longitudinal quando o dispositivo está imerso nas diferentes amostras é mostrado na tabela 11.

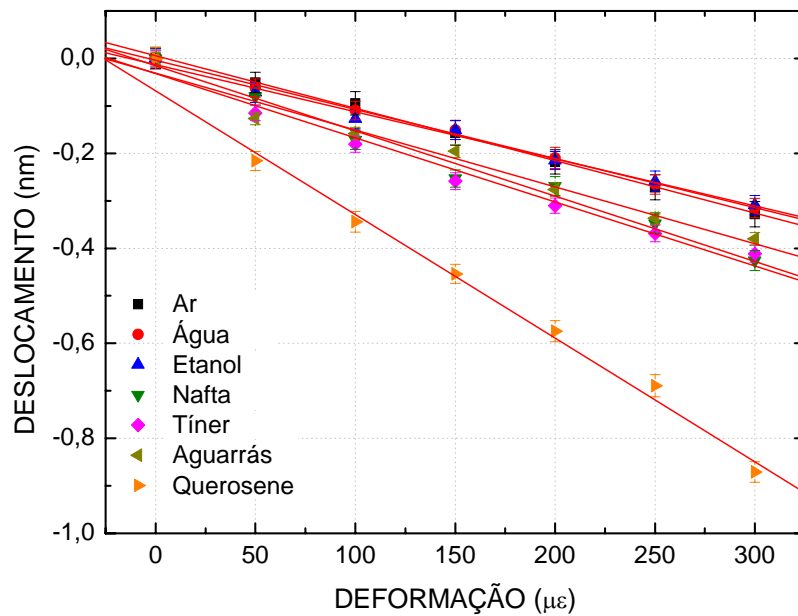


Figura 49 – Resposta do vale 3 da CLPG à deformação longitudinal quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste linear.

Tabela 11: Sensibilidade à deformação longitudinal da CLPG para diferentes externos.

Amostras	Sensibilidade à deformação longitudinal (pm/με)
Ar	$-1,10 \pm 0,09$
Água	$-1,03 \pm 0,08$
Etanol	$-0,99 \pm 0,08$
Nafta	$-1,37 \pm 0,07$
Tíner	$-1,35 \pm 0,06$
Aguarrás	$-1,20 \pm 0,05$
Querosene	$-2,60 \pm 0,04$

As sensibilidades das CLPG à deformação longitudinal apresentaram um grande aumento quando comparadas com às sensibilidades das LPG. Quando o meio externo é o ar o vale 3 da CLPG apresenta uma sensibilidade de  $(-1,10 \pm 0,09)$  pm/με, que foi aproximadamente igual a sensibilidade da LPG quando esta estando imersa em querosene,  $(-0,94 \pm 0,11)$  pm/με. Neste caso o aumento da sensibilidade da CLPG se deve não somente a

mudança do índice efetivo dos modos de casca mas também a mudança no comprimento da cavidade devido a deformação longitudinal.

#### 4.5 APLICAÇÕES DA LPG E DA CLPG COMO ELEMENTO SENSOR

##### 4.5.1 LPG como sensor de presença de hidrocarbonetos em água

A figura 50 mostra o comportamento térmico do vale de atenuação da LPG (círculos fechados) e do pico de reflexão da FBG (círculos abertos) (KAMIKAWACHI *et al*, 2004a). Os coeficientes de sensibilidade térmica obtidos pelo ajuste de uma função linear aos dados experimentais foram  $\alpha_{LPG} = (0,077 \pm 0,002) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e  $\alpha_{FBG} = (0,0139 \pm 0,0003) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  para a LPG e para a FBG respectivamente. Os coeficientes de correlação destes ajustes foram  $r = 0,99708$  e  $r = 0,99737$  para a LPG e para a FBG respectivamente.

Os resultados obtidos na caracterização térmica da LPG e da FBG quando estas estão imersas em água foram utilizados na correção do deslocamento do vale de atenuação da LPG devido à variação de temperatura, os valores corrigidos (equação 27) são mostrados na tabela 12.

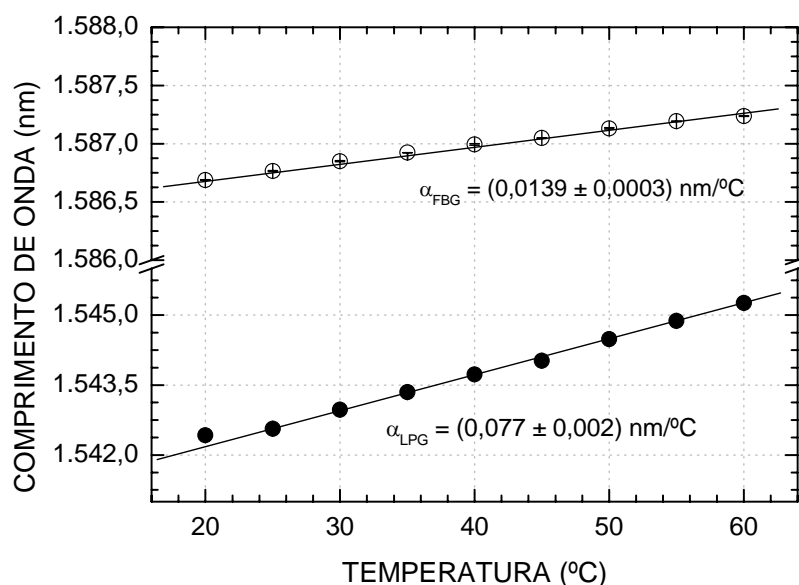


Figura 50 – Comportamento térmico da LPG e da FBG ambas imersas em água.

Tabela 12: Comparação entre os comprimentos de onda do vale de atenuação, medidos e calculados, para uma variação de temperatura de 20 °C a 40 °C quando a rede está imersa em água.

Temperatura	Comprimento de onda medido $\lambda_m$	Comprimento de onda calculado $\lambda_c$
20 °C	1.542,42 nm	1.542,42 nm
25 °C	1.542,56 nm	1.542,16 nm
30 °C	1.542,97 nm	1.542,12 nm
35 °C	1.543,35 nm	1.542,12 nm
40 °C	1.543,72 nm	1.542,12 nm

Na figura 51 são mostrados os deslocamentos do comprimento de onda da LPG ao longo do tempo (em relação ao comprimento de onda no ar) quando a rede é utilizada como elemento sensor para detectar as seguintes amostras de hidrocarbonetos: aguarrás, gasolina, querosene e tiner, a uma temperatura de  $(20 \pm 1)$  °C. Durante os 150 segundos iniciais a LPG está imersa em água. Após este tempo, um deslocamento do comprimento de onda central ocorre quando a LPG entra em contato com a amostra de hidrocarboneto. A partir de 330 segundos a rede está novamente em contato com água e o comprimento de onda desloca-se em direção ao seu valor inicial. Na tabela 13 são mostrados os valores do deslocamento do comprimento de onda central quando a LPG entra em contato com cada uma das mostras de hidrocarboneto.

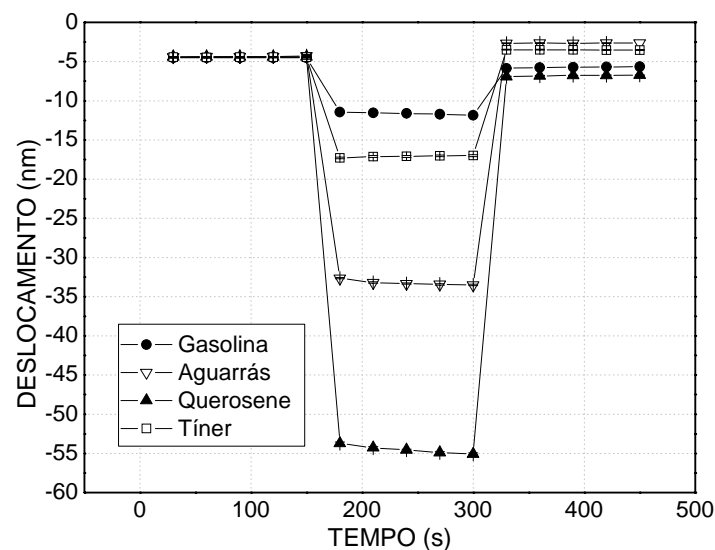


Figura 51 – Deslocamento do comprimento de onda devido à presença de gasolina, aguarrás, querosene e tiner em ambiente hídrico.



Tabela 13: Comprimentos de onda medidos para a caracterização da LPG como sensor de hidrocarbonetos em ambiente hídrico.

Amostra de hidrocarboneto	Deslocamento (nm)
Gasolina	-5,23
Aguarrás	-31,0
Querosene	-49,88
Tíner	-14,45

A influência da variação de temperatura nestas caracterizações pode ser analisada a partir do método de compensação dos efeitos térmicos discutidos anteriormente e cujos resultados apresentaram uma variação máxima de 0,3 nm (tabela 12). Esta variação está bem abaixo do menor deslocamento obtido nestas caracterizações (5,23 nm para a gasolina) permitindo distinguir os deslocamentos provocados pela variação de temperatura dos deslocamentos provocados pela presença dos poluentes. Os deslocamentos obtidos são distintos para cada substância analisada, o que permite a detecção e a identificação da mistura de hidrocarboneto. O fato de que o vale de atenuação da LPG não retorna a sua posição inicial após a detecção do hidrocarboneto (devido a adsorção de hidrocarbonetos sobre a fibra) não é um problema, uma vez que em trabalhos anteriores (KAMIKAWACHI, 2003) verificou-se que um fluxo de água não contaminada pode remover a quantidade de hidrocarboneto residual sobre a rede e ainda a rede pode ser limpa com álcool isopropílico. O intervalo entre medidas sucessivas foi de 30 segundos, estando associado à forma de aquisição dos dados, neste caso utilizando como saída uma unidade de disquete. Este intervalo de tempo pode ser reduzido conectando o OSA diretamente a um computador, assim o intervalo de tempo será limitado pela faixa espectral e o número de pontos utilizados no OSA.

#### 4.5.2 Desempenho da LPG e da CLPG como sensor para Cr (III) e Cr (VI) em soluções aquosas

Nesta subseção serão apresentados e discutidos os resultados da caracterização da LPG como elemento sensor para o elemento cromo em soluções aquosas. Como verificado anteriormente as CLPG possuem maiores sensibilidades e também passaram por esse processo de caracterização com propósitos de comparação de desempenho.

A figura 52 mostra o comportamento do vale de atenuação da LPG na presença de diferentes concentrações de solução de cromo (KAMIKAWACHI *et al*, 2004b). Os resultados

mostram que o aumento da concentração de ambos os estados de oxidação provoca um deslocamento para maiores valores de comprimento de onda. Os deslocamentos máximos foram (em relação à posição do vale da LPG imersa em água pura) de 0,14 nm e 0,26 nm para Cr (III) e Cr (VI), respectivamente.

