

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**



TESIS

**“SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES DE  
PERIODO LARGO (LPG)”**

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN FÍSICA

ELABORADA POR:

**LUIS ALBERTO MOSQUERA LEIVA**

ASESOR:

**Dr. HÉCTOR RAÚL LORO RAMÍREZ**

**LIMA – PERÚ**

**2019**

## **Dedicatoria:**

Esta tesis es dedicada a mi familia, a los colegas y a todas las personas que contribuyeron a que este trabajo se realice, en especial a aquellos que compartieron sus conocimientos.

## **Agradecimientos:**

Al Dr. Héctor Loro, por su aceptación como asesor de tesis, por todo el apoyo, que me permitió alcanzar los objetivos de esta tesis.

Al profesor Dr. Miguel V. Andrés Bou del Departamento de Física Aplicada y Electromagnetismo de la Universidad de Valencia, al Dr. Cristiano M. B. Cordeiro del Laboratorio de Fotónica y Fibras Especiales del Departamento de Electrónica Cuántica de la Universidad Estatal de Campinas UNICAMP, al Dr. Jaime Frejlich del Laboratorio de Óptica de la UNICAMP y al Dr. Aníbal Valera de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Ingeniería los cuales han sido mis maestros en el campo de la óptica Física.

A las autoridades y colegas de la Facultad de Ingeniería Civil por todo el apoyo brindado a lo largo de los años de formación.

A mis colegas Jesús Basurto, Freddy Loayza, Miguel Melchor, Carmen Eyzaguirre por todo su apoyo en ese tiempo de estudios.

La implementación del equipamiento para la fabricación de sensores de fibra óptica en el laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil ha sido posible gracias al financiamiento recibido por el Vicerrectorado de Investigación, por el Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI y por financiamiento del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC), en el marco de proyectos de investigación realizados.

## **Resumen**

Los dispositivos basados en redes gravadas en fibra óptica juegan actualmente un papel importante en el campo de las comunicaciones ópticas y en el diseño de sensores. Existen dos tipos de redes gravadas en fibra óptica: redes de período corto o de Bragg (FBG) con periodicidades del orden de la longitud de onda óptica y redes de período largo (LPG) con periodicidades de varios cientos de longitudes de onda. Desde las primeras redes escritas en fibras de vidrio convencional: FBG (Hill, 1978) y LPG (Vengsarkar, 1996), las técnicas de fabricación de redes y sus aplicaciones han logrado un gran y rápido desarrollo. Diversos métodos de fabricación de redes en fibras ópticas ya han sido desarrollados: exposición de la fibra a láser ultravioleta UV, irradiación con láser de CO<sub>2</sub>, grabado por descarga eléctrica, exposición de la fibra óptica a láser de femtosegundos, grabado por material corrugado, etc. Asimismo, redes LPG han sido grabadas en diferentes tipos de fibras ópticas: monomodo, multimodo, de núcleo estructurado, de núcleo hueco, en fibras afinadas, en fibras de sílice y en fibras poliméricas, habiéndose desarrollado numerosos dispositivos basados en estas redes LPG.

Nosotros, entre las diferentes técnicas de exposición de la fibra óptica al láser para la grabación de redes, optamos por la técnica de irradiación con láser de CO<sub>2</sub> por ser una técnica que no requiere de fibras especiales fotosensibles y/o cualquier otro proceso de pretratado de la fibra para escribir la red; asimismo, porque el proceso de irradiación con láser de CO<sub>2</sub> puede ser fácilmente controlado para generar perfiles de redes complicadas a través de la técnica de grabado punto a punto y porque se pueden escribir redes LPG en casi todos los tipos de fibras incluyendo las fibras PCF de núcleo estructurado. Es en este marco, que presentamos en esta tesis, un breve desarrollo teórico sobre las redes LPG, su proceso de fabricación, caracterización óptica, así como diversas aplicaciones desarrolladas.

La tesis consta de 5 capítulos en los que se presenta una breve exposición de la teoría y aplicaciones de las redes LPG escritas en diferentes tipos de fibras ópticas por las técnicas de irradiación con láser de CO<sub>2</sub> y por grabación mecánica. Se describen diversos dispositivos elaborados incluyendo sensores interferométricos y no interferométricos, así como sus aplicaciones a la medida de vibraciones, índices de refracción, desplazamientos, curvaturas, presión, compresión, tracción, concentración de sustancias disueltas en líquidos, transferencia de carga en suelos, etc.

En el capítulo I se describe el proceso general de guiado de la luz en fibras ópticas, mostrando sus características como el ancho de banda, polarización, modos y mecanismos de pérdidas. En el capítulo II se describe brevemente el proceso de fabricación de fibras ópticas. En el capítulo III se desarrolla la teoría de la luz transmitida por redes LPG, así como sus características: tamaño y período de la red y su influencia en la pérdida de acoplamiento y longitud de onda de resonancia. Se describen también las técnicas de grabado empleadas. En el capítulo IV se describen los diferentes sensores interferométricos y no- interferométricos basados en estas redes, elaborados a lo largo la investigación, así como sus aplicaciones.

En el capítulo V se presentan las conclusiones finales acerca del trabajo desarrollado.

**Palabras clave:** Fibras ópticas, Sensores de fibra óptica, Redes de período largo LPG, Técnicas de grabación de redes LPG, Interferómetros de fibra óptica, Sensores LPG de fibra óptica. Monitoreo con sensores de fibra óptica.



## **Abstract**

Devices based on fiber-optic diffraction gratings play an important role in the field of optical communications and sensor design. There are two types of fiber-optic networks: Bragg FBG networks with periodicities of the order of optical wavelength and LPG long-period networks with periodicities of several hundred wavelengths. Since Hill (1978) and Vengsarkar (1996) wrote the first FBG and LPG networks in conventional glass fibers, network manufacturing techniques and their applications have achieved great and rapid development. Various methods of manufacturing networks, such as exposure to ultraviolet UV laser fiber, CO<sub>2</sub> laser irradiation, electrical discharge, exposure of fiber optic to femtosecond laser, material taxation corrugated, etc. they have already been implemented. LPG networks have been engraved in different types of optical fibers: single mode, multimode, structured core, hollow core, fine fibers, silica fibers and polymeric fibers. Likewise, numerous devices based on LPG networks have been developed for applications in communication and in the monitoring of different physical-chemical and biological parameters.

Among the different techniques of exposing fiber optics to the laser for network recording, we opted for the technique of CO<sub>2</sub> laser irradiation as it is a technique that does not require special photosensitive fibers and / or any other fiber pretreatment process. write the network. Also, because the CO<sub>2</sub> laser irradiation process can be easily controlled to generate complicated network profiles through the point-to-point engraving technique and because LPG networks can be written on almost all fiber types including PCF fibers. structured nucleus. In this framework, we present in this thesis a brief theoretical development on the LPG networks, the equipment assembled in the Physics laboratory of the FIC to manufacture LPG networks, the LPG networks manufactured, their optical characterization, as well as various applications developed.

The thesis consists of 5 chapters in which a brief presentation of the theory and applications of LPG networks written in different types of optical fibers by the techniques of CO<sub>2</sub> laser irradiation and mechanical recording is presented. Various elaborated devices are described including interferometric sensors of the Michelson, Fabry-Perot and Mach Zender type, as well as non-interferometric, and their applications to the measurement of vibrations, refractive indexes, displacements, curvatures, pressure, compression, traction, as well as the determination of physical parameters of materials, such as modules of elasticity, concentration of dissolved substances in liquids, transfer of load in soils, etc.

Chapter I describes the general process of guiding the light in optical fibers, showing their characteristics such as bandwidth, polarization, modes and mechanisms of losses. Chapter II briefly describes the manufacturing process of optical fibers. Chapter III develops the theory of light transmitted by LPG networks, as well as their characteristics: size and period of the network and its influence on coupling loss and resonance wavelength. The engraving technique used is also described. Chapter IV describes the different interferometric and non-interferometric sensors based on these networks, developed throughout the investigation, as well as their applications. Chapter V presents the final conclusions about the work developed.

**Keywords:** Optical fibers, Fiber optic sensors, LPG long-period networks, LPG network recording techniques, fiber optic interferometers, fiber optic LPG sensors. Monitoring with fiber optic sensors.

# Índice

INTRODUCCIÓN	1
<b>CAPITULO I</b>	
<b>LA FIBRA ÓPTICA</b>	
1.1 La fibra óptica	3
1.2 Guiado de luz en fibras ópticas	4
1.2.1 Degeneración, polarización y birrifringencia	5
1.2.2 Guiado débil	5
1.2.3 Conteo de modos	6
1.2.4 Índice efectivo de corte	6
1.3 Apertura numérica	6
1.4 Ancho de banda y dispersión	7
1.4.1 Dispersión intrínseca e intermodal	8
1.4.2 Velocidad de grupo y dispersión cromática	8
1.5 Transferencia de potencia en fibras multimodo	9
1.5.1 Condiciones de inserción	9
1.6 Mecanismos de guiado convencional	10
1.6.1 Guiado en fibras de núcleo estructurado (PCF)	10
1.6.2 Pérdidas de confinamiento	11
1.6.3 Conteo de modos en PCF	12
1.6.4 Manipulación de la dispersión	12
<b>CAPITULO II</b>	
<b>FABRICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS</b>	
2.0 Fabricación de fibras ópticas	14
2.1 Producción de la preforma	14
2.1.1 Preformas de Bragg	14
2.1.2 Apilamiento de capilares	14
2.1.3 Perforación de preformas monolíticas	15
2.1.4 Extrusión	16
2.1.5 Extrusión reactiva	17
2.1.6 Inyección en moldes	17

2.1.7 Casting	17
2.2 Estirado de la fibra y diseño del horno	17
 <b>CAPITULO III</b>	
<b>REDES LPG EN FIBRA ÓPTICA</b>	
3.1 Transmitancia en redes LPG	19
3.2 Fabricación de redes LPG	20
3.2.1 LPG inducida mecánicamente	20
3.2.2 LPG gravada con láser de CO <sub>2</sub>	20
3.2.2.1 Grabado punto por punto	21
3.2.2.2 Grabado en línea	21
3.3 Características de las redes LPG	22
3.4 Redes LPG gravadas en fibras especiales PCF	25
3.5 Red LPG gravada en fibra afinada (TAPERS)	32
3.6 Implementación de equipo experimental para la elaboración y caracterización de sensores LPG de fibra óptica	35
 <b>CAPITULO IV</b>	
<b>APLICACIONES DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES LPG</b>	
4.1 Aplicaciones de los sensores de fibra óptica	39
4.2 Sensores basados en cambios de la intensidad de la luz trasmitida por la fibra óptica	40
4.2.1 Sensor de nivel de líquidos	40
4.2.2 Sensor de sonido	41
4.2.3 Sensor de curvatura	46
4.2.4 Sensor de desplazamiento	51
4.2.5 Sensor de fibra óptica tipo LPG aplicado al monitoreo de vibraciones y determinación del módulo de Young dinámico de materiales	58
4.2.6 Sensores de fibra óptica tipo LPG aplicado a la determinación de esfuerzos y deformaciones en suelos	67
4.2.7 Sensor LPG aplicado al ensayo de materiales.	72
4.3 Sensores interferométricos	75

---

4.3.1 Interferómetro FABRY PEROT gravado sobre fibra óptica usando láser de CO <sub>2</sub>	75
4.3.2 Sensor de índice de refracción basado en interferómetros coaxiales de Michelson gravado en fibra óptica para la detección de etanol disuelto en gasolina	77
4.3.3 Sensor LPG Mach–Zehnder aplicado al análisis de composición de combustible en tiempo real	82
4.3.4 Refractómetro Fabry-Perot asistido por una red LPG	92
4.3.5 Redes de Bragg y de período largo LPG gravadas en fibra óptica SIDE CORE	103
<b>CAPITULO V</b>	
CONCLUSIONES	107
BIBLIOGRAFÍA	108

## Lista de figuras

<i>Figura 0.1 Experimento de Tyndall</i>	1
<i>Figura 0.2 Equipo para grabación de redes LPG</i>	2
<i>Figura 1.1 Fibra óptica</i>	3
<i>Figura 1.2 a) fibra monomodo SMF, b) fibra multimodo MMF</i>	3
<i>Figura 1.3 Respuesta espectral de las fuentes</i>	4
<i>Figura 1.4 Fibras de núcleo estructurado</i>	4
<i>Figura 1.5 Fibras con perfiles de índices</i>	6
<i>Figura 1.6 Ensanchamiento del pulso</i>	9
<i>Figura 1.7 Guiado por bandgap fotónico</i>	10
<i>Figura 1.8 La estructura de una fibra bandgap fotónica</i>	11
<i>Figura 1.9 Las pérdidas de confinamiento de una fibra PCF</i>	12
<i>Figura 1.10 Dispersión de una PCF</i>	13
<i>Figura 2.1 Preforma con núcleo de sílice</i>	15
<i>Figura 2.2 Perforado de preformas mPOF</i>	15
<i>Figura 2.3 Estiramiento de preformas mPOF</i>	16
<i>Figura 2.4 Moldes para casting de preformas poliméricas</i>	17
<i>Figura 2.5 Torre de estiramiento de preformas de sílice</i>	18
<i>Figura 2.6 Torre de estiramiento de preformas mPOF</i>	18
<i>Figura 3.1 Arreglo experimental red mecánica LPG</i>	20
<i>Figura 3.2 Equipo para grabado de redes de período largo (LPG)</i>	21
<i>Figura 3.3 Redes gravadas con láser de CO<sub>2</sub></i>	21
<i>Figura 3.4 Evolución de la red LPG</i>	21
<i>Figura 3.5 Evolución de la LPG versus tiempo de exposición del láser</i>	22
<i>Figura 3.6 Espectros de transmisión de las fibras Draka y F4</i>	22
<i>Figura 3.7 Valores de los mínimos de la transmitancia</i>	23
<i>Figura 3.8 Transmisión de la LPG versus la longitud de la red</i>	23
<i>Figura 3.9. Ancho de resonancia versus la longitud L de la MLPG</i>	24
<i>Figura 3.10 Resonancia (<math>\lambda_m</math>) de modos LP<sub>1m</sub> versus <math>\Lambda</math> de la red LPG</i>	24
<i>Figura 3.11. Birrifringencia de los modos LP<sub>1m</sub></i>	25
<i>Figura 3.12 Equipo para la caracterización óptica de las redes LPG</i>	25
<i>Figura 3.13 Fibras de cristal fotónico (PCF)</i>	26
<i>Figura 3.14 Estructura dieléctrica de una PCF</i>	28