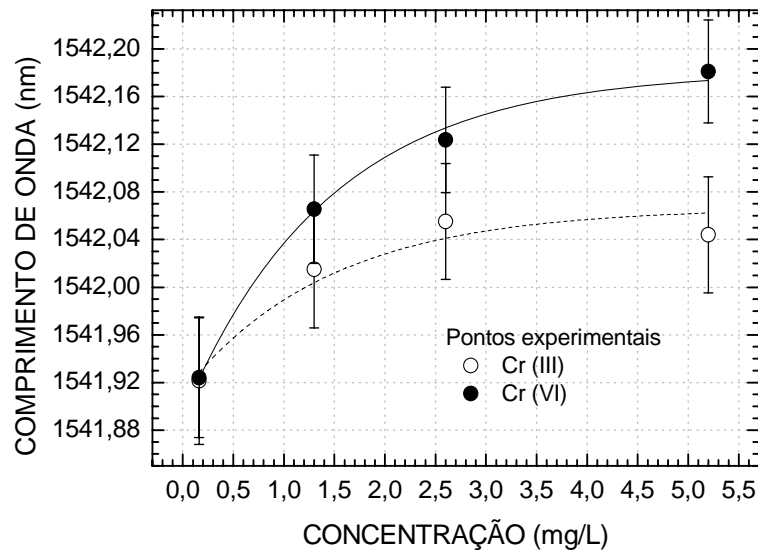


Figura 52 – Comportamento do vale de atenuação da LPG para soluções de Cr (III) e Cr (VI) em diferentes concentrações. As linhas conectando os pontos correspondem à curvas empíricas, e são apenas guias visuais.

O limite de distinção entre os estados de oxidação obtido com a caracterização da LPG foi superior a 2,6 mg/L, limite este que está acima do limite de 0,5 mg/L (para efluentes) imposto pela legislação (CONAMA nº 357/05). Além disso, devido à baixa sensibilidade, pequenas variações de temperatura ou a presença de outras substâncias causarão mudanças na resposta do dispositivo e podem levar a uma interpretação errada na detecção da concentração de cromo.

A figura 53 mostra os resultados obtidos quando duas LPG<sup>1</sup> acopladas são utilizadas como elemento sensor para o Cr (III) e o Cr (VI) em diferentes concentrações (KAMIKAWACHI *et al*, 2005). Estas redes foram gravadas aplicando apenas 1 arco elétrico em cada ponto, sendo o período de 595  $\mu\text{m}$ , 27,9 mm o comprimento total de cada rede e 4 cm a distância de separação entre as redes. As medidas foram realizadas monitorando-se a posição do quinto vale de atenuação do espectro de transmissão das redes. As concentrações

<sup>1</sup> estas redes foram gravadas antes da caracterização do processo de gravação e não foram apresentadas na secção 4.1.5

de Cr (III) e Cr (VI) que foram analisadas variam de 0,32 a 2,6 mg/L. A equação empírica utilizada para o ajuste nos pontos experimentais foi  $y = a + bx$ , onde  $y$  é o comprimento de onda do vale de atenuação (nm), e  $x$  é a concentração de cromo (mg/L). Para o Cr (VI) (linha sólida) os parâmetros do ajuste são,  $a = (1.539,74 \pm 0,01)$  nm e  $b = (0,02 \pm 0,01)$  nm L/mg sendo o coeficiente de correlação de  $r = 0,99628$ . Para o Cr (III) (linha pontilhada),  $a = (1.539,64 \pm 0,01)$  nm e  $b = (0,02 \pm 0,01)$  nm L/mg, sendo o coeficiente de correlação  $r = 0,99814$ .

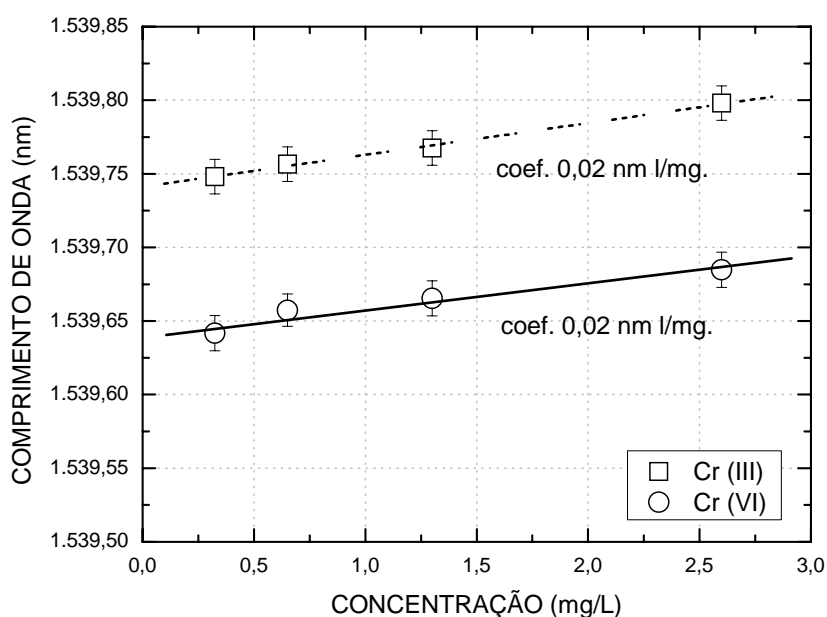


Figura 53 – Comportamento do quinto vale de atenuação de duas LPG em série para soluções de Cr (III) e Cr (VI) com diferentes concentrações.

A diferença na posição do comprimento de onda do vale de atenuação quando a rede está imersa em soluções de Cr (III) e Cr (VI), para uma mesma concentração, é de 0,1 nm. A resposta da CLPG permitiu distinguir, nestas condições, os dois estados de oxidação do cromo em concentrações menores (0,32 mg/L) que a estipulada pela legislação (0,5 mg/L). Além disso, a resposta da rede em série para a faixa de concentrações analisadas foi linear na faixa de concentrações analisada. Apesar dos comprimentos de onda serem distintos, os deslocamentos são pequenos e a influência da variação de temperatura ou a presença de outras substâncias na solução podem causar deslocamentos da mesma ordem de magnitude ou maiores, restringindo as possíveis aplicações.

#### 4.5.3 Caracterização da CLPG como sensor para detecção de hidrocarbonetos na forma gasosa

Os resultados da caracterização da CLPG SE01 como elemento sensor para a detecção de hidrocarbonetos no estado gasoso são mostrados na figura 54. O aumento do índice de refração do ambiente causado pela presença do vapor pode ser observado pelo deslocamento do comprimento de onda no sentido de menores valores após a inserção da amostra no recipiente. O comprimento de onda tende a se estabilizar quando a pressão de vapor aproxima-se do equilíbrio.

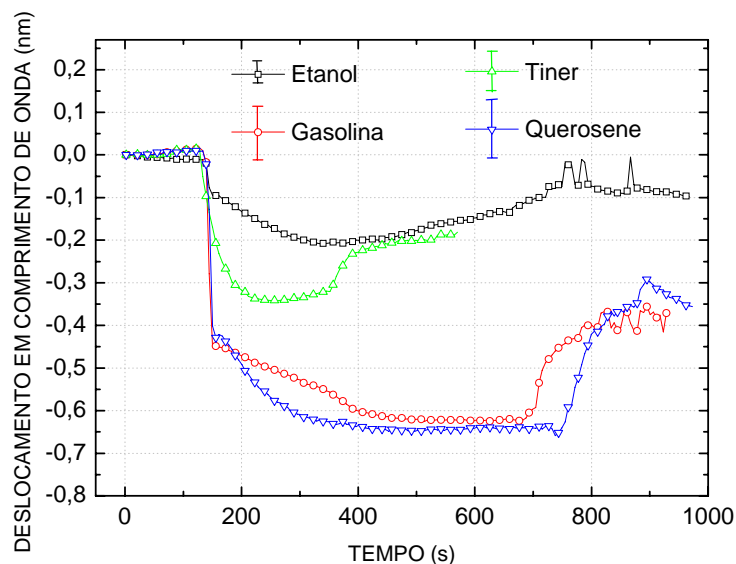


Figura 54 – Deslocamento do comprimento de onda do vale 3 da CLPG na presença do vapor de etanol e das amostras de hidrocarbonetos. A linha ligando os pontos experimentais é apenas um guia visual.

Após a abertura do recipiente o comprimento de onda desloca-se em direção ao seu valor inicial. Entretanto, como uma fina camada da amostra se deposita sobre o dispositivo o comprimento de onda não atinge seu valor inicial. Esta fina camada da amostra pode removida utilizando etanol e água. Para todas as amostras, exceto o etanol, a temperatura no interior do recipiente manteve-se constante em  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante todo o experimento. Para o etanol foi observada uma diminuição da temperatura de  $(1,0 \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C})$  durante a evaporação da substância.

O tempo para o comprimento de onda tender a estabilizar-se foi de aproximadamente 312 segundos para o etanol ( $\Delta\lambda = 0,20 \pm 0,02\text{ nm}$ ), 217 segundos para o tiner

( $\Delta\lambda = 0,33 \pm 0,05$  nm), 490 para a gasolina ( $\Delta\lambda = 0,62 \pm 0,06$  nm) e 413 para o querosene ( $\Delta\lambda = 0,64 \pm 0,07$  nm). A baixa sensibilidade térmica do vale 3 quando o dispositivo está imerso no ar (menor do que  $0,056 \pm 0,005$  nm/°C) permite, através do monitoramento da temperatura, distinguir facilmente os efeitos da variação deste parâmetro dos deslocamentos causados pela presença de vapor.

#### 4.5.4 Caracterização da sensibilidade ao índice de refração da FBG corroída

As respostas do comprimento de onda de Bragg a mudanças de índice de refração externo para redes com diâmetros de 15, 10, 9 e 8  $\mu\text{m}$  são mostradas na figura 55. A temperatura das amostras foi monitorada durante as medidas e manteve-se em  $(21,0 \pm 0,1)$  °C.

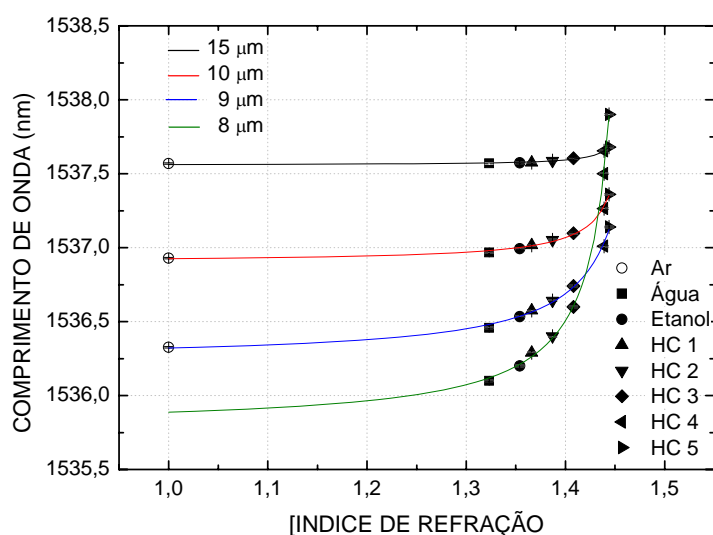


Figura 55 – Comprimento de onda de Bragg em função do índice de refração do meio externo para diâmetros de 15, 10, 9 e 8  $\mu\text{m}$ . A linha ligando os pontos experimentais representa o ajuste empírico, equação 31.

Na caracterização da sensibilidade ao índice de refração externo da rede com 8  $\mu\text{m}$  de diâmetro não foi possível observar o espectro de reflexão da rede quando esta estava imersa no ar. Uma possível explicação para este fato é que nestas condições a luz que incide na extremidade da fibra corroída é totalmente espalhada para fora da fibra, não havendo espectro de reflexão.

Para analisar a sensibilidade da rede ao índice de refração do meio externo foi ajustada aos pontos experimentais uma função empírica:

$$\lambda = \frac{b+n}{a+cn} \quad (31)$$

onde  $\lambda$  é o comprimento de onda (nm),  $n$  é o índice de refração e  $a$ ,  $b$  e  $c$  são os parâmetros de ajuste.

A sensibilidade ao índice de refração para cada diâmetro de fibra é obtida a partir da derivada numérica da função ajustada e mostrada na figura 56.

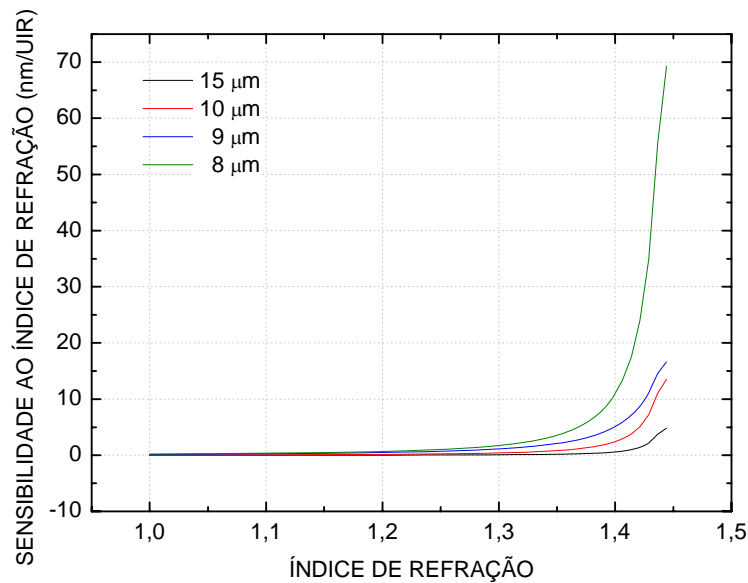


Figura 56 – Sensibilidade ao índice de refração do meio externo para FBG com diâmetros de 15, 10, 9 e 8  $\mu\text{m}$  obtida a partir da derivada numérica da função de ajuste.

Diferente da sensibilidade das LPG, as redes de Bragg corroídas apresentam uma sensibilidade ao índice externo positiva e muito menor. A sensibilidade é positiva porque o aumento do índice externo também causa um aumento no índice de refração efetivo e conseqüentemente o comprimento de onda de Bragg desloca-se para maiores valores (equação 10). No caso das LPG o aumento do índice de refração do meio causava um aumento do índice efetivo dos modos de casca e conseqüentemente o resultado da subtração  $n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}$  diminuía [equação (14)]. A sensibilidade da FBG para um índice de refração externo de 1,431 é aproximadamente 40 nm/UIR, enquanto que nas mesma condições a LPG apresentou uma sensibilidade de aproximadamente  $-418$  nm/UIR. Esta característica mostra que a influência do índice de refração do meio externo sobre o índice efetivo do modo

fundamental é muito menor no caso das FBG corroídas até um diâmetro próximo ao diâmetro do núcleo.

#### 4.5.5 Caracterização da sensibilidade à temperatura da FBG corroída

A caracterização da sensibilidade térmica foi realizada para todos os diâmetros de fibra mas aqui serão apresentados apenas os resultados obtidos no caso da fibra com 8  $\mu\text{m}$ . Este caso representa todos os comportamentos observados nas redes com diferentes diâmetros e serão suficientes para a compreensão dos fenômenos envolvidos. A figura 57 mostra a resposta da rede, com 8  $\mu\text{m}$  de diâmetro, para a variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras.

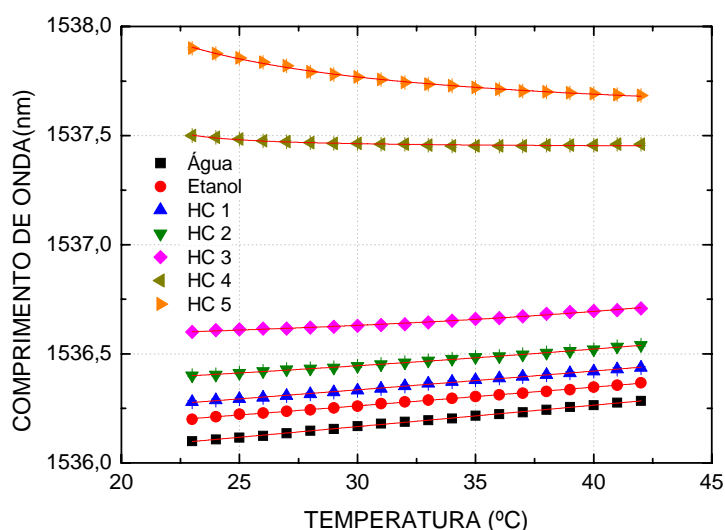


Figura 57 – Resposta da FBG com um diâmetro de 8  $\mu\text{m}$  à variação de temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras. As curvas representam o ajuste empírico, equação 30.

As curvas de resposta à variação de temperatura da rede com 8  $\mu\text{m}$  mostram que para o caso onde a FBG está imersa nas amostras HC 3, HC 4 e HC 5 um comportamento não linear pode ser observado. Além disso, para a amostra HC 5 um deslocamento para menores comprimentos de onda em toda a faixa de temperatura pode ser observado, este deslocamento negativo só pode ser observado em apenas uma amostra (HC 4) e apenas na faixa inicial de temperatura. As não linearidades podem ser analisadas a partir das sensibilidades térmicas para os diferentes meios obtida com a derivada numérica da função de ajuste.

A figura 58 mostra as sensibilidades térmicas da rede, quando esta está imersa nas diferentes amostras, obtidas a partir das derivadas das funções de ajuste. Quando a rede está imersa em água pode-se observar que a sensibilidade apresenta um comportamento linear e dentro das incertezas experimentais a magnitude mantém-se constante. Para as amostras com maior índice de refração a sensibilidade diminui, isso porque o aumento da temperatura causa uma diminuição no índice de refração (efeito termo-óptico) e conseqüentemente um deslocamento para menores valores de comprimento de onda. O deslocamento para menores comprimentos de onda se opõe ao deslocamento positivo que é resultado da sensibilidade térmica intrínseca da rede. Esta diminuição é mais significativa para substâncias com maiores índices de refração, pois nesta faixa de índice as sensibilidades ao índice de refração são maiores.

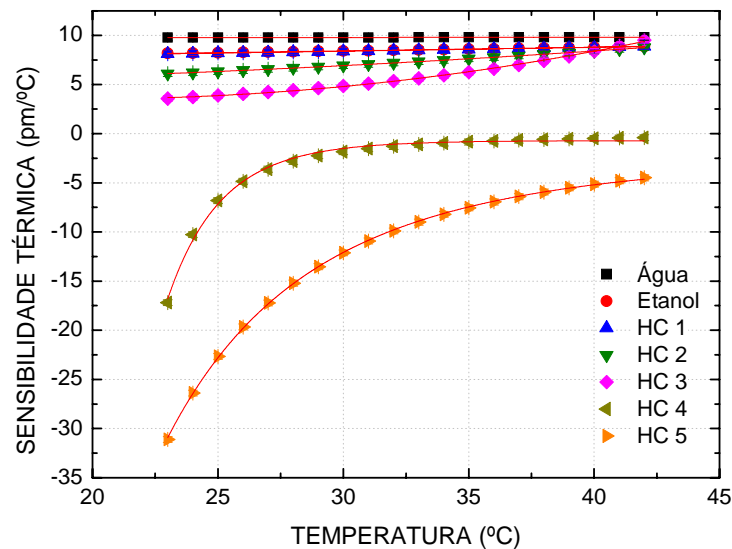


Figura 58 – Variação da sensibilidade da FBG (8  $\mu\text{m}$  de diâmetro) e função da temperatura quando a rede está imersa nas diferentes amostras, em função do aumento de temperatura.

A sensibilidade quando a rede está imersa em água apresenta um comportamento linear e constante. A magnitude da sensibilidade ( $9,8 \pm 0,3$ )  $\text{nm}/^\circ\text{C}$  é menor do que quando a rede tinha um diâmetro de  $15 \mu\text{m}$ , ( $10,3 \pm 0,3$ )  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ . Isso porque a redução do diâmetro aumentou a sensibilidade ao índice de refração de (0,11)  $\text{nm}/\text{UIR}$  para (2,35)  $\text{nm}/\text{UIR}$ . Desta forma a influência do efeito termo-óptico do meio externo é maior. Esta influência é aproximadamente constante, pois na região de índice da água ( $n = 1,332$ ) a sensibilidade ao índice de refração modifica-se muito pouco com a variação de índice de refração, figura 58.



Quando a rede está imersa em etanol e em HC 1 a sensibilidade térmica apresenta um comportamento linear mas não constante, seus valores para estas amostras aumentam de  $(8,2 \pm 0,3) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e  $(8,1 \pm 0,3)$  a  $20^\circ\text{C}$  para  $(8,9 \pm 0,3) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e  $(8,9 \pm 0,3) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  a  $42^\circ\text{C}$ , respectivamente. O aumento da sensibilidade térmica é devido à diminuição da sensibilidade ao IR, que é a responsável pelo deslocamento para menores comprimentos de onda. Esta diminuição na sensibilidade ao IR é causada pela diminuição do índice de refração da amostra devido o efeito termo-óptico. Estas duas amostras estão em uma região da sensibilidade ao IR que não tem uma variação muito grande (figura 56) com a diminuição do índice. Portanto a diminuição da sensibilidade ao IR não é rápida o suficiente para levar a um comportamento não linear na sensibilidade térmica.