<i>Figura 3.15 Índices del modo fundamental en una PCF</i>	28
<i>Figura 3.16 Fibras ópticas especiales</i>	29
<i>Figura 3.17 Índice refractivo efectivo versus <math>\Lambda</math> (PCF)</i>	29
<i>Figura 3.18 PCF con red hexagonal de huecos</i>	30
<i>Figura 3.18b Red mecánica LPG en PCF con arreglo hexagonal de huecos</i>	30
<i>Figura 3.19 LPG gravados con láser CO<sub>2</sub> en fibras PCF</i>	31
<i>Figura 3.20 Red LPG gravadas en PCF con D/<math>\Lambda</math> variable</i>	31
<i>Figura 3.21 Espectros de transmisión de la LPG en PCF con D/<math>\Lambda</math> variable</i>	32
<i>Figura 3.22 PCF: Sensibilidad a variación del índice refractivo externo</i>	32
<i>Figura 3.23 Espectro de transmisión de una LPG en fibra óptica afinada</i>	33
<i>Figura 3.24 Fibra afinada con perfil bicónico</i>	33
<i>Figura 3.25 Oscilaciones en la transmitancia de un taper</i>	34
<i>Figura 3.26 Geometría para cálculo de los efectos de curvatura del Taper</i>	34
<i>Figura 3.27 Diagrama esquemático del equipo para grabado de redes LPG</i>	35
<i>Figura 3.28 Láser de CO<sub>2</sub> y el trasladador micrométrico para grabado LPG</i>	36
<i>Figura 3.29. Red LPG grabada en fibra óptica</i>	37
<i>Figura 3.30 La figura muestra la luz atravesando una red LPG</i>	37
<i>Figura 3.31 Respuesta dinámica del sensor LPG</i>	37
<i>Figura 3.32 Transformadas de Fourier de la transmitancia LPG</i>	38
<i>Figura 4.1 Intensidad de la luz transmitida versus el radio de curvatura</i>	39
<i>Figura 4.2 LPG como sensor de nivel de aceite</i>	40
<i>Figura 4.3 LPG detección de los pulsos transversales</i>	41
<i>Figura 4.4 Transmitancia de las LPGs al paso de un pulso longitudinal</i>	43
<i>Figura 4.5 Transmitancia de las LPGs al paso de un pulso transversal</i>	44
<i>Figura 4.6 Medición de variaciones en la curvatura de un material</i>	46
<i>Figura 4.7 Red LPG grabada con láser de CO<sub>2</sub> en fibra SMF28e</i>	46
<i>Figura 4.8 Red LPG mecánica em fibra PCF de sílica</i>	47
<i>Figura 4.9 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra SMF28</i>	47
<i>Figura 4.10 Linealidad del sensor LPG de curvatura</i>	48
<i>Figura 4.11 Fibra PCF con núcleo hexagonal. Laboratorio de UNICAMP</i>	48
<i>Figura 4.12 Unión de fibra PCF de núcleo hexagonal con fibra común mono modo</i>	48
<i>Figura 4.13 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra PCF de 5 anillos</i>	49

<i>Figura 4.14 Red LPG en PCF como sensor de curvatura</i>	49
<i>Figura 4.15 Fotografía de fibra afinada</i>	51
<i>Figura 4.16 Transmitancia de la fibra afinada versus desplazamiento</i>	52
<i>Figura 4.17 Linealidad del sensor de desplazamiento tipo taper</i>	52
<i>Figura 4.18 Transmitancia del taper: corrimiento de fase versus desplazamiento</i>	53
<i>Figura 4.19 Curvatura del taper</i>	53
<i>Figura 4.20 Transmitancia del taper curvado al ir aumentando el desplazamiento</i>	54
<i>Figura 4.21 Curvatura del taper en forma de S</i>	54
<i>Figura 4.22 Transmitancia del taper curvado en S al ir aumentando la curvatura</i>	55
<i>Figura 4.23 Método sencillo de obtener curvatura en forma de S</i>	55
<i>Figura 4.24 Transmitancia de taper de 30 <math>\mu\text{m}</math> curvado en S</i>	55
<i>Figura 4.25 La fotografía muestra un taper con “curvatura congelada”</i>	56
<i>Figura 4.26 Transmitancia del taper “curvatura congelada” versus curvatura</i>	56
<i>Figura 4.27 Sensibilidad a flexión de la red LPG</i>	59
<i>Figura 4.28. Viga en voladizo</i>	60
<i>Figura 4.29 Transmitancia LPG versus la deflexión del voladizo</i>	61
<i>Figura 4.30 Arreglo experimental usado para monitorear la vibración flexural</i>	62
<i>Figura 4.31 Transmitancia LPG versus la deflexión (k) es expresada en mV/mm.</i>	62
<i>Figura 4.32 Desplazamiento velocidad y aceleración flexural detectado con LPG</i>	63
<i>Figura 4.33 Frecuencias de los primeros armónicos <math>f_1</math> versus la longitud de voladizo del cantiléver</i>	64
<i>Figura 4.34 Esfuerzos presentes al interior del suelo</i>	67
<i>Figura 4.35 Variación de la transmitancia del sensor LPG mecánico versus la Carga superficial sobre el suelo</i>	67
<i>Figura 4.36 Sensores de carga LPG grabadas en fibra monomodo usando un láser de <math>\text{CO}_2</math></i>	68
<i>Figura 4.37 Se muestra el arreglo experimental usado para la determinación de esfuerzos transmitidos y deformación del suelo</i>	69
<i>Figura 4.38 Medición de la deformación del suelo versus la profundidad</i>	69
<i>Figura 4.39 Prueba de compresión axial de probeta de concreto</i>	72

<i>Figura 4.40 Barra de acero con una FBG y un strain gage pegados juntos para la lectura de su deformación axial por tracción</i>	73
<i>Figura 4.41 Interferómetro Fabry-Perot</i>	75
<i>Figura 4.42 Espectro de transmisión del interferómetro Fabry-Perot</i>	75
<i>Figura 4.43 Sensor Fabry-Perot de índice de refracción externo</i>	76
<i>Figura 4.44 Sensor Fabry-Perot <math>\Delta\lambda</math> vs <math>n_{\text{externo}}</math></i>	76
<i>Figura 4.45 Sensor interferométrico MLPG tipo Michelson</i>	78
<i>Figura 4.46 MLPG-Michelson interferómetro. Visibilidad de las frangas de interferencia</i>	78
<i>Figura 4.47 MLPG-Michelson interferómetro. Frangas de interferencia en función de la longitud de la cavidad del interferómetro</i>	79
<i>Figura 4.48 MLPG-Michelson: Reflectancia versus <math>\lambda</math></i>	79
<i>Figura 4.49 MLPG-Michelson interferómetro, curva de sensibilidad</i>	80
<i>Fig. 4.50 Configuración experimental para la fabricación de MLPG</i>	83
<i>Figura 4.51 Diagrama esquemático del interferómetro MLPG Mach – Zehnder</i>	84
<i>Figura 4.52 Se muestran los espectros individuales de las redes MLPG y el espectro de transmisión de las redes asociadas en serie</i>	85
<i>Figura 4.53 Diagrama esquemático del sensor interferométrico MLPG Mach – Zehnder con fibra adelgazada entre las redes MLPGs</i>	85
<i>Figura 4.54 Respuesta del sensor de agua-etanol</i>	86
<i>Figura 4.55 Desplazamiento espectral de las franjas interferométricas. MLPGs</i>	87
<i>Figura 4.56. Dispositivo de interrogación para lectura del interferómetro MLPG Mach – Zehnder</i>	88
<i>Figura 4.57 Curva de calibración del interferómetro MLPG Mach – Zehnder</i>	89
<i>Fig. 4.58 Red de periodo largo (LPG) grabada en fibra óptica</i>	92
<i>Figura 4.59 Transmitancia de red de periodo largo <math>\Lambda_{LPG} = 374 \mu\text{m}</math></i>	94
<i>Figura 4.60 Transmitancia de redes FBG</i>	94
<i>Figura 4.61 Transmitancia de la red LPG con respuesta espectral fijada</i>	95
<i>Figura 4.62 Espectro de transmisión de las redes de periodo largo LPG y de periodo corto FBGs del sensor de índice refractivo</i>	95
<i>Figura 4.63 Redes FBG. Separación inicial de sus dips de resonancia</i>	96



<i>Figura 4.64 Longitud de fibra usada para sintonizar las redes de Bragg</i>	96
<i>Figura 4.65 Sensor 2: Longitud de fibra usada para sintonizar las redes de Bragg</i> <i>L = 50 mm</i>	96
<i>Figura 4.66 Diagrama esquemático del sensor de índice refractivo</i>	97
<i>Figura 4.67 Espectro de transmisión. Tensado de una de las redes de Bragg</i>	97
<i>Figura 4.68 Espectro de transmisión. Redes de Bragg sintonizadas</i>	97
<i>Figura 4.69 Espectro de transmisión del sensor sintonizado con la red LPG</i> <i>en contacto con aire y con agua</i>	98
<i>Figura 4.70 Espectro de reflexión del sensor con la red LPG en</i> <i>contacto con aire y con agua</i>	98
<i>Figura 4.71 Espectro de transmisión del sensor con la red LPG en contacto</i> <i>con el aire, mostrando la separación entre los picos de resonancia</i> <i>con distinta polarización</i>	98
<i>Figura 4.72 Espectro de reflexión del sensor con la red LPG en contacto</i> <i>con el aire, mostrando la separación entre los picos de resonancia</i> <i>con distinta polarización</i>	99
<i>Figura 4.73 Corrimiento de los picos de resonancia de transmisión</i> <i>al poner el sensor en contacto con diferentes líquidos</i>	99
<i>Figura 4.74 Corrimiento de los picos de resonancia de reflexión</i> <i>del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua</i>	99
<i>Figura 4.75 Corrimiento de los picos de resonancia de reflexión</i> <i>del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua</i>	100
<i>Figura 4.76 variación de <math>\lambda</math> de resonancia de transmisión del sensor</i> <i>en contacto con glucosa disuelta en agua destilada al 1.66%</i>	100
<i>Figura 4.77 Sensor 2: Espectro de reflexión del sensor con la red LPG</i> <i>en contacto con aire y con agua</i>	100
<i>Figura 4.78 Corrimiento de los picos de resonancia de transmisión</i> <i>del sensor 2 para diferentes concentraciones de glucosa en agua</i>	101
<i>Figura 4.79 Posición de los picos de resonancia del sensor 2 para</i> <i>diferentes concentraciones de glucosa en agua.</i>	101
<i>Figura 4.80 Fibra Side Core</i>	103
<i>Figura 4.81 Luz transmitida por la pared y núcleo del capilar side-core de PMMA</i>	104
<i>Figura 4.82 Red LPG y red de Bragg a ser grabadas en side-core</i>	104

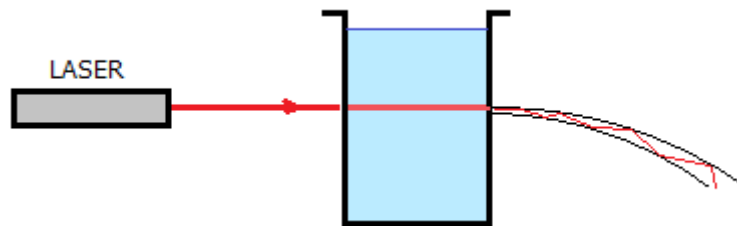
<i>Figura 4.83 Espectro de transmisión de la red LPG gravado en Side-core</i>	104
<i>Figura 4.84 Espectro de transmisión de la LPG side-core para distintos valores del índice de refracción externo</i>	105
<i>Figura 4.85 a) <math>\Delta\lambda</math> versus la variación del índice de refracción externo, b) Simulación de la respuesta del sensor para dos diámetros de diseño de la fibra side-core</i>	105

*Lista de tablas*

Tabla 4.1 Tiempos de viaje de los pulsos transversales y longitudinales excitados en una barra de Aluminio	44
<i>Tabla 4.2 Regla de acero</i>	64
<i>Tabla 4.3 Módulos de Young</i>	65
<i>Tabla 4.4 Parámetros de elasticidad del suelo</i>	70

## INTRODUCCIÓN

La reducción de la pérdida de transmisión en fibras ópticas junto con importantes desarrollos en las fuentes de luz, detectores y tipos de fibra óptica, han originado el gran crecimiento de la industria de fibra óptica durante las últimas cuatro décadas. Desde el nacimiento de la comunicación por fibra óptica coincidente con la fabricación de fibras ópticas de baja pérdida y la operación de láser de semiconductores en 1970, el progreso científico y tecnológico en este campo ha sido tan acelerado que ya estamos en la quinta generación de fibra óptica para sistemas de comunicación. Desarrollos recientes en amplificación y multiplexación por división de longitud de onda (WDM) nos están llevando a sistemas de comunicación con pérdida casi "cero" y ancho de banda "infinito".



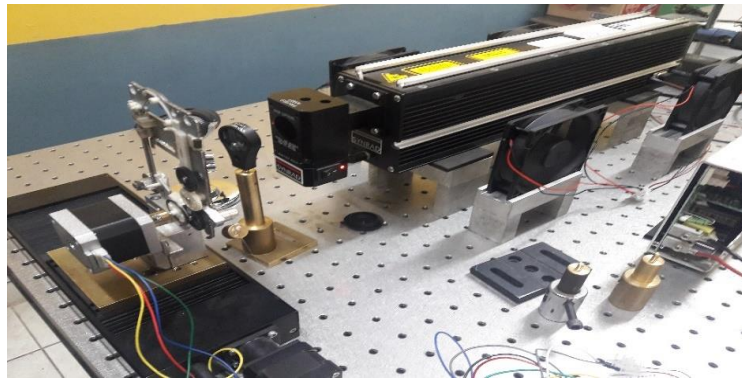
*Figura 0.1 Experimento de Tyndall mostrando el fenómeno de guiado de la luz por reflexión interna total.*

Asimismo, redes de difracción gravadas sobre la fibra óptica, han permitido controlar las propiedades de propagación de la luz en su interior posibilitando su uso como filtros espectrales, como componentes de compensación de dispersión y en sistemas de sensoramiento con multiplexación. La sensibilidad de estos sensores a la perturbación de las condiciones del entorno de la fibra, ha dado origen a una amplia gama de aplicaciones.

Han pasado casi cuatro décadas desde que la investigación sobre sensores de fibra óptica fue iniciada (1967). Se han utilizado diversos enfoques y tecnologías para medir varios parámetros físicos diferentes, sin embargo, en muchos casos, los sistemas de sensores de fibra óptica no están disponibles en forma completa, es decir, incluidos los dispositivos electrónicos de detección y procesamiento de señales; a pesar de ello, el futuro es muy prometedor porque sensores de fibra óptica exhiben ventajas bien conocidas como compactidad, inmunidad a la interferencia electromagnética, alta sensibilidad, gran ancho de banda y peso mínimo. Estas propiedades hacen que los sensores de fibra óptica sean dispositivos clave en entornos radiactivos y/o explosivos, donde la detección y evaluación de los niveles de radiación, cambios de temperatura o presencia de gases son muy importantes. Se han desarrollado sensores de fibra óptica para medir deformaciones, temperatura, presión, corriente eléctrica, voltajes, concentración de gases, rotación, vibración, aceleración, flexión, torsión, desplazamiento. A la fecha, sus aplicaciones se han extendido a diversos campos: en ingeniería civil (sistemas de monitoreo de esfuerzos, deformaciones, vibraciones en estructuras con fibra óptica embutida), en medicina (imagen endoscópica, medición de pH, oxígeno, glucosa en sangre), en la industria química y bioquímica (monitoreo de reacciones, presencia de gases, fotoluminiscencia, dinámica de biomoléculas), en agricultura, en la caracterización de materiales y otros sectores. Estos sensores de fibra óptica se basan en medidas de intensidad, fase, polarización y pueden ser embebidos e interrogados remotamente y pueden ser implementados muchos de ellos sobre una misma fibra óptica.

Con vista a desarrollar esta tecnología y en el marco de esta tesis, un equipo de fabricación de sensores de fibra óptica basados en redes LPG ha sido implementado en el laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. Los sensores fabricados por nuestro equipo ya han

sido primeramente aplicados a la determinación del módulo de elasticidad de diferentes maderas empleadas en nuestro medio.



*Figura 0.2 Equipo para grabación de redes LPG en fibras ópticas. Laboratorio de Física UNI/FIC.*

## **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

El gran desarrollo de la tecnología de fibras ópticas y su empleo en comunicaciones, así como en monitoreo de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, hacen de esta tecnología una herramienta de vital importancia a ser entendida y desarrollada en nuestro medio. En la actualidad las ciudades tienden a ser inteligentes, para ello estas deben tener una red de sensores distribuidos y contar con edificios inteligentes a fin de optimizar su gasto de energía, monitorear la seguridad estructural de las edificaciones y brindar seguridad a los habitantes a fin de protegerse de la delincuencia.

En nuestro país existen escasos investigadores y especialistas en esta tecnología, por lo que se hace necesario implementarla y difundirla.

## **3. HIPÓTESIS**

Es posible implementar un equipo para la fabricación de sensores de fibra óptica basado en redes de período largo (LPG), asimismo aplicar dichos sensores a la medición de diferentes parámetros físicos de materiales y estructuras.

## **4. OBJETIVOS**

A continuación, se presentan los objetivos planteados en la presente tesis.

### **4.1 Objetivo General**

Implementación de un equipo para la fabricación de sensores de fibra óptica basado en redes LPG. Aplicación de dichos sensores a la medición de diversos parámetros físicos.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- Desarrollar la teoría de sensores de fibra óptica basados en redes de período largo.
- Montaje de equipo experimental de fabricación de sensores LPG.
- Caracterización óptica de los sensores LPG fabricados.
- Aplicaciones de los sensores LPG fabricados.

## CAPÍTULO 1

## 1.1 LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, con capacidad de guiar la luz, normalmente introducida por un láser o por un LED (Light-Emitting Diode) por reflexión total.

La fibra óptica está constituida por tres capas, como puede observarse en la figura 1.1: núcleo, cubierta del núcleo y recubrimiento. En fibras de vidrio, el núcleo central está hecho de cuarzo puro al que se le añaden pequeñas cantidades de dopantes (óxido de silicio y germanio), tiene un alto índice de refracción y un diámetro aproximado de  $7\ \mu\text{m}$  en fibras monomodo y mayores de  $50\ \mu\text{m}$  en fibras multimodo. La cubierta, hecha de un material similar, presenta un índice de refracción algo menor para satisfacer la ley de Snell, limitando de este modo, la propagación de la luz a lo largo del núcleo. Tiene un diámetro de  $125\ \mu\text{m}$ . La última capa exterior llamada también recubrimiento, está hecha a base de acrilato, para dar a la fibra resistencia mecánica, protegiéndola frente a posibles daños y humedad; tiene un diámetro de  $250\ \mu\text{m}$ .

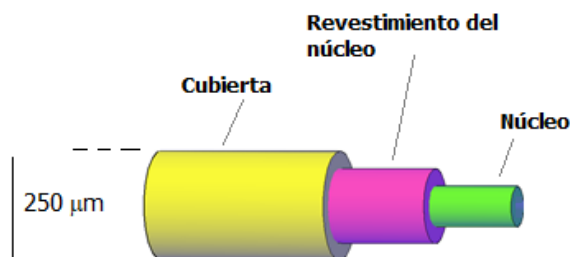


Figura 1.1 Fibra óptica mostrando el núcleo, el recubrimiento del núcleo y la cubierta protectora de la fibra.

La figura 1.2 muestra fotografías de la sección transversal de fibras monomodo y multimodo comerciales.

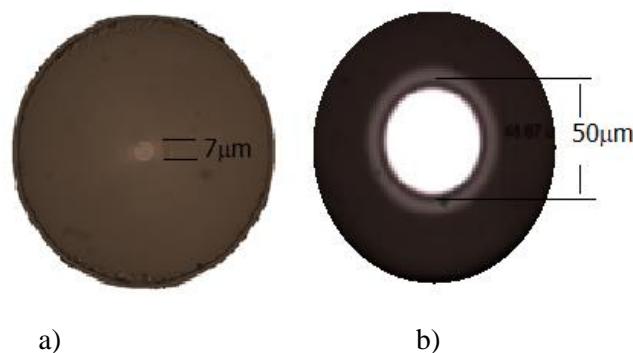


Figura 1.2 a) fibra monomodo SMF, b) fibra multimodo MMF.

## FUENTES DE LUZ

La figura 1.3 muestra las intensidades espectrales de diversas fuentes de luz comerciales: una fuente supercontinuo obtenida de la excitación por láser infrarrojo de una fibra PCF dopada con tierras raras, una fuente de luz blanca obtenida por foco de filamento incandescente y una fuente led super-diodo. Nosotros elegimos adquirir la fuente de luz super-diodo (Safibra OFLS-B-15)

centrada en 1500nm por ser la más indicada para nuestras redes LPG debido a su alta intensidad de salida en la ventana de frecuencia de telecomunicaciones.

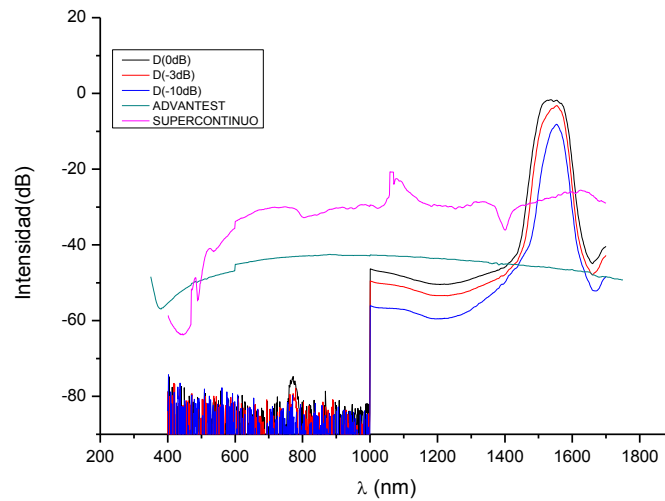


Figura 1.3 Respuesta espectral de las fuentes: Advantest (luz blanca), Supercontinuo y superdiodo Safibra OFLS-B-15. Post Doctorado UNICAMP 2014.

## FIBRAS ÓPTICAS CON NÚCLEO ESTRUCTURADO

La figura 1.4 muestra algunos tipos de fibras ópticas con núcleo estructurado (PCF)

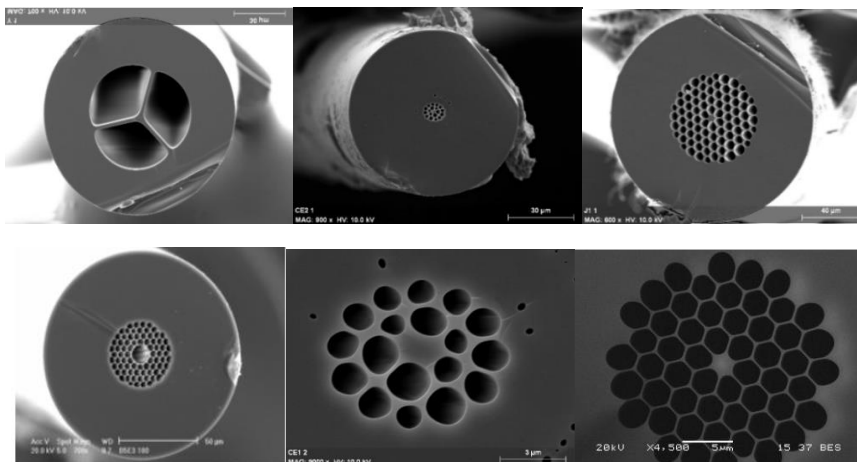


Figura 1.4 Fibras de núcleo estructurado fabricados en el laboratorio de fibras especiales de la UNICAMP en Brasil.

## 1.2 GUIADO DE LUZ EN FIBRAS ÓPTICAS

Modo: Es una configuración de campo electromagnético que se propaga sin cambio a lo largo de la fibra, con una velocidad de fase dada por [1.1]:

$$n_{eff} = \frac{c}{v_{ph}} \quad (1.1)$$

Una constante de propagación  $\beta$  está relacionada al índice efectivo por:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = kn_{eff} = \frac{\omega}{c} n_{eff} \quad (1.2)$$

Los modos basados en la naturaleza de la constante de propagación pueden ser clasificados como: modos ligados, modos de radiación y modos evanescentes.

Modos de radiación y ligados tienen constantes de propagación reales, ellos pueden propagarse indefinidamente, sin pérdidas. Los modos ligados son localizados, con la mayor parte de su potencia cercana al núcleo. Ellos pueden tener formas complicadas pero su potencia decae exponencialmente con el radio. Modos de radiación son deslocalizados, su perfil de intensidad no decae muy rápidamente. Modos débilmente ligados tienen constantes de propagación complejas, ellos pueden propagarse grandes distancias, pero decaen con una rapidez determinada por la parte imaginaria de la constante de propagación.

Solamente modos débilmente ligados con pequeña rapidez de decaimiento son de interés. Modos evanescentes tienen constante de propagación puramente imaginaria, ellas no se propagan, decaen exponencialmente en la distancia de unas pocas longitudes de onda.

Fibras convencionales soportan, en principio, todos los tipos de modos, aunque, en muchas situaciones solamente modos ligados y de radiación son relevantes. Fibras micro estructuradas, principalmente soportan modos débilmente ligados.

### 1.2.1 DEGENERACIÓN, POLARIZACIÓN Y BIRREFRINGENCIA

Cada modo tiene un índice de refracción efectivo bien definido, sin embargo, es posible que dos o más modos tengan el mismo índice efectivo, en este caso, los modos son llamados degenerados. Si la degeneración es causada por simetría de la guía de onda, entonces los modos van a ser degenerados para todas las longitudes de onda. Una onda plana en el espacio libre puede ser descompuesta siempre en dos estados de polarización ortogonal por lo que fibras comerciales de índice de paso con simetría perfecta circular pueden soportar un par de modos ligados degenerados polarizados ortogonalmente. Se considera degeneración accidental cuando los modos tienen el mismo índice efectivo, pero no existe simetría, esto sucede a longitudes de onda específicas llamadas puntos de cruce. Los perfiles de intensidad y estados de polarización de los modos degenerados accidentalmente no están necesariamente relacionados.

La degeneración es muy importante para entender los efectos de las perturbaciones. Toda perturbación que no conserve la simetría va a romper la degeneración resultando en dos modos con índices efectivos cercanos. Esos modos tendrán propiedades similares pero diferentes estados de polarización. Una fibra es llamada birrefringente cuando los modos son similares o tienen iguales perfiles de intensidad, pero diferentes estados de polarización, viajan a diferentes velocidades dentro la fibra.

### 1.2.2 GUIADO DÉBIL

Muchas fibras convencionales muestran una diferencia de índice refractivo relativamente pequeño entre el núcleo y su revestimiento. En fibras de sílice, de paso de índice, los índices del núcleo y su cubierta son 1,48 y 1,46 respectivamente, en fibras de polímeros el contraste es mayor: 1,49 y 1,41; en ambos casos la diferencia es lo suficientemente pequeña para poder usar el modelo de guiado débil [Gloge 1971]. La aproximación de guiado débil reduce las ecuaciones de Maxwell para E y H a una sola ecuación escalar [Snyder and Love 1983].