Nas sensibilidades térmicas quando a rede está imersa nas amostras HC 2 e HC 3 é possível observar a não linearidade. Esta não linearidade ocorre porque estas amostras estão em uma região onde a variação da sensibilidade ao IR é maior que no casos anteriores (maior inclinação da curva no gráfico da figura 56). Desta forma a contribuição do efeito termo-óptico do meio não é constante e muda de forma mais rápida diminuindo com o aumento da temperatura e o resultado deste comportamento é o aumento da sensibilidade térmica. Pode-se notar ainda que para as temperaturas mais altas a sensibilidade térmica tende a um comportamento linear, isso porque a diminuição do índice de refração desloca a sensibilidade ao IR de uma região de variação mais rápida para uma região de variação mais lenta, tendendo ao caso do etanol e do HC 1.

Os casos do HC 4 e do HC 5 são os mais interessantes pois estes estão na região de maior sensibilidade ao IR. Os resultados mostram que para as temperaturas iniciais a contribuição do efeito termo-óptico do meio (deslocamento negativo) supera a sensibilidade térmica intrínseca da rede (deslocamento positivo) resultando em sensibilidades negativas. Outro aspecto de destaque é o rápido aumento da sensibilidade até a temperatura de  $30^\circ\text{C}$  e em seguida uma tendência à estabilização (mais evidente para o HC 4). Este comportamento é devido a alta sensibilidade ao IR e a grande inclinação da curva de sensibilidade ao IR na região de índices de refração em que as amostras se encontram. A alta sensibilidade leva a superação do efeito termo-óptico do meio sobre o da sílica e a grande inclinação da curva faz com que pequenas variações no índice de refração da amostra causem grandes mudanças na sensibilidade ao IR. Para o HC 4 é possível observar a tendência a sensibilidade atingir o valor de zero  $\text{nm}/^\circ\text{C}$ , neste ponto os deslocamentos negativos devido a diminuição do índice de refração da amostra suprimem totalmente os deslocamentos positivos da sensibilidade térmica da rede. A mesma situação é esperada para o HC 5, em temperaturas mais altas.

O gráfico representado na figura 58 mostra qual é o comportamento da sensibilidade térmica de uma FBG corroída quando a rede está imersa em substâncias com diferentes índices de refração. Esta sensibilidade pode apresentar um comportamento constante ou linear e não constante ou ainda não linear, sendo que neste último caso a sensibilidade pode ser positiva ou negativa.

#### 4.5.6 Aplicação da FBG corroída para determinação de coeficientes termo-ópticos

Nos resultados obtidos na caracterização das sensibilidades ao IR da LPG e da FBG foi possível concluir que as FBG têm uma sensibilidade aproximadamente 10 vezes menor, na região de 1,431. Para esta mesma região de índice de refração foi possível observar um aumento de aproximadamente 10 vezes no coeficiente termo-óptico de acoplamento da LPG (em relação ao valor quando a rede está imersa no ar), que modifica as sensibilidades intrínsecas da rede. Para variações do índice de refração do meio externo o coeficiente termo-óptico [equações (11) e (20)] e a posição do comprimento de onda de ressonância das redes dependem apenas do índice de refração efetivo dos modos em questão [equações (10) e (14)]. Portanto a variação do índice de refração do meio externo não deve causar modificações que possam ser notadas na sensibilidade térmica intrínseca das FBG, ou seja, a variação no índice efetivo do modo fundamental devido à mudança do índice de refração externo não é suficiente para modificar o coeficiente termo-óptico de acoplamento nas redes de Bragg. Assim os efeitos que estão envolvidos na sensibilidade térmica das FBG corroídas são dois: a sensibilidade térmica intrínseca da rede que não depende do meio externo e a sensibilidade ao IR que depende do meio externo. Assim é mais fácil separar estes efeitos na resposta das redes de Bragg.

Nesta etapa do trabalho serão utilizados os resultados obtidos na caracterização térmica da rede de 8  $\mu\text{m}$  para determinar o coeficiente termo-óptico das amostras etanol, HC 1, HC 2, HC 3, HC 4 e HC 5. Para esta análise serão utilizados os resultados das caracterizações com a rede imersa em água, pois o coeficiente termo-óptico é conhecido. O etanol também possui o coeficiente termo-óptico conhecido, mas esta amostra será utilizada para comparar os resultados obtidos com os valores tabelados. O coeficiente termo-óptico da água em 1550 nm é  $(-8 \times 10^{-5}) \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (Chryssis *et al*, 2006) e a sensibilidade ao índice de refração em  $n = 1,323$  (índice de refração da água) é 2,4 nm/UIR. Portanto os deslocamentos em comprimento de onda devidos à diminuição do índice de refração da água, com o aumento

da temperatura, podem ser calculados [segundo termo do lado direito da equação (13)]. Com estes valores é possível distinguir esses efeitos devido ao meio externo dos efeitos intrínsecos da sílica [primeiro termo do lado direito da equação (13)]. Os resultados desta análise são mostrados na figura 59.

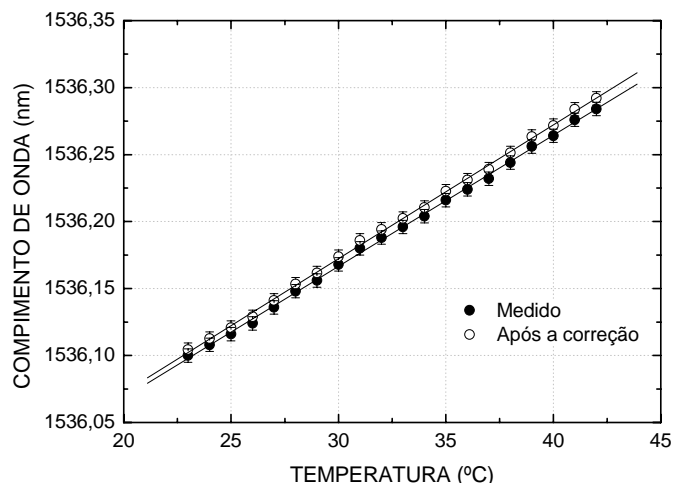


Figura 59 – Resposta do comprimento de onda Bragg à variação de temperatura quando a rede está imersa em água. Os símbolos fechados (●) representam os resultados experimentais e os símbolos abertos (○) representam os resultados corrigidos.

A sensibilidade térmica inicial era  $(9,8 \pm 0,2) \text{ nm}/^\circ\text{C}$  e após a correção foi para  $(10,0 \pm 0,2) \text{ nm}/^\circ\text{C}$ . Usando este resultado e um procedimento inverso ao adotado para o caso da água, o deslocamento em comprimento de onda devido à mudança do índice de refração do meio externo é distinguido daquele devido à sensibilidade térmica inerente à rede para todas as outras amostras. A figura 60 mostra o comportamento do comprimento de onda de Bragg devido apenas às mudanças no índice de refração da amostra devido ao efeito termo-óptico. A equação empírica (31) relaciona o comprimento de onda de Bragg com o índice de refração do meio e quando ajustada aos dados obtidos com a rede de  $8 \mu\text{m}$ , pode ser utilizada com os dados da figura 60 para determinar os índices de refração. Os resultados destes cálculos são mostrados na figura 61. Um ajuste linear foi utilizado para determinar o coeficiente termo-óptico de cada amostra e seus valores são mostrados na tabela 14.

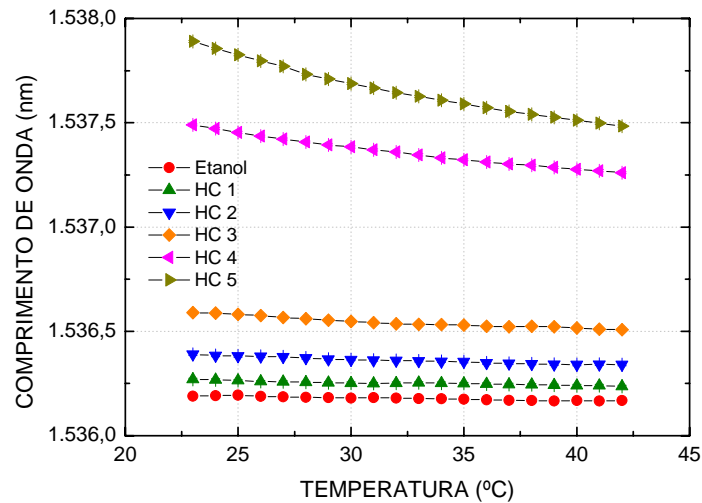


Figura 60 – Comportamento do comprimento de onda quando o índice de refração da amostra diminui devido ao efeito termo-óptico em função da temperatura. A linha ligando os pontos é apenas um guia visual.

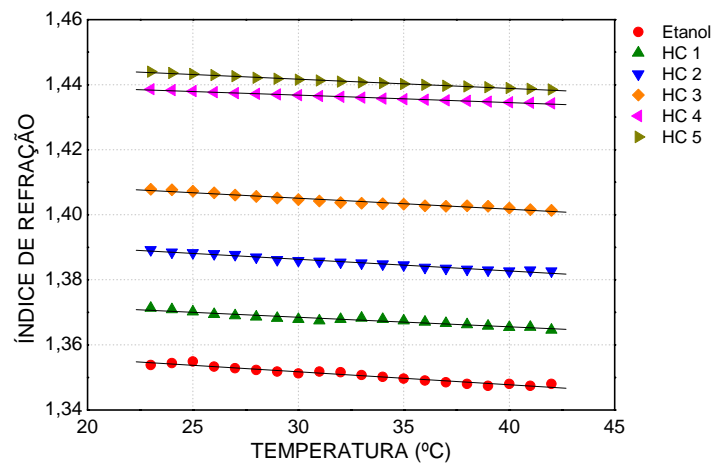


Figura 61 – Variação do índice de refração da amostra devido ao efeito termo-óptico. A linha ligando os pontos é um ajuste linear.

Tabela 14: Coeficientes termo-ópticos de cada amostra utilizada nos experimentos.