Mientras muchas características de las fibras ópticas micro estructuradas MOFs pueden ser deducidas desde esta aproximación, sin embargo, esta aproximación no es estrictamente apropiada debido a que el contraste de índice refractivo entre el aire y la sílice o el polímero es tan grande que la aproximación de guiado débil no lleva a soluciones numéricas muy aproximadas.



### 1.2.3 CONTEO DE MODOS

Para guías de onda convencionales y para fibras micro estructuradas el número total de modos ligados está relacionado al parámetro V que conceptualmente indica como el guiado es logrado por el balance de difracción y refracción. Para grandes valores de V, el número total de modos está dado por:

$$N_{modos} \approx \frac{1}{2}V^2 \quad (1.3)$$

Una apropiada generalización para el parámetro V fue dada por [Snyder and Love 1983]:

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ 2 \int_0^\infty [n^2(r) - n_{cl}^2(r)] r dr \right\}^{1/2} \quad (1.4)$$

donde,  $n_{cl}$  es el índice de refracción del recubrimiento del núcleo

La figura 1.5 muestra fibras con diferentes perfiles de índice de refracción. Todas las fibras tienen el mismo radio de núcleo y diferencia de índice núcleo-revestimiento, sin embargo, ellas tienen diferente parámetro V y soportan diferentes números de modos.

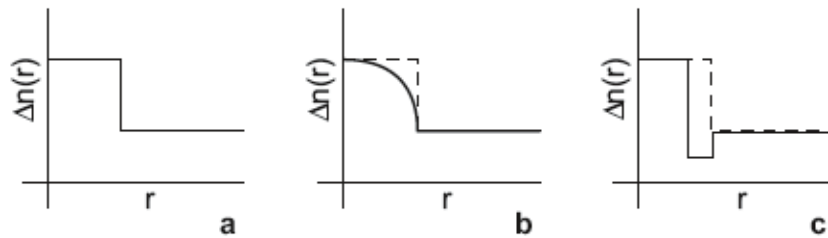


Figura 1.5 Fibras con perfiles de índices: a) paso de índice b) gradiente de índice c) índice con depresión.

### 1.2.4 ÍNDICE EFECTIVO Y CORTE

Modos ligados deben tener índices efectivos en el rango:

$$n_{cl} < n_{eff} < n_{max} \quad (1.5)$$

Donde  $n_{max}$  es el mayor índice en la fibra. Este rango puede ser entendido en términos de velocidades de fase: la velocidad de fase más lenta corresponde al índice refractivo más alto y la velocidad de fase más rápida posible corresponde a las ondas que pueden radiar hacia la cubierta del núcleo. Entonces el índice del recubrimiento sirve como un índice de corte para los modos ligados.

Si el índice refractivo no depende fuertemente de la longitud de onda, entonces cuando  $\lambda$  crece, ambos V y el número de modos decrecen gradualmente. Cuando  $\lambda$  crece cada modo alcanza un punto donde su índice efectivo cae debajo del valor del índice del recubrimiento: en este punto el modo cesa de estar ligado y viene a ser débilmente ligado.

En fibras convencionales, el modo ligado con la velocidad de fase más pequeña (o constante de propagación más grande) es llamado el modo fundamental  $HE_{11}$ . En general si  $n(r) \geq n_{cl}$  entonces la fibra debe soportar siempre al menos un modo. Cutoff es una propiedad del segundo modo y ocurre para la longitud de onda en la que el índice efectivo del segundo modo satisface  $n_{eff} = n_{cl}$ .

### 1.3 APERTURA NUMÉRICA

Cuando las longitudes de onda son mucho más pequeñas que el tamaño de la estructura espacial al interior de la fibra óptica, puede ser usada la aproximación de óptica geométrica. En esta aproximación, un rayo de luz va a viajar dentro de la fibra si su inclinación en la frontera

núcleo-revestimiento es menor que un ángulo crítico requerido para reflexión total interna. Por ello, las fibras ópticas solo conducen luz que incide en un cierto rango de ángulos, conocido como el cono de aceptación. El ángulo central del cono es llamado el ángulo de aceptación,  $\theta_{max}$ . El número de abertura NA es definido en función de este ángulo por:

$$NA = n_0 \sin \theta_{max} \quad (1.6)$$

Donde  $n_0$  es el índice refractivo del medio que rodea la entrada de la fibra. Para fibras de índice de paso:

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (1.7)$$

En fibras multimodo, el término abertura numérica de equilibrio también es usado. En esta situación  $\theta_{max}$  representa el mayor ángulo existente para todos los rayos asumiendo una distribución de equilibrio modal.

La abertura numérica puede depender de la longitud de onda de la luz.

#### DIÁMETRO DEL MODO DEL CAMPO O TAMAÑO DEL SPOT

El área de la sección transversal del núcleo de la fibra es crucial al determinar la facilidad para introducir luz en la fibra. Operacionalmente la cantidad de pérdida en una conexión de fibra es una medida de cuán fácil es la conexión. Para fibras de pocos modos, la extensión geométrica del núcleo no es tan importante como el diámetro del modo del campo (MFD) o tamaño del spot. Hay muchas definiciones del tamaño del spot, una caracterización que tiene importancia teórica es el tamaño del spot ( $\rho$ ) de Peterman: ( $\rho$ ) es obtenido desde la transformada de Fourier del patrón de campo cercano (perfil de la luz a la salida de la fibra) y así el tamaño del spot está inversamente relacionado al ancho del patrón de campo lejano.

$\rho$  puede ser definido como:

$$\frac{1}{\rho^2} = \frac{\int (|\nabla E|^2) dA}{\int |E|^2 dA} \quad (1.8)$$

Para condición de guiado débil, usando la expresión variacional para la constante de propagación [Snyder and Love 1983]:

$$n_{eff}^2 = n_{ave}^2 - \frac{1}{k^2 \rho^2} = n_{ave}^2 - \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \frac{\lambda^2}{\rho^2} \quad (1.9)$$

Donde se observa que el índice efectivo es más pequeño que el índice promedio por una cantidad relacionada al grado de localización del modo.

#### 1.4 ANCHO DE BANDA Y DISPERSIÓN

Fibras ópticas poliméricas POF tienen alta rapidez de transmisión de datos para corta distancia. Aplicaciones como TVHD requieren anchos de banda de hasta algunos Gigabits/s con un relativamente núcleo grande para hacer fácil la conectividad. En tales aplicaciones la dispersión puede influenciar significativamente la propagación del pulso. Los pulsos contienen un rango de frecuencias, y cuando éstas viajan a diferentes velocidades, la forma del pulso cambia llevando a errores en la detección del bit. En comunicación de datos donde los trenes de pulso son de alta velocidad, el ensanchamiento del pulso debido a la dispersión limita fundamentalmente la máxima rapidez de transmisión. En sistemas digitales, el mismo fenómeno que causa dispersión del pulso también causa variaciones en el tiempo de arribo de los pulsos, referidos como jitter.

Los anchos de banda son cuantificados como frecuencias (GHz) o rapidez de data (Gbit/s). La conversión entre esas cantidades depende de asunciones acerca de la propagación del pulso y tipo de codificación usado [Palais 1992].

La transmisión de datos en fibra óptica implica codificar una señal digital como un tren de pulsos de luz. Diferentes tipos de codificación son usados para indicar cuando cada bit es 1 o 0. Las dos codificaciones digitales más comunes son conocidas como retorno a cero (RZ) y no retorno a cero (NRZ). En un RZ, cada bit es localizado un tiempo  $T$ , con el pulso ocupando la mitad del tiempo  $T/2$  (la otra mitad es el retorno a cero). Como resultado el máximo posible ancho de banda es  $\leq 1/T$  y el máximo posible en velocidad de data es  $R = 1 \text{ bit} / T$ . En NRZ codificación del bit ocupa la longitud entera del pulso  $T$ . En este caso el ancho de banda de transmisión es  $\leq 1/2T$ , entonces la máxima velocidad de data es  $R = 2 \text{ bit} / T$ . En ambos casos, la dispersión del pulso a lo largo de la fibra puede ser descrita por un tiempo de retraso por unidad de longitud  $\delta\tau$ .

#### 1.4.1 DISPERSIÓN INTRÍNSECA E INTER-MODAL

En fibras ópticas monomodo, la dispersión tiene dos componentes: la debida al material con un índice refractivo ligeramente distinto a diferentes longitudes de onda (dispersión del material) y la debido a las características geométricas de la guía de onda (dispersión de guiado). Esos efectos son llamados de dispersión cromática o intermodal y originan un ensanchamiento del pulso  $\delta\tau_{intra}$ .

En fibras multimodo, diferentes modos viajan en la fibra a diferentes velocidades y perturbaciones en la fibra ocasionan que los pulsos en estas fibras se ensanchen o separen en sus componentes. Esto es llamado dispersión intermodal y origina un ensanchamiento del pulso  $\delta\tau_{inter}$ .

Se asume que dispersión intramodal e intermodal son independientes. Sus efectos sobre el pulso se combinan de acuerdo con la fórmula:

$$\delta\tau_{total} = \sqrt{\delta\tau_{intra}^2 + \delta\tau_{inter}^2} \quad (1.10)$$

El efecto de dispersión cromática es comúnmente proporcional al ancho de línea de la fuente de excitación usada, donde dispersión intermodal puede ser fuertemente influenciada por la mezcla de potencia.

#### 1.4.2 VELOCIDAD DE GRUPO Y DISPERSIÓN CROMÁTICA

La velocidad de propagación de un pulso está determinada no sólo por su velocidad de fase sino por la velocidad de grupo  $v_g$ . En fibras, la constante de propagación  $\beta$  varía con la frecuencia. La expresión más simple para la velocidad de grupo es la dada por:

$$\frac{1}{v_g} = \frac{\partial\beta}{\partial\omega} \quad (1.11)$$

El índice de grupo  $n_g$  es una cantidad adimensional análoga al índice efectivo, pero es definido en términos de la velocidad de grupo como:

$$n_g = \frac{c}{v_g} \quad (1.12)$$

Para guías de onda con guiado débil y en la ausencia de dispersión material, el índice de grupo es el mismo que el índice promedio.

La dispersión en la fibra a una longitud de onda  $\lambda$  puede ser caracterizada por el coeficiente de dispersión  $c$ :

$$D_\lambda = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (1.13)$$

La ecuación describe el cambio en el ancho del pulso por nanómetro de ancho espectral por unidad de distancia viajada en la fibra. Esto es cuantificado en ps/nm/km. Entonces,  $\delta\tau_{intra} = D_\lambda \Delta\lambda$  y el ensanchamiento total del pulso puede ser escrito como:

$$\delta\tau_{total} = \sqrt{D_{\lambda}^2 \Delta\lambda^2 + \delta\tau_{inter}^2} \quad (1.14)$$

### 1.5 TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN FIBRAS MULTIMODO

Perturbaciones que son el resultado del proceso de fabricación o que se originan de influencias externas pueden causar intercambio de potencia entre los modos en una fibra multimodo. Se observa que después de cierta longitud de propagación la distribución relativa de potencia entre los modos viene a ser estadísticamente constante. Esta distribución de equilibrio depende del diseño de la fibra y la naturaleza específica de las perturbaciones. Una característica importante de la distribución de equilibrio es que es independiente de las condiciones iniciales de inserción. El intercambio de potencia origina el decaimiento exponencial de cualquier configuración de equilibrio, la pendiente de este proceso define la longitud de equilibrio y puede variar de centímetros a kilómetros. En el equilibrio, cada paquete de energía puede asumirse que se mueve aleatoriamente entre los diferentes modos, entonces, en promedio, todos los paquetes de energía arriban al mismo tiempo.

#### 1.5.1 CONDICIONES DE INSERCIÓN

Si la distribución de potencia inicial excita modos de orden bajo, entonces la potencia debe extenderse a los modos de orden alto hasta alcanzar el equilibrio. En el caso en que la distribución de potencia inicial excite modos de orden alto, entonces la potencia debe repartirse a los modos de orden bajo hasta alcanzar el equilibrio.

Fibras de sílice tienen longitudes de equilibrio mayores de 1 km, mientras que para fibras poliméricas estas longitudes son menores que unas pocas decenas de metros.

Modo-mixing en una fibra multimodo tiene buenos y malos aspectos. Por un lado, el intercambio de energía entre modos rápidos y lentos incrementa el ancho de banda y por otro lado, el acoplamiento entre modos de alta pérdida con modos de baja pérdida reduce la pérdida total de la fibra. El efecto de mezcla de modos es mostrado en la figura 1.6, inicialmente el ensanchamiento del pulso es lineal, pero al alcanzar el equilibrio tiene una dependencia del tipo  $\sqrt{L}$  [1.2]:

$$\begin{aligned} \delta\tau_{inter} &= \delta_0 L, & L &\ll L_e \\ \delta\tau_{inter} &= \delta_0 \sqrt{LL_e}, & L &\gg L_e \end{aligned} \quad (1.15)$$

Entonces la longitud de equilibrio es un parámetro importante para determinar la forma en que el ancho de banda aumenta con la distancia.

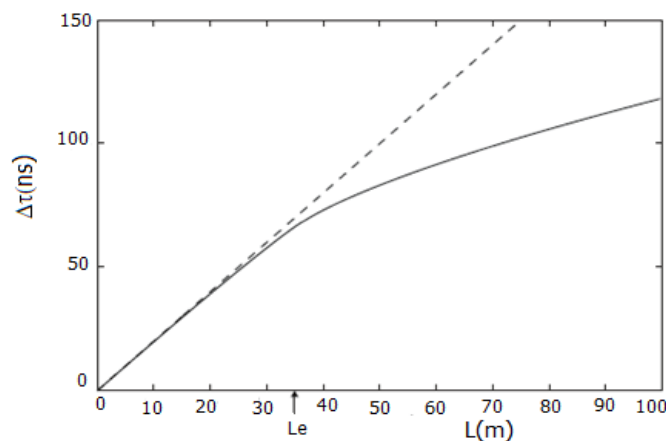


Figura 1.6 Ensanchamiento del pulso, debido a dispersión intermodal en una fibra multimodo. (ref. Marianne Large. "Microstructured polymer optical fibres").

## 1.6 MECANISMOS DE GUIADO CONVENCIONAL

Las fibras ópticas guían la luz por medio de la variación transversal del índice de refracción. En fibras convencionales, el índice de refracción del núcleo de la fibra es ligeramente mayor que el índice de refracción del recubrimiento, originando el guiado de la luz por reflexión total interna. Para ángulos menores que el ángulo crítico, parte de la luz es refractada hacia el recubrimiento del núcleo y parte es reflejada dando origen a modos del recubrimiento y modos del núcleo con pérdida de energía. Reflexión total interna es el mecanismo de guiado de casi todas las fibras ópticas, incluyendo la vasta mayoría de fibras ópticas PCF, la única diferencia en este último caso viene a ser que el índice refractivo del recubrimiento es originado por la microestructura y no variando la composición química del material que forma la fibra.

Trasmisión de la luz con características espectrales discretas es también observada en capilares de paredes delgadas. Aunque el guiado es débil, este presenta algunas de las características de guiado por band-gap. Este mecanismo de guiado ha sido usado raras veces en fibras ópticas, pero tiene una larga historia en guía de ondas planas. Estructuras de guía que hacen uso de este mecanismo son usualmente llamadas guías de onda ARROW (guías de onda reflectiva anti-resonante).

Los modos guiados en fibras ópticas de núcleo hueco son modos de mucha pérdida debido a que la región del recubrimiento soporta un continuo de modos. El efecto de introducir una microestructura en el recubrimiento es el de romper la continuidad de modos del recubrimiento en una serie de bandas discretas. Las regiones entre esas bandas no contienen modos y son llamados bandgaps. Cuando la luz en el núcleo tiene un vector de onda que corresponde a este bandgap, esta no se acopla a modos del recubrimiento y permanece guiada en el núcleo.

El guiado de luz en capilares de paredes delgadas tiene muchas de las características del guiado bandgap: la física detrás de ambos efectos es la misma. La diferencia entre guiado en capilares y guiado bandgap son los respectivos tamaños de la región del recubrimiento y la pérdida de transmisión. Existe una relación causal entre esas características. Un arreglo concéntrico de muchos capilares refleja más la luz incidente que un simple capilar y entonces confina la luz mucho mejor en el núcleo.

### 1.6.1 GUIADO EN FIBRAS DE NUCLEO ESTRUCTURADO (PCF)

#### GUIADO POR BANDGAP FOTÓNICO

Un arreglo periódico de capas planas de altos y bajos índices de refracción refleja un conjunto discreto de longitudes de onda. La proporción de luz reflejada por la estructura se incrementa con el número de capas, el contraste de índice refractivo y la uniformidad. Ninguna de esas propiedades cambia cuando el conjunto de capas es enrollado en una geometría cilíndrica (fig. 1.7) para formar la región del recubrimiento de la fibra [Argyros 2002]. Fuera de la región del bandgap la luz guiada por el núcleo puede acoplarse a modos del recubrimiento.

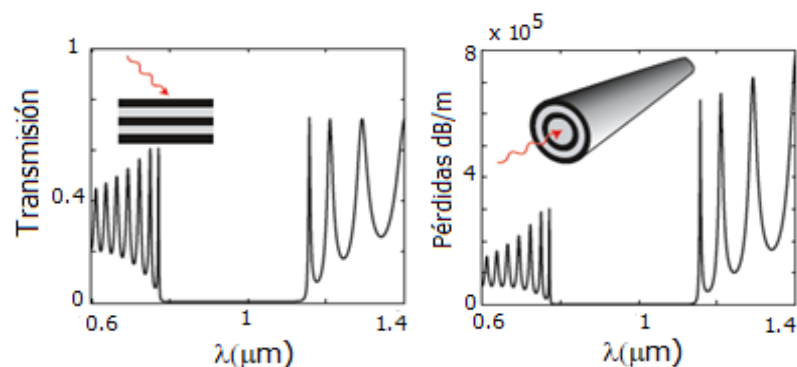


Figura 1.7 Guiado por bandgap fotónico depende de la periodicidad de las capas y del contraste en el índice refractivo (ref. Marianne Large. "Microstructured polymer optical fibres")

La fibra de Bragg mostrada en la figura 1.8 puede ser aproximada usando anillos de huecos [Argyros 2004].

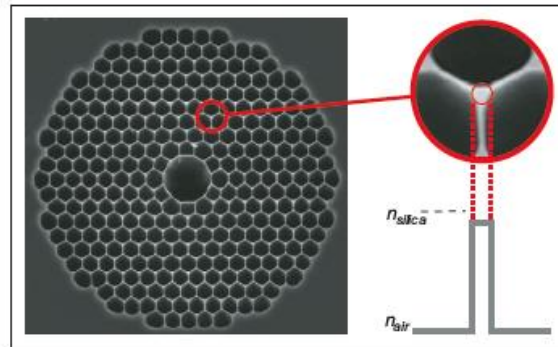


Figura 1.8 La estructura del recubrimiento de una fibra bandgap fotónica (Image of Crystal Fibre A/S, Blokken 84, 3460 Birkerød, Denmark)

El origen de los modos del recubrimiento en esas estructuras puede ser entendido considerando la fibra mostrada en la figura 1.8. La región sólida intersticial entre los huecos (rods) pueden ser considerados como núcleos individuales rodeados por “recubrimientos” de aire. Los modos del rod deben ser mono modos para  $V < 2,405$ . Si graficáramos los índices efectivos como función de la longitud de onda para los modos de un rod individual obtendríamos el diagrama de dispersión conocido. Para un arreglo de similares rods, las curvas de dispersión de los modos se transforman en bandas cuyo ancho es determinado por el grado de acoplamiento entre los rods: a longitudes de onda corta el modo del campo en cada rod es altamente confinado, a longitudes de onda larga los rods interactúan fuertemente.

Un modo localizado en el núcleo hueco, en el centro de la estructura, debe tener un índice efectivo cercano a la unidad. La luz es confinada en el núcleo cuando es incapaz de acoplarse a cualquier modo del recubrimiento; esto ocurre cuando el índice efectivo del modo del núcleo es muy diferente a los de los modos del recubrimiento. La mayoría de las fibras de bandgap fotónico son construidas usando muy alto contraste de índice (vidrio, polímero y aire).

Las estructuras en fibras bandgap tienen dos tipos de regularidades, la geometría de las inclusiones de alto índice (el grosor de los cilindros en el caso de las fibras de Bragg, o el radio y la forma de los rods en el caso de estructuras bi-dimensionales) y las regiones de bajo índice entre ellas. La regularidad de las regiones de alto índice es significativamente más importante que la regularidad de su espaciado, particularmente para bajos contrastes de índice. Los modos de las regiones de bajo índice son típicamente de índice efectivo muy bajo para lograr acoplamiento con el modo del núcleo. Las fibras bandgap operan parcialmente vía efecto ARROW guiado de Bragg, lo cual no implica estricta periodicidad, es significativo solamente para altos contrastes de índice o longitudes de onda larga. En la mayoría de los casos, la performance de las fibras bandgap es determinada más por la interface alrededor del hueco central que por la estructura del recubrimiento.

### 1.6.2 PÉRDIDAS DE CONFINAMIENTO

En fibras micro estructuradas PCF, la matriz material del núcleo y del recubrimiento es la misma, así que los modos no pueden estar confinados en el sentido de las fibras convencionales. La luz es capaz de escapar a través de los huecos o a través de los puentes entre ellos. Pérdidas a través de los huecos de aire ocurren debido a que los huecos son relativamente pequeños, permitiendo que los campos evanescentes tuneen entre ellos. El proceso es equivalente a efecto túnel mecánico-cuántico y también ocurre en fibras convencionales cuando el recubrimiento es de alto índice y es delgado. Este tipo de pérdida de confinamiento se aplica a todos los modos, y su efecto decrece exponencialmente con el número de anillos de huecos empleado. La luz puede ser perdida también a través de los puentes de alto índice entre los huecos. Este efecto es mucho más fuerte para modos de alto orden que para modos de bajo orden.

Pérdidas de confinamiento en un recubrimiento de núcleo micro estructurado es una propiedad que no puede ser apropiadamente entendida usando una descripción simple. En fibras mono modo y fibras bandgap, el impacto es más fuerte dependiendo de la fracción aire o el número de anillos de huecos que son requeridos para reducir las pérdidas a los niveles deseados (figura 1.9).

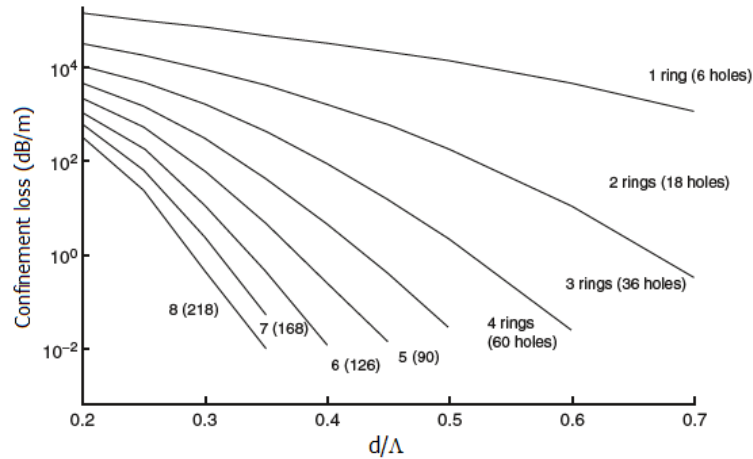


Figura 1.9 Las pérdidas de confinamiento de una fibra micro estructurada mono modo (ref. Marianne Large. "Microstructured polymer optical fibres" )

### 1.6.3 CONTEO DE MODOS EN FIBRAS MICROESTRUCTURADAS

Las pérdidas de confinamiento definen los modos que pueden propagarse distancias significantes. Muchas aplicaciones tienen una longitud práctica asociada  $L_{eff}$ : si potencia suficiente persiste en este modo para esa longitud, entonces el modo es considerado ligado. Entonces "pragmáticamente" fibras mono modo son aquellas donde el primer modo se propaga casi sin pérdidas sobre la longitud efectiva, mientras que el segundo modo esencialmente desaparece a la salida de la fibra.

Se define un índice efectivo del recubrimiento del núcleo para fibras micro estructuradas y se reescribe la fórmula para la apertura numérica NA como:

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cutoff}^2} \quad (1.16)$$

Fibras mono modo con núcleos de grandes áreas son extremadamente sensibles a pérdidas por curvatura [Knigh 1998].

### 1.6.4 MANIPULACIÓN DE LA DISPERSIÓN

El interés en las propiedades de la dispersión en fibras PCF se origina en la capacidad para afectar la transmitancia cambiando la microestructura. Esto es particularmente importante en fibras poliméricas, donde las pérdidas por dispersión son mayores que en fibras de sílice. La figura 1.10 muestra las curvas de dispersión de una serie de PCFs mono modo, con estructuras del recubrimiento ligeramente diferentes, modeladas usando PMMA como el material matriz.



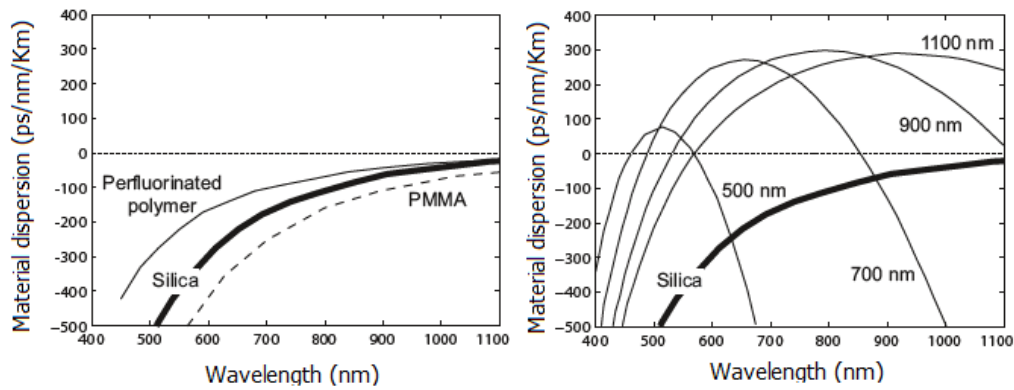


Figura 1.10 Dispersión de una PCF puede variar fuertemente al cambiar la microestructura. La figura de la derecha muestra la dispersión de PCFs de sílice con diferentes diámetros (ref. Marianne Large. "Microstructured polymer optical fibres")

La curva de dispersión de la PCF exhibe dos longitudes de onda donde la dispersión se anula, y una región de dispersión anómala (donde las longitudes de onda corta viajan más rápido que las longitudes de onda larga). Los puntos de dispersión cero se corren a las longitudes de onda más cortas cuando el tamaño de la estructura es reducida [León-Saval 2005].

Pulsos ópticos de alta intensidad son usados para producir otros efectos no lineales en fibras. Físicamente esto implica interacción multifotón o luz incidente interactuando con campo eléctrico externo. Esas interacciones cambian las propiedades ópticas del material, originando procesos como generación de segundo armónico, en el cual la energía de dos fotones idénticos es combinada para formar un fotón con doble de energía, procesos de dispersión estimulada tales como dispersión Raman y Brillouin. Aplicaciones que explotan esos efectos incluyen la transmisión de solitones, conversión de longitud de onda, regeneración de datos, demultiplexado, amplificación Raman.



## CAPÍTULO 2

### 2. FABRICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS

La fabricación de fibras ópticas de sílice, de fibras micro estructuradas y de fibras poliméricas es un proceso que envuelve dos pasos: la creación de una preforma conteniendo una versión a gran escala de la estructura deseada en la fibra, seguido de calentamiento y estiramiento de la preforma para producir la fibra final. Tres situaciones emergen sin embargo cuando tratamos de tornar este proceso en una realidad.

La primera es como producir mejor la microestructura deseada en la preforma. En el caso de las fibras de sílice, la preforma es hecha apilando tubos de vidrio, en el caso de las fibras poliméricas las proformas son hechas de polymethyl methacrylate (PMMA) y existe una diversidad de opciones de fabricación: apilamiento de capilares, perforación y estirado de una preforma, por extrusión, o por vaciado en un molde.