Amostra	Coeficiente termo-óptico ( $10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )
Etanol	$-3,99 \pm 0,21$
HC 1	$-2,95 \pm 0,18$
HC 2	$-3,59 \pm 0,13$
HC 3	$-3,37 \pm 0,16$
HC 4	$-2,27 \pm 0,04$
HC 5	$-2,85 \pm 0,06$

Como pode ser observado na figura 61 (e nas incertezas nos valores apresentados na tabela 14) o resultado obtido para as amostras com menor índice de refração apresentam uma menor precisão devido à menor sensibilidade ao índice de refração. Das amostras analisadas apenas o etanol possui o coeficiente termo-óptico bem conhecido ( $-4 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), na região visível do espectro (Weber, 2002)), e o resultado obtido para esta substância concorda bem com aquele dentro das incertezas experimentais e observando que ele foi obtido para a região de 1.536 nm.



## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram estudados os processos de produção de redes em fibra (LPG, CLPG e FBG corroídas) para aplicações como sensores de índice de refração. As sensibilidades que estes dispositivos apresentam ao índice de refração do meio externo, à variações de temperatura e à deformações mecânicas longitudinais foram estudadas, assim como as questões relacionadas a sensibilidade cruzada entre estes parâmetros. Por fim foram estudadas possíveis aplicações destes dispositivos nas áreas de monitoramento ambiental e determinação de propriedades ópticas de materiais.

#### 5.1 PRODUÇÃO DOS DISPOSITIVOS

No estudo da influência dos parâmetros de gravação nas características espectrais das LPG foram avaliados três parâmetros: a tensão mecânica à qual a fibra está submetida, o número de arcos aplicados a cada ponto e a reprodutibilidade das características espectrais das redes produzidas com os mesmos parâmetros.

Tanto o aumento da tensão na fibra durante o processo de gravação como o aumento do número de arcos aplicados provocam um aumento na eficiência das redes produzidas. Isto é devido ao aumento da deformação localizada no local onde o arco é aplicado (no caso do aumento da tensão na fibra), ou ao aumento da modulação de índice de refração (no caso do aumento do número de arcos). Desta forma é possível produzir dispositivos com um comprimento total menor. Porém as redes produzidas com maior eficiência utilizando estes métodos também resultam em uma maior largura de banda do espectro de transmissão. Isto é devido ao aumento do coeficiente de acoplamento que melhora a eficiência, mas aumenta a largura de banda.

A análise da reprodutibilidade do sistema mostrou que o comprimento de onda de ressonância das redes produzidas com os mesmos parâmetros de gravação não coincidem. Isto se deve à resolução de 5  $\mu\text{m}$  do estágio de translação da fibra empregado no sistema de gravação, variações desta magnitude no período da rede causam modificações na posição do

comprimento de onda de 13 nm. Outro fator que ocasiona mudanças no comprimento de onda de ressonância é a tensão à qual a fibra está submetida durante o processo de gravação, pois uma maior tensão durante a aplicação do arco elétrico irá ocasionar mudanças na diferença de índices efetivos ( $n_{ef\_nu} - n_{ef\_ca}^n$ ). Outra característica observada foi a variação na eficiência das redes produzidas com os mesmos parâmetros de gravação. Esta característica tem sido atribuída a variações das condições ambientais (isto é, umidade) no momento da aplicação de cada arco, ao desgaste dos eletrodos, à variação da distância relativa entre os eletrodos e a fibra e a poeira e sujeira sobre a fibra, que irão alterar a intensidade do arco elétrico ao qual a fibra é submetida.

No caso das redes acopladas em série o parâmetro analisado foi o comprimento de separação entre as redes. Os resultados mostraram que o aumento da distância entre as redes produz vales mais estreitos o que possibilita uma melhor precisão na determinação da posição do comprimento de onda de cada vale; por outro lado o aumento da distância também resulta no surgimento de um maior número de vales e conseqüentemente uma menor separação, em comprimento de onda, entre eles. Isso limita as aplicações, pois o máximo deslocamento detectável deve ser menor do que a separação entre os vales.

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SENSIBILIDADES

Os resultados obtidos nas caracterizações das sensibilidades à temperatura e à deformação longitudinal da LPG e da CLPG mostram uma forte influência do índice de refração externo. Tanto a sensibilidade térmica quanto a sensibilidade à deformação aumentam quando o índice de refração se aproxima do valor de índice da casca da fibra óptica. Esta influência se deve ao fato dos índices efetivos dos modos de casca serem fortemente dependentes do índice de refração externo à fibra. Modificações nos índices efetivos dos modos de casca causam alterações nos coeficientes termo-ópticos e fotoelástico e conseqüentemente nas sensibilidades à temperatura e à deformação longitudinal. Para o caso da CLPG estas influências são mais pronunciadas devido ao fato do dispositivo ser composto por três secções (duas redes e uma cavidade) que apresentam sensibilidades a estes parâmetros.

No caso das redes de Bragg com a casca corroída a sensibilidade cruzada entre a temperatura e o índice de refração externo é mais simples do que no caso da LPG e da CLPG.



No caso da LPG e da CLPG o índice externo influencia diretamente o coeficiente termo-óptico, e conseqüentemente, a sensibilidade térmica intrínseca da rede, enquanto que no caso da FBG corroída esta influência tem uma magnitude muito menor e não pôde ser verificada nos resultados experimentais. A resposta à variação de temperatura da FBG corroída é resultado da simples composição da sensibilidade térmica e da sensibilidade ao índice de refração externo e desta forma é mais fácil distinguir os efeitos da variação de cada um desses parâmetros na resposta da rede.

Em muitas aplicações os efeitos da variação de temperatura na resposta das redes são indesejados e devem ser compensados ou corrigidos. Os resultados obtidos neste trabalho apontam para a necessidade de uma cuidadosa caracterização das sensibilidades térmicas considerando toda a faixa de temperatura na qual o sensor irá operar e com a rede imersa em meios nos quais esta operação ocorrerá, evitando assim erros devidos à extrapolação da faixa de temperatura.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS DISPOSITIVOS COMO ELEMENTO SENSOR

As caracterizações para a detecção da presença de hidrocarbonetos mostraram que estas substâncias podem ser detectadas com tempo de resposta de 30 segundos, tempo este que é menor que os apresentados na literatura (SPIRIN *et al*, 2000 e LOPESa *et al*, 2002) que estão na ordem de dezenas de minutos. O comportamento apresentado pela LPG para esta aplicação é uma mudança abrupta na posição do vale de atenuação no instante em que a rede entra em contato com a amostra de poluente. Cada uma das substâncias analisadas possui um índice de refração diferente, assim, os deslocamentos também possuem diferentes magnitudes, fato este que pode ser utilizado para a identificação da substância. A caracterização térmica da rede quando esta está imersa nas diferentes substâncias mostrou que mesmo que a temperatura varie dentro de uma faixa de 20 a 55 °C, ainda é possível identificar as substâncias analisadas. Nesta aplicação, variações de temperatura podem ser distinguidas da presença de um poluente, devido às grandes magnitudes dos deslocamentos causados pela presença do poluente e as pequenas sensibilidades térmicas da rede, quando comparadas com estes deslocamentos. As LPG podem ser utilizadas para monitorar aquíferos em locais próximos a postos de abastecimento de combustíveis. O sensor pode ser encapsulado em um sistema que permita que a rede posicione-se na superfície da água. Como os hidrocarbonetos, em especial a gasolina, possuem uma densidade menor do que a da água estes contaminantes irão ficar

sobre a superfície da água e entrarão em contato com a rede, permitindo a detecção do vazamento.

O fato de a rede ter que entrar em contato com a substância poderia restringir a área de sensoriamento a uma região de poucos centímetros, mas a sensibilidade da rede à presença de vapores em uma atmosfera fechada possibilita a detecção em uma área maior. Para esta característica o sensor tem sua melhor eficiência quando utilizado em ambientes fechados, tais como tanques de armazenamento de camada dupla. Esta aplicação permite não apenas detectar um vazamento em tanques de armazenamento, mas também evitar que os contaminantes atinjam o aquífero.

As vantagens da utilização das redes nas aplicações discutidas aqui são o baixo tempo de resposta, a alta sensibilidade, a capacidade de operação remota, possibilidade de monitoramento em tempo real e ininterruptamente, a capacidade de multiplexação de mais de um sensor em um único enlace possibilitando a monitoração de mais de um ponto de interesse.

As caracterizações com as amostras de Cr (III) e o Cr (VI) indicam que o sensor pode ser aplicado para monitorar processos controlados de conversão do cromo, em altas concentrações, da sua forma mais nociva (hexavalente) à saúde humana para a forma menos nociva (trivalente), mediante uma caracterização prévia da resposta do sensor. O sensor não possibilita a determinação da presença de cromo em uma solução onde os componentes desta são desconhecidos, pois seu princípio de detecção está baseado na diferença de índice de refração que por sua vez varia com a concentração da substância e a presença de outras substâncias. Como os processos de conversão e os subprodutos da reação são conhecidos, há a possibilidade deste sensor ser utilizado para o monitoramento da conversão do Cr (III) para o Cr (VI). Este monitoramento pode trazer benefícios em sistema automatizados, onde seja necessário obter informações da solução em cada uma das etapas do processo de tratamento dos resíduos.

Uma importante característica das LPG e CLPG observada em detalhes neste trabalho foi a influência do efeito termo-óptico do meio externo na resposta do dispositivo. Desta forma é importante caracterizar a resposta às variações de temperatura da rede que esta está imersa em diferentes meios. Uma importante informação neste tipo de caracterização é o coeficiente termo-óptico do meio externo, esta informação pode ser obtida a partir das redes de Bragg corroídas. Nestes dispositivos (com diâmetros de corrosão de até 8  $\mu\text{m}$ ) a influência do meio externo no coeficiente de acoplamento é muito menor que no caso das LPG e CLPG, podendo ser negligenciada. Assim nas FBG corroídas os efeitos devidos à sensibilidade à

temperatura e ao índice de refração externo podem ser distinguidos mais facilmente na resposta do dispositivo.

#### 5.4 TRABALHOS FUTUROS

Os estudos apresentados nesta tese permitiram analisar as características de sensibilidades das LPG e das FBG com a casca corroída. Para propósitos de refratometria cada dispositivo possui determinadas características favoráveis a este tipo de aplicação. Dentre as características das LPG podem ser citadas a alta sensibilidade, a manutenção da integridade da fibra e a menor complexidade na produção do dispositivo. Enquanto que para as FBG corroídas uma das características de interesse são a largura de banda dos modos, o que favoreceria a multiplexação de mais de um sensor em um mesmo enlace óptico. Outra são os estudos sobre técnicas alternativas para a interrogação do dispositivo disponíveis na literatura e ainda a disponibilidade de dispositivos comerciais para tal fim. Tendo em vista estas características torna-se muito interessante o estudo de novos dispositivos que apresentem o maior número destas vantagens apresentadas. Zhou *et al* apresentaram recentemente (Zhou *et al*, 2006) as características de sensibilidade de redes e Bragg com alta inclinação. Seus resultados mostraram sensibilidades destas redes podem chegar à mesma ordem de magnitude das LPG e além de manter a integridade da fibra possuem um espectro de transmissão mais estreito o que traz benefícios para propósitos de multiplexação e de interrogação.