La segunda es como calentar y jalar la preforma en una manera controlada y reproducible. El problema central es como proveer suficiente calor para ablandar adecuadamente la preforma. Dos posibles opciones han sido usadas: calentamiento de la preforma por convección y radiación.

La tercera cuestión concierne a entender como el proceso total impacta en la calidad final de la fibra.

#### 2.1 PRODUCCIÓN DE LA PREFORMA

##### 2.1.1 PREFORMAS BRAGG

Dos metodologías vienen sido usadas para la fabricación de preformas multicapas todo-polímero fibra Bragg [Gao 2006]. Una usa deposición consecutiva de capas de dos diferentes polímeros por evaporación sobre la superficie interior de un tubo de polímero rotante. El proceso de evaporación del solvente fue desarrollado para dos sistemas: Polymethyl methacrylate (PMMA)/ Polystyrene (PS) and Polyvinylidene fluoride (PVDF)/Polycarbonate (PC) [2.1].

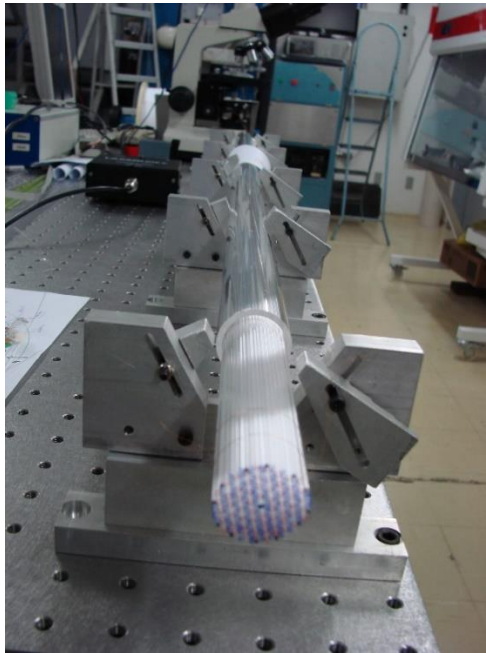
La otra técnica usa el swiss-roll, enrollando juntos dos diferentes filmes poliméricos [2.2].

##### 2.1.2 APILAMIENTO DE CAPILARES

Las primeras fibras ópticas micro estructuradas fueron hechas de sílice [Knight 1996] con las proformas hechas a mano, apilando capilares (figura 2.1). Una torre de estiramiento convencional fue usada para fabricar los capilares que luego fueron apilados formando la estructura deseada [Knight 2001]. Este método ha sido el método dominante para fabricar preformas PCF de sílice. Los capilares apilados son introducidos en un tubo para crear la preforma con la estructura deseada.

Existen muchas posibles variaciones en la forma de apilar capilares y una gran variedad de preformas han sido producidas, usando combinaciones de capilares y varillas sólidas de diferentes diámetros o materiales [2.3]. Las primeras fibras hechas de capilares apilados PMMA fueron reportados por [Park 2002]. Sin embargo, stress residual en los capilares causan contracción de la estructura apilada cuando se estira la fibra, originando importante distorsión estructural. El problema fue superado calentando los capilares para aliviar cualquier stress. Una estructura empaquetada hexagonal de 6 capas con un alto grado de regularidad fue producida por [Huang 2004].

Fibras ópticas poliméricas mono modo mPOF han sido fabricados desde proformas de polystyrene apiladas [Shin 2004] y la técnica también ha sido usada con perfluorinated polímero (5 capas hexagonales con núcleo sólido) [Kondo 2004]. Una alta fracción aire fue alcanzada a través de presurización de la preforma.

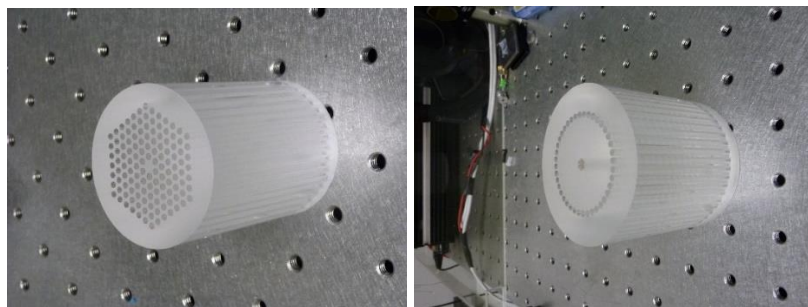


*Figura 2.1 Preforma con núcleo de sílice producida apilando capilares con cubierta externa. Laboratorio de Fibras ópticas de la UNICAMP.*

### 2.1.3 PERFORACIÓN DE PREFORMAS MONOLÍTICAS

La primera fibra bandgap fue fabricada perforando un bloque de material de alto índice refractivo [Yablonovitch 1991]. En polímeros, el método viene siendo usado por diferentes grupos [Large 2001], [Barton 2004], [Jensen 2005], [De Barros Cordeiro 2019] en diversos materiales. Aunque no es una técnica viable para producción comercial de mPOF, una diversidad de preformas pueden ser fabricadas en forma automatizada usando la PC con control numérico [Barton 2004].

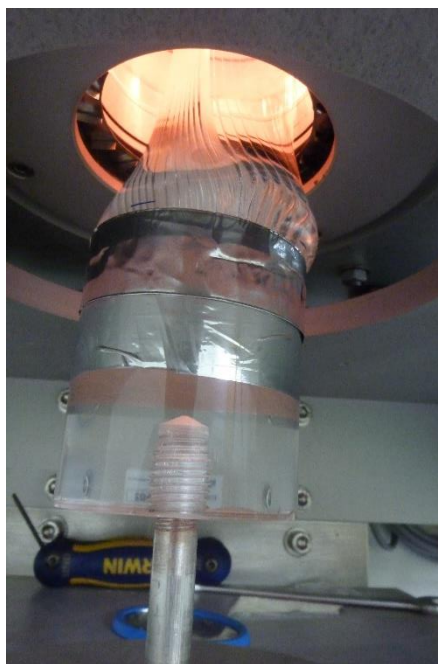
El uso de brocas recubiertas permite producir huecos profundos con un mínimo de rugosidades producidas al taladrar tubos de PMMA obteniendo huecos profundos con un aceptable acabado liso, lo último es de importancia para minimizar la rugosidad superficial inducida al jalar la fibra (figura 2.2) [Barton 2003]. Los tamaños de los huecos en la preforma son de típicamente 1-10 mm de diámetro con 0,1mm de grosor de paredes entre los huecos y con una profundidad de 65mm. La técnica de perforación puede reproducir estructuras que son difíciles o imposibles de apilar. Sin embargo, esta técnica tiene una serie de limitaciones, la más obvia es que el proceso de fabricación puede ser muy lento y generalmente se requiere un estiramiento en dos etapas [Zagari 2004]. Otra limitación es que el proceso de agujerear la preforma puede tener un mayor impacto en las propiedades finales de la fibra [Barton 2003].



*Figura 2.2 Perforado de preformas mPOF. Laboratorio de Fibras Especiales. UNICAMP 2014.*

Recientemente una variedad de alternativas para perforación y apilado han sido considerados para fabricar preformas poliméricas con el objetivo de producir fibras en cantidades comerciales. Éstas incluyen extrusión, inyección en moldes y fundición, cada una de las cuales resulta en una preforma monolítica en la cual la estructura de huecos es creada en un simple proceso.

Extrusión ha sido usado extensivamente para producir preformas estructuradas en materiales distintos a la sílice [Allan 2001]. Material macizo calentado es presionado contra un molde que tiene la forma de la estructura deseada.



*Figura 2.3 Estiramiento de preformas mPOF. Laboratorio de Fibras Especiales. UNICAMP 2014.*

### **2.1.4 EXTRUSIÓN**

Extrusión ha sido usado para fabricar preformas de fibras ópticas poliméricas micro estructuradas [Ebendorff 2007]. Un extrusor de pistón fue usado para forzar un cilindro caliente de polímero a través el molde para formar una preforma con un perfil transversal complejo. La ventaja de este método es que envuelve un solo paso automatizado por el cual, huecos no circulares, grandes fracciones de aire y preformas largas pueden ser obtenidas. El método fue demostrado vía la fabricación de una mPOF con un pequeño núcleo, alta fracción de aire, el cual no puede ser fabricado fácilmente por apilado o por perforación. Un pistón controlado por la computadora es usado para extrudar la preforma estructurada desde un comercial de PMMA de 3 cm de diámetro. El PMMA es calentado (a una temperatura en el rango de 135 a 175 °C) y entonces forzado (a una velocidad entre 0.1 a 0.5 mm/min) a través de un molde con la geometría requerida.

El rango de temperatura para extrusión de PMMA es limitado por la deformación (ondulamiento) a bajas temperaturas y por degradación térmica a altas temperaturas. La deformación en forma de ondulamiento de la preforma origina la distorsión del perfil transversal de la preforma debido a la elasticidad del polímero caliente [Gupta 2000].

Aunque el incremento de la temperatura y la disminución de la velocidad del pistón reduce la deformación en los bordes, en la práctica, temperaturas altas de extrusión, pueden llevar a degradación térmica y muy bajas velocidades del pistón son imprácticas. Además, la temperatura afecta la rugosidad superficial de la preforma. Superficies lisas y brillantes son

obtenidas alrededor de los 170 °C, mientras que una superficie mate es observada debajo de esta temperatura. Para temperaturas encima de los 170 °C el brillo superficial se compensa con el adelgazamiento de la preforma (tapering) debido al estrechamiento del material, caliente, por su propio peso.

### 2.1.5 EXTRUSIÓN REACTIVA

Recientemente ha sido desarrollado un proceso para la producción de POF convencional de polybutyl methacrylate, por extrusión reactiva [Berthet 2006]. Un pre-polímero viscoso es creado desde MMA monómero y benzoyl peróxido (catalizador) a 85-90 °C en un período de 6 horas; éste es entonces colocado en una torre extrusora y calentado gradualmente de 80 a 185°C hasta completar la polimerización luego de 12 horas. El proceso final envuelve la presión del PMMA en un molde precalentado.

### 2.1.6 INYECCIÓN EN MOLDES

Éste es uno de los procesos más usados, consiste en inyectar a alta presión (100 Mpa) el polímero caliente en un molde de acero inoxidable recubierto con un material de baja adhesión como Teflón. El método ha sido usado para fabricar mPOF por [Wang 2005]. El molde fue conectado directamente a una torre extrusora con una boquilla de 70mm de diámetro. Óptimas condiciones fueron encontradas a temperaturas de 185 °C y presión de 18 MPa. El PMMA es introducido en el molde precalentado creando una preforma de 70mm de diámetro, 400 mm de longitud, teniendo un arreglo de huecos.

### 2.1.7 CASTING

Casting ha sido una técnica usada para producir preformas de vidrio y de polímero. Esta técnica ofrece la ventaja de que los huecos y espaciamentos pueden ser alterados en forma independiente. Para vidrios, casting envuelve el uso de (baja temperatura) tecnología sol-gel [Bise 2005]. Para polímeros, los precursores químicos necesarios son introducidos en un molde para producir la estructura hueca (figura 2.4). La mezcla polimerizada en el molde, generalmente requiere de desgasificado para evitar formación de burbujas. Las preformas MPOF producidas por casting vienen sido producidas en china [Wang 2005].



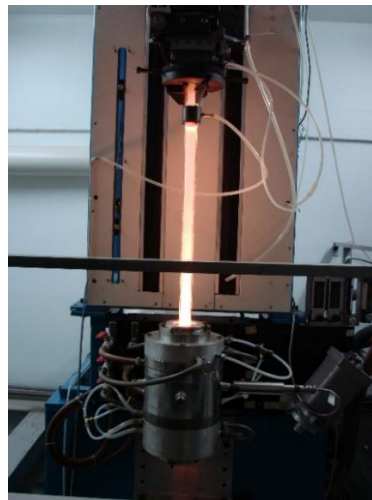
Figura 2.4 Moldes para casting de preformas poliméricas estructuradas (Ref. Dr. Lili Wang, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics)

## 2.2 ESTIRADO DE LA FIBRA Y DISEÑO DEL HORNO

En el estirado de la fibra, una preforma estructurada de mayor escala es reducida a fibra de dimensiones reducidas. El proceso es virtualmente independiente de la forma en que la preforma fue fabricada y es esencialmente el mismo usado para fibras convencionales. La preforma es introducida en un horno tal que alcance su temperatura de transición y pueda ser deformada

rápido. Cuando el material es jalado hacia abajo, se forma un cuello donde ocurre un rápido cambio de diámetro. La longitud de esta región del cuello está definida por un conjunto de parámetros que incluyen el tamaño y temperatura del horno, la rapidez con que el material pasa a través del horno y las propiedades térmicas del polímero. De particular importancia es la dependencia de la viscosidad del material versus la temperatura.

La forma de la región del cuello es críticamente importante debido a su impacto en la deformación de los huecos a la hora de jalar la fibra. Una cuestión clave cuando intentamos reducir las deformaciones de la microestructura cuando jalamos la fibra es la necesidad de un perfil de temperatura radial tan uniforme como sea posible. La presencia de una gran fracción de aire dentro de una preforma mPOF puede reducir la transferencia de calor en la dirección radial debido a la pobre conductividad térmica del aire [Lyytikäinen 2004]. El diseño y operación del horno son entonces claves para cualquier torre de jalado de fibra mPOF (figura 2.5). Muchas mPOF requieren que el tamaño final de los huecos sea del orden de un micrón o menos y aquí una funda (sleeving stage) es añadida al proceso de fabricación: una segunda preforma de 2 a 6 mm de diámetro es obtenida desde la primera preforma (caño microestructurado), este caño es enfundado dentro de un tubo de PMMA para formar una preforma secundaria de 12 mm, la que es estirada hasta formar la fibra.