A hipótese da não uniformidade no período da rede ser um dos fatores responsável pela não reprodutibilidade das características espectrais pode ser verificada observando as redes em um microscópio de contraste de fase. Portanto uma proposta de trabalho futuro é a medição da uniformidade do período das redes produzidas, os resultados destas caracterizações irão fornecer informações para uma melhor compreensão do sistema de gravação utilizado.

Um outro estudo que pode ser realizado é a utilização estes dispositivos para caracterização dos coeficientes termo-ópticos de substâncias. Substâncias com diferente composição podem apresentar o mesmo índice de refração dentro de uma determinada faixa de temperatura. Mas caso estas substâncias apresentem diferentes coeficientes termo-ópticos a caracterização deste parâmetro pode ser utilizada para distinguir estas substâncias, podendo trazer benefícios para a área de sensoriamento.

Neste trabalho foram demonstradas as vantagens da utilização das LPG acopladas em série na área de sensoriamento baseados em redes em fibra. Estas redes podem operar no modo de reflexão quando a fibra é clivada a poucos centímetros da LPG e um filme de prata é depositado nesta extremidade. Nesta configuração o dispositivo opera como uma ponta de prova podem trazer benefícios para os projetos de encapsulamento. Além disso as características de sensibilidades não foram totalmente exploradas. Trabalhos recentes têm mostrado que este dispositivo pode ser interrogado a partir da fase do sinal e isto pode proporcionar o desenvolvimento de novas técnicas de interrogação.

As caracterizações com as amostras de cromo mostram que esta aplicação possui muitas limitações devido à resposta da rede estar relacionada à variação do índice de refração. Um estudo interessante voltado a esta aplicação é a deposição de um filme sobre a rede formado com uma substância que tenha uma forte interação com o cromo. Interações que resultem em uma modificação do índice de refração do filme ou então em uma alteração na deformação mecânica na qual a fibra está submetida causaram uma mudança na resposta da rede permitindo a detecção da presença do cromo.

## APÊNDICE A

### DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO DE PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas é realizado a partir das equações fundamentais da teoria eletromagnética conhecidas como as equações de Maxwell,

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

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

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

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

onde  $\vec{B}$  e  $\vec{E}$  são os vetores campo magnético e campo elétrico respectivamente,  $\vec{J}$  é o vetor densidade de corrente,  $\rho$  é a densidade de carga volumétrica e  $\vec{H}$  e  $\vec{D}$  são os vetores intensidade magnética e deslocamento elétrico. As três últimas entidades vetoriais mencionadas são definidas a seguir:

$$\vec{J} = \sum N_i q_i \vec{v}_i \quad (5)$$

aqui  $N_i$  é o número de portadores por unidade de volume,  $q_i$  é a carga dos portadores e  $\vec{v}_i$  é a velocidade de deslocamento de cada portador.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (6)$$

$\vec{P}$  é o vetor polarização e  $\epsilon_0$  é a permissividade do espaço livre.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{M} \quad (7)$$

$\vec{M}$  é o vetor magnetização e  $\mu_0$  é a permeabilidade do espaço livre.

No caso da propagação em fibras ópticas o meio em questão é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Este meio impõe algumas condições importantes: o meio é dielétrico, homogêneo, isotrópico e livre de cargas. Além destas condições será considerado que o meio não está polarizado e não pode ser magnetizado. Estas condições implicam em  $\vec{J} = 0$ ,  $\rho = 0$ ,  $\vec{P} = 0$  e  $\vec{M} = 0$ .

Aplicando o rotacional à equação (2) tem-se

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (8)$$

No caso estudado pode-se inverter a ordem de derivação em relação ao espaço e o tempo no termo direito da equação (8), assim utilizando a identidade vetorial  $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$  a equação (8) torna-se

$$\nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t}(\nabla \times \vec{B}) \quad (9)$$

A equação (1) pode ser escrita como:

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \rightarrow \nabla \times \vec{B} = \mu \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \mu \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (10)$$

Sendo  $\nabla \cdot \vec{E} = 0$  e substituindo a relação obtida em (10) em (9) encontra-se

$$\nabla^2 \vec{E} = \epsilon \mu \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad (11)$$

Está é a equação de onda que descreve a propagação do campo elétrico em um meio com as características mencionadas, de forma análoga é possível chegar a equação de onda para o campo magnético. As deduções a seguir serão feitas apenas para o campo elétrico, mas assim como na dedução da equação de onda, as deduções para o campo magnético são análogas.

As condições que definem o problema são de dois grupos, as que envolvem o tempo (condições iniciais) e as que envolvem o espaço (condições de contorno) assim procuramos soluções da forma:

$$E(\vec{r}, t) = \vec{X}(\vec{r})T(t) \quad (12)$$

onde  $\vec{r}$  representa um sistema de coordenadas espaciais qualquer.

Substituindo a equação (12) em (11) tem-se

$$T(t)\nabla^2 \vec{X}(\vec{r}) = \frac{1}{c^2} \vec{X}(\vec{r}) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (13)$$

onde  $\frac{1}{c^2} = \epsilon\mu$ .

Dividindo ambos os lados da equação (13) por (12), obtém-se:

$$\frac{1}{\vec{X}(\vec{r})} \nabla^2 \vec{X}(\vec{r}) = \frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (14)$$

Na equação (14) o lado esquerdo depende apenas das coordenadas espaciais e o lado direito apenas da coordenada temporal. A igualdade verifica-se apenas se ambos os lados forem constantes. A equação (14) pode ser separada através de uma constante de separação  $\delta$ .

$$\frac{1}{\vec{X}(\vec{r})} \nabla^2 \vec{X}(\vec{r}) = \delta \quad \text{ou} \quad \nabla^2 \vec{X}(\vec{r}) = \delta \vec{X}(\vec{r}) \quad (15)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{1}{T(t)} \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \delta \quad \text{ou} \quad \frac{d^2 T(t)}{dt^2} = \delta c^2 T(t) \quad (16)$$

Como o campo deve variar harmonicamente com o tempo, toma-se  $\delta$  negativo fazendo:

$$\delta = -k^2 \quad \text{e} \quad kc = \omega \quad (17)$$

Desta forma uma solução possível para a equação (16) é:

$$T(t) = T_0 e^{-i\omega t} \quad (18)$$

A equação (15) é conhecida como equação de Helmholtz. A simetria da fibra sugere a adoção do sistema cilíndrico de coordenadas. Assim a equação (15) assume a forma:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{X}(\bar{r})}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \bar{X}(\bar{r})}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \bar{X}(\bar{r})}{\partial z^2} + k^2 = 0 \quad (19)$$

Supondo uma solução da forma  $\bar{X}(\bar{r}) = R(r)\Theta(\theta)Z(z)$  substituindo-a na equação (19) e dividindo-a por  $\bar{X}(\bar{r})$  encontra-se:

$$\frac{1}{rR(r)} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dR(r)}{dr} \right) + \frac{1}{r^2\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta(\theta)}{d\theta^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2Z(z)}{dz^2} + k^2 = 0 \quad (20)$$

Usando novamente o método de separação das variáveis a equação (20) torna-se:

$$\frac{1}{Z(z)} \frac{d^2Z(z)}{dz^2} + k^2 = A \quad (21)$$

$$\frac{1}{rR(r)} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dR(r)}{dr} \right) + \frac{1}{r^2\Theta(\theta)} \frac{d^2\Theta(\theta)^2}{d\theta^2} = A \quad (22)$$

A constante de separação  $A$  pode ser determinada a partir da equação (21). Esta equação descreve a propagação no eixo  $z$  da fibra, que deve ser harmônica no eixo de propagação, da forma:

$$\frac{d^2Z(z)}{dz^2} + \lambda^2 Z(z) = 0 \quad (23)$$

onde  $\lambda$  é uma constante conhecida como constante de propagação  $\beta$ .



Isto leva a:

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = -\beta^2 Z(z) \quad (24)$$

Substituindo a equação (24) em (21) tem-se:

$$A = k^2 - \beta^2 \quad (25)$$

A equação (24) descreve a propagação no eixo  $z$  da fibra. Assim tem-se:

$$Z = Z_0 e^{-i\beta z} \quad (26)$$

A equação (22) pode ser separada em termos que dependem somente de  $r$  ou de  $\theta$ . Assim multiplicando-a por  $r^2$  e substituindo a constante de separação  $A$ , obtém-se:

$$\frac{r}{R(r)} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dR(r)}{dr} \right) + \frac{1}{\Theta(\theta)} \frac{d^2 \Theta(\theta)}{d\theta^2} + (k^2 - \beta^2) r^2 = 0 \quad (27)$$

A equação (27) pode ser separada em duas equações, usando uma constante de separação  $\delta_2$

$$\frac{d^2 \Theta(\theta)}{d\theta^2} - \delta_2 \Theta(\theta) = 0 \quad (28)$$

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dR(r)}{dr} \right) + \left[ r\kappa^2 - \frac{\delta_2}{r} \right] R(R) = 0 \quad (29)$$

onde  $\kappa^2$  é definido como:

$$\kappa^2 \equiv k^2 - \beta^2 \quad (30)$$

A equação (28) leva a uma solução para a distribuição harmônica do campo na coordenada  $\theta$  da forma:

$$\Theta(\theta) = \Theta_0 \begin{cases} \text{sen } l\theta \\ \text{cos } l\theta \end{cases} \quad (31)$$

Para que esta função seja periódica (isto é  $\Theta(\theta) = \Theta(\theta + 2\pi)$ )  $l$  deve ser um inteiro da forma  $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Valores negativos de  $l$  correspondem a mesma distribuição de campo. Para cada valor de  $l$  pode-se ter, 2 estados independentes de polarização, modos com  $l \geq 1$  tem 4 estados degenerados ( 2 polarizações ortogonais e as dependências em  $\theta$ ), modos com  $l = 0$  são independentes de  $\theta$  e tem 2 degenerescências.