*Figura 2.5 Torre de estiramiento de preformas de sílice. Enver Chillce. UNICAMP2010*



*Figura 2.6 Torre de estiramiento de preformas mPOF. Laboratorio de Fibras Especiales. UNICAMP2014*



## CAPÍTULO 3

### SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES LPG

Redes de periodo largo (LPG) grabadas en fibras ópticas, han sido extensivamente investigadas en los últimos años, por sus aplicaciones en filtros de banda, en ecualización espectral óptica y en sensoramiento de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos como: tensiones mecánicas, esfuerzos, deformaciones, curvatura, inclinaciones, humedad, presiones, nivel de líquidos, temperatura, concentración de gases, concentración de sustancias químicas y bioquímicas en soluciones, etc. [3.1].

Redes LPG pueden ser grabadas en fibras ópticas permanentemente por diferentes técnicas: por exposición a luz ultravioleta, por descarga de arco eléctrico, por irradiación de la fibra con láser de CO<sub>2</sub>. Redes LPG también pueden ser grabadas temporalmente presionando la fibra con una red mecánica.

En esta investigación se presentan los espectros de trasmisión de redes LPG obtenidas por presión mecánica, y por gravado permanente usando laser de CO<sub>2</sub>. Caracterizamos la respuesta de transmitancia de dichas redes y mostramos sus aplicaciones en el sensado de la concentración de sustancias químicas presentes en soluciones, relacionados al control ambiental y la bio-medicina, así como su aplicación a la medida de desplazamientos, curvatura, presiones, vibraciones, valores de índices de refracción, visando a su aplicación en el monitoreo de edificaciones.

#### 3.1 TRANSMITANCIA EN REDES LPG

Una LPG es una perturbación periódica en el índice de refracción de la fibra, dicha perturbación acopla la luz viajando por el núcleo con modos de la cubierta que rodea el núcleo y que cumplen la condición de casamiento de fase dado por la expresión [3.2]:

$$\beta_{01}^{co} - \beta_{1m}^{cl} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (3.1)$$

donde,  $\beta$  es la constante de propagación ( $\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$ ) y  $\Lambda$  es el período de la red.

La ecuación de modos acoplados para la luz viajando por el núcleo de la fibra óptica y para la luz viajando por el recubrimiento del núcleo es expresada en las ecuaciones (3.2) y (3.3):

$$\frac{dA^{co}}{dz} = j\kappa(z)A^{co} + j\sum_m \frac{p}{2}\kappa(z)A_m^{cl}e^{-j2\delta^{cl-co}z} \quad (3.2)$$

$$\frac{dA_m^{cl}}{dz} = j\sum_m \frac{p}{2}\kappa(z)A^{co}e^{-j2\delta^{cl-co}z} \quad (3.3)$$

donde la constante de acoplamiento  $\kappa(z)$  es proporcional a la variación  $\sigma(z)$  inducida en el índice de refracción de la fibra y es calculada de la expresión:

$$\kappa(z) = w\epsilon(0)n_1^2\sigma(z)\int_0^{2\pi}d\varphi\int_0^{a_1}rdr(E_r^{cl}E_r^{co*} + E_\varphi^{cl}E_\varphi^{co*}) \quad (3.4)$$

$\delta^{cl-co}$  es el parámetro de desfasaje:

$$\delta^{cl-co} = \frac{1}{2}(\beta_{01}^{co} - \beta_{1m}^{cl}) \quad (3.5)$$

La transmitancia de la fibra, calculada desde las ecuaciones anteriores, es entonces expresada en la ecuación (3.6):

$$\frac{P_{cl}^{(n)}(L)}{P_{01}(0)} = \frac{\text{Sen}^2[\kappa_g L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g}\right)^2}]}{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g}\right)^2} \quad (3.6)$$

### 3.2 FABRICACIÓN DE REDES LPG

#### 3.2.1 REDES LPG INDUCIDAS MECÁNICAMENTE

Redes LPG de presión mecánicas han sido gravadas (Lim et al., 2004, D. Lee et al., 2006, Parka et al., 2006) presionando la superficie de la fibra con una placa provista de dientes periódicamente espaciados induciendo cambios periódicos en el índice de la fibra [3.3]. Con este método, la intensidad y la longitud de onda resonante de la LPG mecánicamente inducida pueden ser fácilmente sintonizadas ajustando la presión sobre el dispositivo. La eficiencia del acoplamiento entre el modo del núcleo y los modos del recubrimiento del núcleo varía con la presión ejercida.

Las redes LPGs inducidas mecánicamente (MLPGs) son dispositivos atractivos debido a su simplicidad, flexibilidad, éstos pueden ser usados en cualquier tipo de fibra monomodo, multimodo o aún en fibras huecas (fibras especiales) y las pérdidas en la transmitancia pueden ser controladas en tiempo real haciendo de estos sensores importantes en el campo del filtrado espectral, equalización de ganancia, modulación óptica y otras aplicaciones. Como las propiedades de las redes LPG dependen de las características particulares de fabricación, mostramos primero sus propiedades básicas para luego pasar a las aplicaciones.

#### MONTAJE DE SISTEMA PARA GRABACIÓN MECÁNICA DE REDES DE PERÍODO LARGO (MLPGS).

La figura 3.1 muestra el arreglo experimental típico para la inducción mecánica de redes LPG y la observación de su respuesta espectral. Se ilumina la fibra con una fuente de luz blanca, se presiona la fibra con una superficie provista de irregularidades triangulares dispuestas periódicamente, con periodos  $\Lambda$  del orden de 100  $\mu\text{m}$  a 1000  $\mu\text{m}$  típicamente.

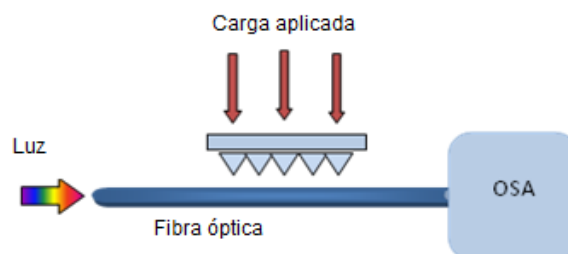


Figura 3.1 Arreglo experimental para la generación de una red mecánica LPG. Un analizador de espectro óptico es usado para observar la respuesta espectral de transmitancia de la red LPG.

La red originada acopla el modo fundamental guiado por el núcleo de la fibra a modos guiados por el recubrimiento del núcleo y que cumplen la condición de casamiento de fase observándose pérdidas resonantes en la transmitancia de la luz. La luz transmitida por la fibra es observada en un analizador de espectros ópticos (OSA), el que posee una resolución típica de 50 picómetros.

#### 3.2.2 REDES LPG GRAVADAS CON LÁSER DE CO<sub>2</sub>

La figura 3.2 muestra el montaje implementado para la grabación de redes permanentes en fibra óptica, usando un láser Synrad de 1 watts de potencia. La luz del láser de 10.6  $\mu\text{m}$  de longitud de onda es dirigida hacia la fibra por espejos de oro y es focalizada sobre la fibra por una lente de Selenuro de Cadmio. La fibra es jalada por un motor de paso controlado por un traslador micrométrico programable de la Newport. El sistema está siendo automatizado para controlar el paso de movimiento de la fibra, la potencia del láser y el tiempo de exposición de la luz laser sobre la fibra.



Figura 3.2 Equipo para grabado de redes de período largo (LPG) en fibras ópticas. Laboratorio de Física UNI-FIC (2019).

Los perfiles de las redes gravadas son mostrados a continuación en la figura 3.3:

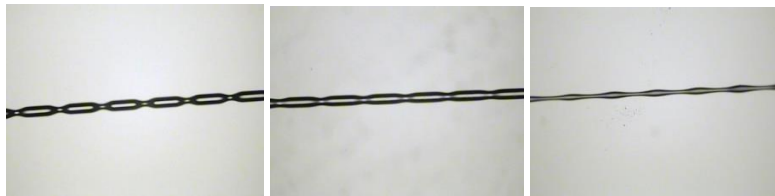


Figura 3.3 Redes gravadas con láser de CO<sub>2</sub> en fibra comercial monomodo. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2010.

#### 3.2.2.1 GRABADO PUNTO POR PUNTO

La fig. 3.4 muestra la formación de la red a medida que se incrementa el número de periodos o puntos de grabado con el láser de CO<sub>2</sub> sobre la fibra óptica.

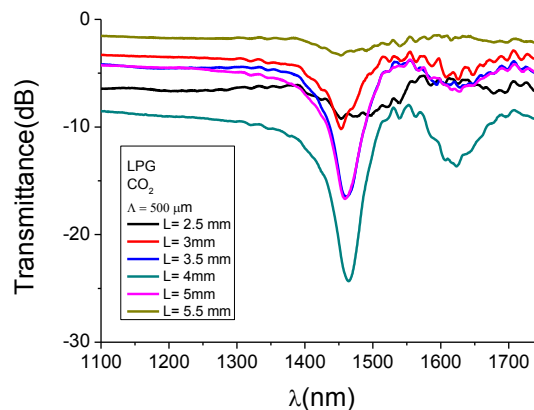


Figura.3.4 Evolución de la red LPG al incrementar el número de periodos. Laboratorio de fibras especiales. Post Doctorado UNICAMP 2010.

#### 3.2.2.2 GRABADO EN LÍNEA

La fig. 3.5 muestra la formación de la red a medida que se incrementa el tiempo de exposición o de grabado con el láser de CO<sub>2</sub> sobre la fibra óptica, en cada punto de la red.



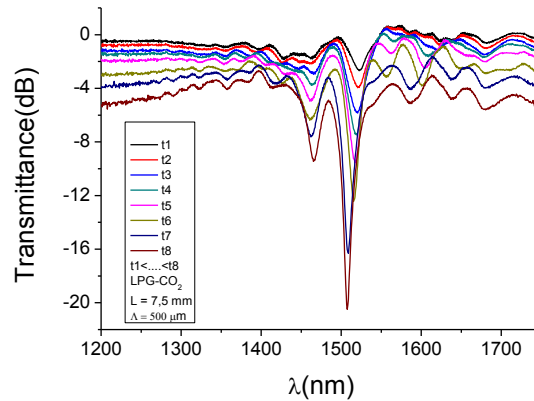


Figura 3.5 Evolución de la LPG al incrementar el tiempo de exposición del láser sobre la fibra monomodo. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2010.

### 3.3 CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES LPG

Estudiamos aquí, las características básicas de la transmitancia de las redes LPG inducidas por presión mecánica, observando la dependencia del espectro resultante en la transmitancia de la luz cuando se varían parámetros como la longitud de la red, el período de la red, la presión sobre la fibra y el tipo de fibra.

Las redes fueron inducidas en dos tipos de fibra comerciales monomodo, Draka y F4 y en fibras con estructuras internas especiales llamadas fibras fotónicas. Las curvas a continuación muestran los espectros de transmitancia en función de la presión ejercida sobre las fibras:

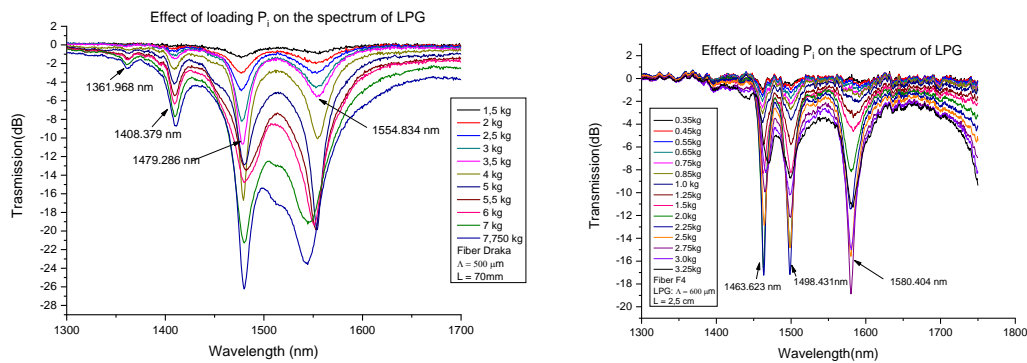


Figura 3.6 Las figuras muestran los espectros de trasmisión de las fibras Draka y F4 obtenidos con diferentes presiones aplicadas sobre las redes de longitud  $L$  y período  $\Lambda$ , observándose los diferentes acoplamientos a modos de la casca localizados a las longitudes de onda de los mínimos de la transmitancia. Post Doctorado UNICAMP 2010.

La figura (3.7) muestra los valores de los mínimos de la transmitancia en función de la fuerza ejercida sobre la red, para un modo de acoplamiento ( $LP_{1m}$  en fibra F4 y  $LP_{1n}$  en fibra Draka). Se observa una dependencia de acuerdo a la ecuación (3.6).