Assim definimos que  $\delta_2 \equiv -l^2$ . Usando esta definição e aplicando a regra da cadeia no primeiro termo da equação (29) tem-se:

$$\frac{dR(r)}{dr} + r \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + \left[ r\kappa^2 - \frac{l^2}{r} \right] R(r) = 0 \quad (32)$$

Multiplicando a equação (32) por  $r$  e usando a definição (30) obtém-se:

$$r^2 \frac{d^2 R(r)}{dr^2} + r \frac{dR(r)}{dr} + [(k^2 - \beta^2)r^2 - l^2] R(r) = 0 \quad (33)$$

Para o caso de fibras óticas, onde o índice de refração do núcleo ( $n_1$ ) é muito próximo do índice de refração da casca ( $n_2$ ) pode-se utilizar a aproximação de guiamento fraco. Nesta aproximação os modos podem ter estados de polarização arbitrários (em  $x$  e em  $y$ ). Além disto os modos possuem a mesma constante de propagação.

Sendo  $a$ , o raio do núcleo da fibra e considerando que a casca é infinita quando comparada com o diâmetro do núcleo, há duas situações onde a equação (33) deve ser aplicada, para:

$$n(r) = \begin{cases} 0 < r < a & \text{núcleo} \\ r > a & \text{casca} \end{cases} \quad (34)$$

E ainda escrevendo  $\frac{1}{c^2} = \mu\varepsilon = \mu_0\varepsilon_0 n^2$  onde  $n$  é o índice de refração do meio tem-se:

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \left( U^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 \quad ; \quad 0 < r < a \quad (35)$$

e

$$r^2 \frac{d^2 R}{dr^2} + r \frac{dR}{dr} + \left( W^2 \frac{r^2}{a^2} - l^2 \right) R = 0 \quad ; \quad r > a \quad (36)$$

onde

$$U \equiv a(k_0^2 n_1^2 - \beta^2)^{1/2} \quad (37)$$

$$W \equiv a(\beta^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2} \quad (38)$$

As soluções das equações (35) e (36) devem ainda satisfazer duas condições:

- 1ª - no núcleo a função deve ser finita e diferente de zero;
- 2ª - na casca a função de decair exponencialmente.

Estas condições levam a escolha das funções de Bessel para a distribuição radial do campo no núcleo, pois elas existem para  $r = 0$ , e das funções de Bessel modificadas de primeiro tipo para a distribuição radial do campo na casca, que decaem exponencialmente com o raio.

Desta forma as equações (18), (26) descrevem uma propagação harmônica no tempo e ao longo do eixo de propagação  $z$ , a equação (31) descreve uma distribuição harmônica do campo ao longo da coordenada  $\theta$ , e as distribuições do campo ao longo de  $r$  são dadas pelas soluções da equação de Bessel, segundo as condições citadas acima. Os modos compostos por estas funções na condição de guiamento fraco ( $\Delta n \gg 0$ ) são conhecidos como modos linearmente polarizados  $LP_{lm}$ .



**PUBLICAÇÕES RESULTANTES DESTA TESE**

## ARTIGOS COMPLETOS PUBLICADOS EM PERIÓDICOS

1. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., FALATE, R., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Influence of Surrounding Media Refractive Index on the Thermal and Strain Sensitivities of Long Period Gratings”. **Applied Optics**, v.46, p. 2831-2837, 2005.
2. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Non-Linear Behavior of Long Period Grating Thermal Sensitivity in Different Surroundings”. **Journal of Microwaves and Optoelectronics**, v. 6, n.1 p. 336-345, 2007.
3. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Influence of the Surrounding Refractive Index on the Thermal and Strain Sensitivities of a Cascaded Long Period Grating”. **Measurement Science and Technology**, v. 18, p. 3111-3116, 2007.
4. KAMIKAWACHI, R. C., ABE, I., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., PINTO, J. L., “Nonlinear Temperature Dependence of Etched Fiber Bragg Gratings”. **IEEE Sensor Journal**, v. 7, n. 9, p. 1358-1359, 2007.
5. KAMIKAWACHI, R. C., ABE, I., PATERNO, A. S., KALINOWSKI, H. J., M. MULLER, FABRIS, J. L., PINTO, J. L., “Determination of Thermo-Optic Coefficient in Liquids with Fiber Bragg Grating Refractometer”. **Optics Communications**, aceito para publicação.

## TRABALHOS COMPLETOS EM ANAIS DE EVENTOS

1. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Influence of External Medium Refractive Index on the Waveguide Dispersion Factor and Thermo-Optic Coefficient of Cascaded Long-Period Gratings”.in **18<sup>th</sup> International Conference on Optical Fibre Sensors**, Cancún, 2006, proceedings OFS-18.
2. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Long-Period Grating Thermal Sensitivity Dependence on the External Medium Refractive Index”.in **12<sup>o</sup> SBMO Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica e 7<sup>o</sup> CBMAG Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**, Belo Horizonte, 2006, proceedings MOMAG 2006.
3. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Cascade Long-Period Grating Structure for Cr (III) and Cr (VI) Detection in Water Environment”.in **2005 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference**, Brasília, 2005, proceedings IMOC 2005.
4. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., FABRIS, J. L., “Optical sensor based on fiber grating for hydrocarbon detection in aquatic environment”.in **XXVII Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, Poços de Caldas, 2004, Anals of Optics 2004.
5. KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MULLER, M., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., “Cr (III) and Cr (VI) detection in water environment”.in **5th Iberoamerican Meeting on Optics and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Their Applications**, Porlamar, 2004, Proceedings of SPIE, v. 5622, p. 935-938.

## TRABALHOS EM CO-AUTORIA

1. FABRIS, J. L. ; MULLER, M. ; FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C. ; KALINOWSKI, H. J. . “Prospects of long period grating sensors in the oil & gas industry”. In: Kehar Singh; V. K. Rastogi; M. A. Palafox. (Org.). **Perspectives in Engineering Optics & Spectroscopy**. Ghaziabad: Anita Publications, 2006, p. 93-106.
2. FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., “Fiber optic sensors for hydrocarbon detection”. **Sensor and Actuators B: Chemical**, v.105, n. 2 p. 430-436, 2005.
3. FALATE, R., KAMIKAWACHI, R. C., MULLER, M., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., “Fiber Optic Hydrocarbon Sensors Based on Long Period Gratings”. **Journal of microwaves and optoelectronics**, v.3, n. 5 p. 47-55, 2004.
4. KLEMBBA, F. ; ROSADO, R. H. G. ; KAMIKAWACHI, R. C. ; MULLER, M. ; FABRIS, J. L., “Optical fiber sensors for petroleum hydrocarbon detection in pipelines”.in **XXIX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, São Lourenço-MG, 2006, Anals of Optics 2006.
5. KLEMBBA, F. ; KAMIKAWACHI, R. C. ; ROSADO, R. H. G. ; KULLER, F. ; MÜLLER, Mácia ; FABRIS, J. L., “Sensores a fibra ótica para detecção de hidorcarbonetos e monitoração da temperatura em polidutos”.in **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005, Salvador. 3o. Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005**.
6. KLEMBBA, F. ; KAMIKAWACHI, R. C. ; MULLER, M. ; KALINOWSKI, H. J. ; FABRIS, J. L., “Sensor a Fibra Ótica para Detecção de Hidrocarbonetos em Oleodutos”.in **Rio Oil & Gas 2004 expo and conference**, Rio de Janeiro, 2005.

ARTIGOS COMPLETOS SUBMETIDOS

1. KAMIKAWACHI, R. C., ABE, I., KALINOWSKI, H. J., M. MULLER, FABRIS, J. L., PINTO, J. L., “Thermal behavior of an etched FBG immersed in different surroundings”.  
**Journal of Microwaves and Optoelectronics**, submetido.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABRAMOV, A. A., EEGLETON, B. J., ROGERS, J. A., ESPINDOLA, R. P., HALE, A., WINDELER, R. S., and STRASSER, T. A., “Electrically Tunable Efficient Broad-Band Fiber Filter”, **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 11, n. 4, p. 445-447, 1997.

BAIRD, C. **Química Ambiental**. Trad. Maria Angeles Lobo Recio e Luiz Carlos Marques Carrera. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

BHATIA, V., VENGSARKAR, A. M., “Optical Fiber Long-Period Grating Sensors”. **Optical Letters**, v.21, p. 692-694, 1.996.

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.

BUGGY, S. J., MURPHY, R. P., JAMES, S. W., TATAN, R. P., “Cure monitoring of a UV cured epoxy resin using a long period grating Mach-Zehnder interferometer”. in **Proc. of EWOFS 2007** – Third European Workshop on Optical Fibre Sensors, vol. único, p. 66190V-1, 2007.

CAUCHETEUR, C., MÉGRET, P., “Demodulation Technique for Weakly Tilted Fiber Bragg Grating Refractometer”. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 17, p. 2703-2705, 2005.

CHEN, X., ZHOU, K., ZHANG, L., BENNION, I., “Simultaneous measurement of temperature and external refractive index by use of a hybrid grating in D fiber with enhanced sensitivity by HF etching”. **Applied Optics**, v. 44, n. 2, p. 178-182, 2005.

CHRYSSIS, A. N., SAINI, S. S., LEE, S. M., YI, H., BENTLEY, W. E., DAGENAIS, M., “Detecting Hybridization of DNA by Highly Sensitive Evanescent Field Etched Core Fiber Bragg Grating Sensors”. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 11, n. 4, p. 864-872, 2005.

CHRYSSIS, A. N., SAINI, S. S., LEE, DAGENAIS, M., “Increase Sensitivity and Parametric Discrimination Using Higher Order Modes of Etched-Core Fiber Bragg Grating Sensors”. **IEEE Photonics Technology Letters**, v. 18, n. 1, p. 178-180, 2006.

CUSANO, A., IADICICCO, A., CAMPOPIANO, S., GIORDANO, M., CUTOLO, A., “Thinned and micro-structured fibre Bragg gratings: towards new all-fibre high-sensitivity chemical sensors”. **Journal of Optics A: Pure and Applied Optics**, v. 7, p. 734-741, 2005.

CHEN, S., TONG, Z., ZHAO, Q., LIU, Z., DONG, X., “A smart bending sensor with a novel temperature- and strain-insensitive long-period grating”, **Sensors and Actuators A**, v. 116, p. 103-106, 2004.

CHIANG, K. S., YUNQI, L., NG, M. N., DONG, X., “Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index”, **Electronics Letters**, v. 36, n. 11, p. 966-967, 2000.

CORSEUIL, H. X., AIRES, J.R., ALVAREZ, P.J.J., “Implications of the Presence of Ethanol on Intrinsic Bioremediation of BTEX Plumes in Brazil”, **Hazardous Waste and Hazardous Materials**, v.13, n.2, p. 213-221, 1996.

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.

DIANOV, E. M., VASILIEV, S. A., KURKOV, A. S., MEDVEDKOV, O. I., PROTOPOPOV, V. N., “In-fiber Mach-Zehnder Interferometer based on a pair of long-period gratings”, in. Proc. **ECOC 96**, v. 1, p. 65-68, 1996.

ERDOGAN, T., “Cladding-mode resonances in short- and long-period fiber grating filters”, **Journal of Optical Society of America**, v. 14, n. 8, p. 1760-1773, 1.997.

FACIAI, R., MIGNANI, A. G., VANNINI, A., “Long Period Grating as Solution Concentration Sensor”, **Sensors and Actuators B**, vol. 74, p. 74-77, 2.001.

FALATE, R., “Produção e caracterização de redes de período longo para aplicação em sensoriamento”. **Dissertação de Mestrado em Informática Industrial** – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, 2002.

HAN, Y. G., PARK, H. S., HAN, W. T., LEE, B. H., PAEK, U. C., CHUNG, Y., KIM, C S., “Temperature Stability and Mechanical Strength of Long Period Fiber Grating Fabricated with CO<sub>2</sub> Laser”, in **Conference on Optical Fiber Communication**, 2.000, vol. 1, p. 26-28, 2.000.

HE, W., WENKANG, S., CAI, P., YE, A., “Applications of acrylate-based polymer and silicone resin on LPFG-based devices”, **Optical Materials**, v. 21, p. 507-510, 2002.

HUMBERT, G., MALKI, A., “Characterizations at very high temperature of electric arc-induced long-period fiber grating”, **Optics Communications**, v. 208, p. 329-335, 2002.

IADICICCO, A., CAMPOPIANO, S., CUTOLO, A., GIORDANO, M., CUSANO, A., “Self temperature reference refractive index sensor by non-uniform thinned fiber Bragg gratings”. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 120, p. 231-237, 2006.

ISHAQ, I. M., QUINTELA, A., JAMES, S. W., ASHWELL, G. J., HIGUERA, J. M. L., TATAM, R. P., “Modification of the refractive index response of long-period gratings using thin film overlays”. **Sensors and Actuators B**, v. 107, p. 738-741, 2005.

IVANOV, O. V., “Wavelength shift and split of cladding mode resonances in microbend long-period fiber gratings under torsion”, **Optics Communications**, v. 232, p. 159-166, 2004.

KAMIKAWACHI, R. C., “Estudo de redes de período longo com elemento sensor de hidrocarbonetos”. **Dissertação de Mestrado em Informática Industrial** – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 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”, in Anais de Óptica – XXVII ENFMC 2004 – **Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada**, v. 6, p. 20-23, 2004a.

KAMIKAWACHI, R. C., POSSETI, G. R. C., MÜLLER, M., KALINOWSKI, H. J., FABRIS, J. L., “Cr (III) and Cr(VI) detection in water environment using an optical fiber grating sensor”, in **RIAO/OPTILAS 2004 – 5th Iberoamerican Meeting on Optics (RIAO) and 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Their Applications (OPTILAS)**, v. 5622, p. 935-938, 2004b.

KAMIKAWACHI, R. C., POSSETTI, G. R. C., MÜLLER, M., FABRIS, J. L., “Cascade Long-Period Grating Structure for Cr (III) and Cr (VI) Detection in Water Environment”, in **Proc. of IMOC 2005 – International Microwaves and Optoelectronics Conference 2005**, v. único, p. 271-273, 2005.

KASHYAP, R., “**Fiber Bragg Gratings**”, Academic press, 1999.

KAWANO, H., MUENTZ, H., SATO, Y., NISHIMAE, J., SUGITATSU, A., “Reduction of Transmission Spectrum Shift of Long Period Fiber Grating by a UV Preexposure Method”, **Journal of Lighthwave Technology**, vol. 19, n. 8, p. 1.221 – 1.228, 2.001.

KOSINSKI, S. G. and VENGSARKAR, A. M., “Splice-based long period fiber gratings”, in **Optical Fiber Sensors Conference**, OFC 98, paper ThG3, Technical Digest p.278-279, 1998.

LIN, C. Y., WANG, L. A., “Loss-tunable long-period fiber grating made from etched corrugation structure”, **Electronics Letters**, v. 35, n. 21, p. 1872-1873, 1999.

LIN, C. Y., WANG, L. A., CHERN, G. W., “Corrugated Long-Period Fiber Grating as Strain, Torsion and Bend sensors”, **Journal of Lightwave Technology**, v. 19, n. 8, p. 1159-1168, 2001.

LIU, Y., WILLIAMS, J. A. R., ZHANG, L., BENNION, I., “Phase shifted and cascaded long-period fiber gratings”. **Optics Communications**, n. 164, p. 27-31, 1.999.

LÓPEZ, R.M., SPIRIN, V.V., MIRIDONOVA, S.V., SHLYAGIN, M.G., BELTRÁN, G., KUZIN, E.A. “Fiber optic distributed sensor for hydrocarbon leak localization based on transmission/reflection measurement”. **Optics & Laser Technology**, v. 34, p. 465 – 469, 2002.

LOPEZ, R. M., SPIRIN, V. V., SHLYAGIN, M. G., MIRIDONOV, S. V., BELTRÁN, KUZIN, E. A., e LUCERO A. M. “Coherent optical frequency domain reflectometry for interrogation of bend-based fiber optic hydrocarbon sensors”, **Optical Fiber Technology**, v. 10, p. 79-90, 2004.

NARAYANAN, C., PRESBY, H. M., VENGSARKAR, A. M., “Band-Rejection Fibre Filter Using Periodic Core Deformation”. **Electronics Letters**, vol. 33, n. 4, p. 280-281, 1.997.

OTHONOS, A., KALLI, K., “**Fiber Bragg Gratings: Fundamental and Applications in Telecommunications and sensing**”, Norwood: Artech house, 1999.

- PATRICK, H. J., KERSEY, A. D., BUCHOLTZ, F., EWING, K. J., JUDKINS, J. B., VENGSARKAR, A. M., “Chemical sensor based on long-period fiber grating response to index of refraction”. in **Proc. Conf. Laser Electro-Opt.**, vol. 11, 1.997, OSA Technical Digest Series, Optical Society of America, p. 420-421, 1997.
- PATRICK, H. J., KERSEY, A. D., BUCHOLTZ, F., “Analysis of the Response of Long Period Fiber Grating to External Index of Refraction”, **Journal Of Lighthwave Technology**, vol. 16, n. 9, p. 1.606 - 1612, 1.998.
- PEREIRA, D. A., FRAZÃO, O., SANTOS, J. L., “Fiber Bragg grating sensing system for simultaneous measurement of salinity and temperature”. **Optical Engineering**, v. 43, n. 2, p. 299- 304, 2004.
- 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.
- REGO, G., FERNANDES, J. R. A., SANTOS, J. L., SALGADO, H. M. e MARQUES, P. V. V., “New Technique to Mechanically Induce Long-Period Fibre Gratings”, **Optics Communications**, v.220, p. 111-118, 2003.



- SANG, X., YU, C., MAYTEEVARUNYOO, T., WANG, K., ZHANG, Q., CHU, P. L.,  
“Temperature-insensitive chemical sensor based on a fiber Bragg grating”. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 120, p. 754-757, 2007.
- SCHROEDER, K., ECKE, W., MUELLER, R., WILLSCH, R., ANDREEV, A., “A fibre Bragg grating refractometer”. **Measurement Science Technology**, v. 12, p. 757-764, 2001.
- SIMEATANA, M., SZMIDT, J., KORWIN-PAWLOWSKI, M. L., BOCK, W. J., GRABARCZYK, J., “Application of diamond-like carbon films in optical fibre sensors based on long period grating” . **Diamond and Related Materials**, v. 16, p. 1374-1377, 2007.
- SPIRIN, V.V., SHLYAGIN, M.G., MIRIDONOV, S.V., MENDIETA JIMÉNES, F.J., LÓPEZ GUITIÉRREZ, R.M., “Fiber Bragg grating sensor for petroleum hydrocarbon leak detection”. **Optics and Lasers in Engineering**, v.32, p. 497-503, 2000.
- SPIEGEL, M. R., “Tabela 39 – Valores para zeros aproximados das funções de Bessel”, em **Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas**, Coleção Shaum, McGraw Hill do Brasil, pp.250, 1973.
- STRARODUBOV, D.S., GRUBSKY. V., FEINBERG, J., “All-fiber bandpass filter with adjustable transmission using cladding-mode coupling”, **IEEE Photonic Technology Letters**, v. 10, n. 11, p. 1590-1592, 1998.

TAN, K. M., TAY, C. M., TJIN, S. C., CHAN, C. C., RAHARDJO, H., “High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensor”. **Sensors and Actuators B**, vol. 110, p. 335-341, 2005.

TANG, J. L., CHENG, S. F., HSU, W. T., CHIANG, T. Y., CHAU, L. K., “Fiber-optic biochemical with a colloidal gold-modified long period fiber grating”, **Sensors and Actuators B**, vol. 119, p. 105-119, 2006.

VENGSAKAR, A. M., LEMAIRE, P., JUDKINS, B., BATHIA, V., EDORGAN, T., SIPE, J., “Long-period fiber gratings as band-rejection filters”, in: Proceedings of the **Conference on Optical Fiber Communication**, Technical Digest Series, San Diego, USA, 1995, paper PD4-2.

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.

VENUGOPALAN, T., YEO, T. L., SUN, T., GRATTAN, K. T., “LPG based PVA coated sensor for relative humidity measurement”. in **Proc. of EWOFS 2007 – Third European Workshop on Optical Fibre Sensors**, vol. único, p. 661925-1, 2007.

ZHANG, L., LIU, Y., EVERALL, L., WILLIAMS, J. A. R. e BENNION, I., “Design and Realization of Long-Period Grating Devices in Conventional and Birrefringence 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.

ZHAO, C. L., YANG, X., DEMOKAN, M. S., JIN, W., “Simultaneous Temperature and Refractive Index Measurement Using a 3° Slanted Multimode Fiber Bragg Grating”, **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, n. 2 p. 879-883, 2006.

ZHOU, K., CHEN, X., ZHANG, L., BENNION, I., “Implementation of optical chemsensors based on HF-etched fibre Bragg grating structures”, **Measurement Science Technology**, v. 17, p. 1140-1145, 2006a.

ZHOU, K., CHEN, X., ZHANG, L., BENNION, I., “Low Thermal Sensitivity Grating Devices Based on ex-45° Tilting Structure Capable of Forward-Propagating Cladding Modes Coupling”, **Journal of Lightwave Technology**, v. 24, p. 5087-5094, 2006b.

WEBER, M. J. “Section 5: liquids,” in **Handbook of Optical Materials**, eds. (The Crc Press Laser and Optical Science and Technology Series, 2002), pp. 373-438.