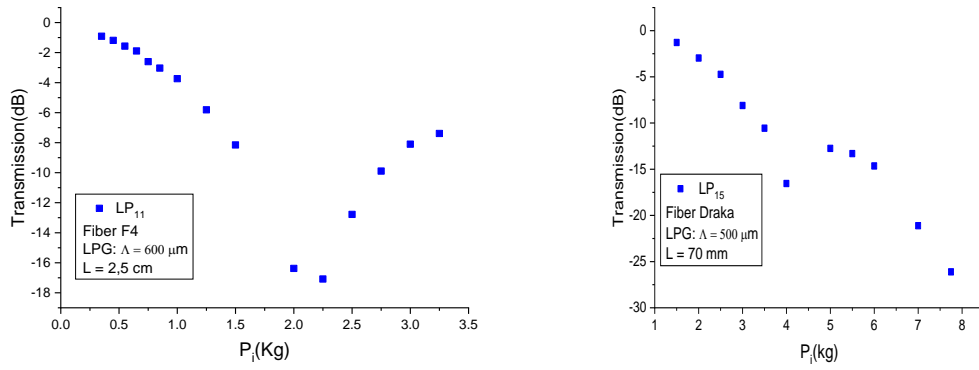


Figura 3.7 Valores de los mínimos de la transmitancia en función de la fuerza ejercida sobre la red, para un modo de acoplamiento ( $LP_{1m}$  en fibra F4 y  $LP_{1n}$  en fibra Draka). Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Se hicieron medidas de la transmitancia variando la largura L de la red LPG, así como su período  $\Lambda$ . Se muestran algunos de los datos experimentales en las figuras (3.8), figura (3.9), figura (3.10):

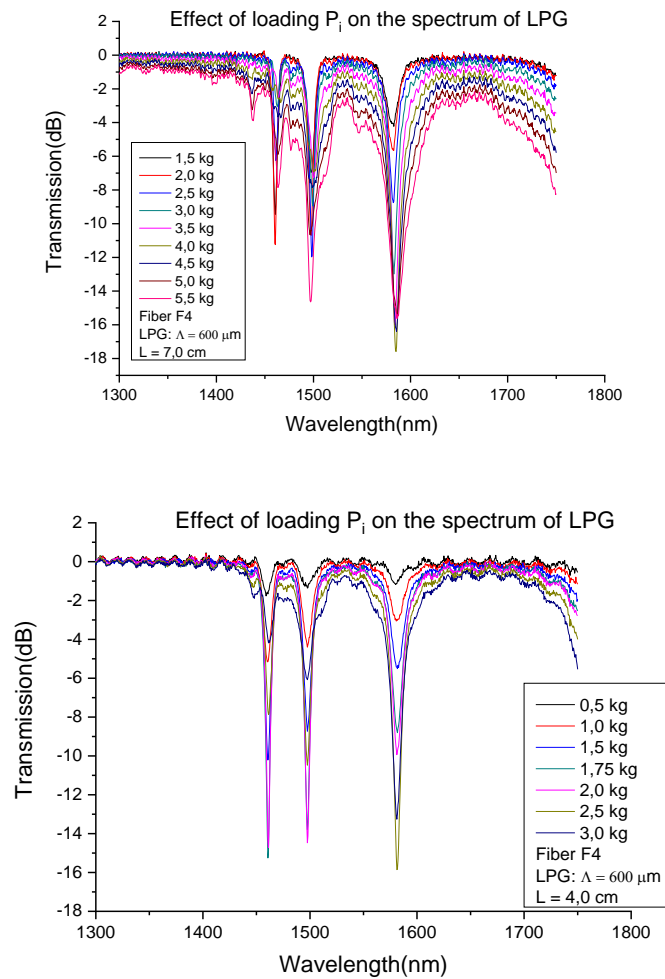


Figura 3.8 Las figuras muestran los espectros de transmisión obtenidos en la fibra F4, variando la largura L de la red y variando la presión ejercida sobre ella. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2010.

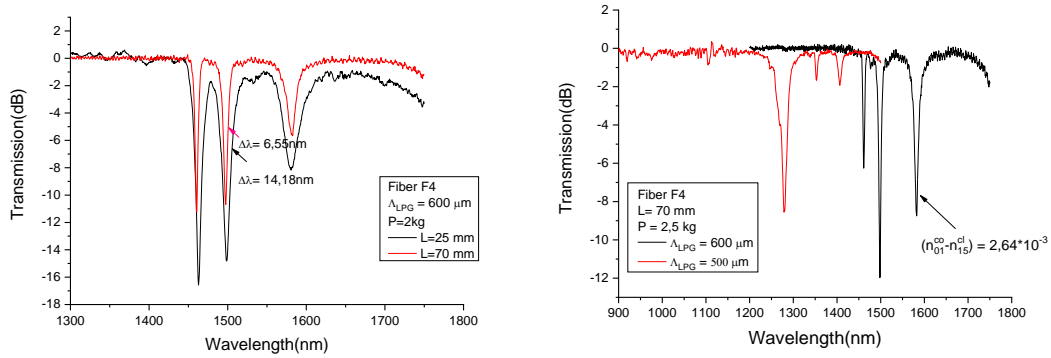


Figura 3.9. Las figuras muestran la disminución en el ancho de los picos de resonancia al aumentar la largura  $L$  de la red MLPG y el corrimiento de los picos al variar el período de la red (curva roja:  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$  ; curva negra:  $\Lambda = 600 \mu\text{m}$ ). Post Doctorado UNICAMP 2010.

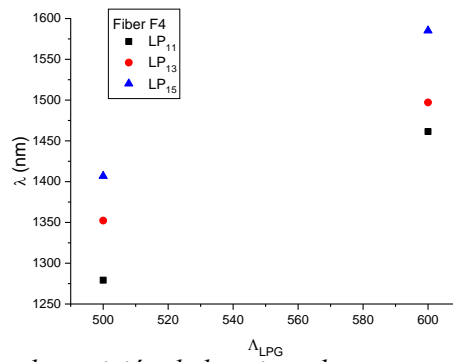
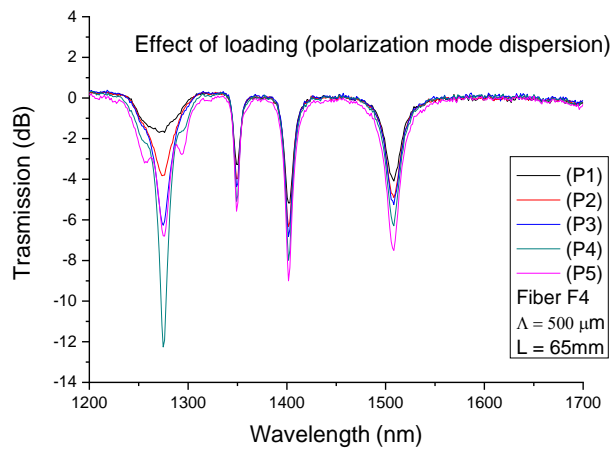


Figura 3.10 La figura muestra la posición de los picos de resonancia ( $\lambda_m$ ) de los modos de la casca  $LP_{1m}$  versus el período de la red LPG Inducida sobre la fibra F4. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2010.

En la figura 3.11 se puede observar intercambio de energía entre los modos de la casca acoplados, estimándose la birrifringencia inducida al presionar la red.



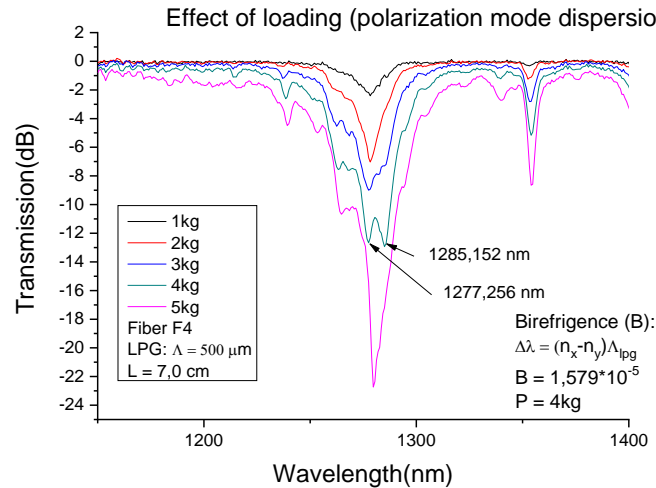


Figura 3.11. La figura superior muestra una fuerte disminución en el acoplamiento del modo de menor orden a partir de una presión  $P_4$  y aumento progresivo en la magnitud del acoplamiento en los modos de orden más alto aún a esta presión. Además, se observa la presencia de picos laterales en el modo de menor orden, apareciendo a partir de la presión  $P_4$ , ésta birrifrigencia notoria es calculada y mostrada en la figura inferior. Post Doctorado UNICAMP 2010.

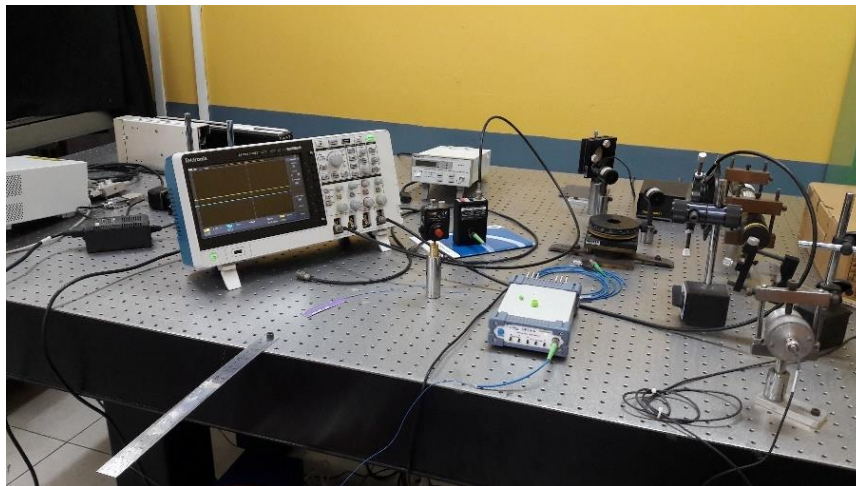


Figura 3.12 Equipo para la caracterización óptica de las redes de período largo (LPG) grabadas en el Laboratorio de Física de la UNI-FIC (2018).

### 3.4 REDES LPG GRAVADAS EN FIBRAS ESPECIALES (PCF)

Una PCF consiste de huecos de aire regularmente espaciados a lo ancho del cladding de la fibra (Russell, 2003). El núcleo de la PCF es formado por la introducción de un defecto o un hueco en el centro de la fibra. De acuerdo a los distintos mecanismos de propagación de la luz en la región del núcleo las PCF se clasifican en 2 categorías [3.4]:

- Fibra microestructurada o fibra hueca en la cual la luz es atrapada por reflexión total interna (TIR) en un núcleo sólido, el cual tiene un índice refractivo mayor que el del cladding (i.e. index guided IG-PCF –Fig. 3.13(a)),

- b) Fibra bandgap fotónica (PBG) en el cual el núcleo de la fibra es hueco, y la luz es atrapada en la región central de índice menor por un bi-dimensional bandgap fotónico creado por el cladding periódico (i.e. hollow core HC-PCF – see Fig. 3.13(b)) (Frazao et al., 2008).

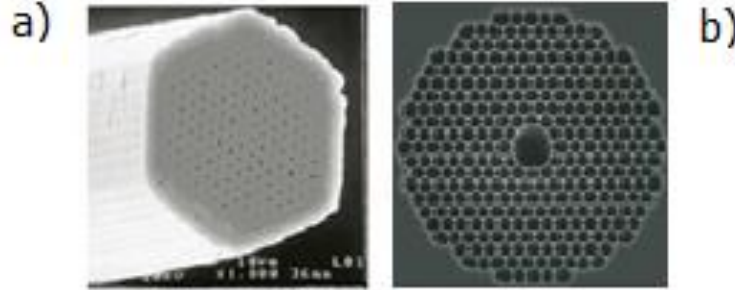


Figura 3.13 Fibras de cristal fotónico (PCF): index-guiding PBF (a) y bandgap fotónico PBF (b) [Frazao, O. Santos et al. *Photonics Review* Vol12 N° 6. 2008].

La mayoría de las aproximaciones que modelan la propagación de la luz en una PCF parten de la ecuación de onda vectorial para un medio dieléctrico isotrópico:

$$\nabla \times \frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times H(\vec{r}) = k^2 H(\vec{r}) \quad (3.7)$$

Para  $\varepsilon$  invariante en la dirección  $z$ , la función solución es de la forma:

$$H(\vec{r}) = h(x, y) e^{i\beta z} \quad (3.8)$$

Reemplazando esta función en la ecuación vectorial se llega a una ecuación para cuya solución se han reportado los siguientes métodos:

- Método de ondas planas
- Método de multipolos
- Método de la función localizada
- Método de elementos finitos

Debido a la complejidad de la ecuación vectorial, muchas veces se usa la ecuación de onda escalar de Helmholtz:

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \varepsilon(x, y) k^2 \right) \psi(x, y) = \beta^2 \Psi(x, y) \quad (3.9)$$

Aproximación de la solución de la ecuación de onda escalar de helmholtz por diferencias finitas: Para una red cuadrática con espaciamento  $a$  y con  $j$  etiquetando los puntos de la red, tenemos la representación simetrizada del Laplaciano:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x = ja) \approx \frac{1}{a^2} \{f[(j+1)a] + f[(j-1)a] - 2f[ja]\} \quad (3.10)$$

Donde solo se considera acoplamiento entre los vecinos más cercanos en los puntos de la red. Reescribiendo la ecuación de Helmholtz:

$$\Theta \Psi = \beta^2 \Psi \quad (3.11)$$

Con:

$$\Theta_{ji} = \begin{cases} -4K^2 + \varepsilon_j k^2 & j = i \\ K^2 & j, i \text{ vecinos más cercanos} \\ 0 & \text{otros casos} \end{cases} \quad (3.12)$$

Donde,  $K=1/a$

El caso homogéneo:

Para estimar el tamaño requerido de  $a$ , consideramos primero el caso homogéneo en el que  $\varepsilon_j = \varepsilon$ . En este caso se obtiene:

$$w^2 = \frac{c^2}{\varepsilon} [\beta^2 + 2K^2(2 - \cos k_x a - \cos k_y a)] \quad (3.13)$$

Este resultado tiene la conducta asintótica correcta de la solución espacial homogénea:

$$w^2 \approx \frac{c^2}{\varepsilon} [\beta^2 + k_x^2 + k_y^2 + \mathcal{O}(a^2)] \quad (3.14)$$

La discretización numérica se torna una buena aproximación a la solución exacta eligiendo “ $a$ ” suficientemente pequeño. Solo las frecuencias que satisfacen la ecuación (3.15) son tomadas en cuenta en el proceso de discretización.

$$\frac{c^2}{\varepsilon} \beta^2 \leq w^2 \leq \frac{c^2}{\varepsilon} [\beta^2 + 8K^2] \quad (3.15)$$

Para altas frecuencias, el método de diferencias finitas es una aproximación inadecuada al problema exacto.

El problema de frontera:

En principio  $\Theta$  es infinito, pero por necesidades de cálculo la matriz debe ser truncada. Además, es impuesta la condición de que el campo se anule sobre la frontera del dominio del cálculo.

Modelando fibras de cristal fotónico:

La tarea de encontrar soluciones a la ecuación de onda escalar puede ser vista como dos sub-problemas:

- La matriz  $\Theta$  tiene que ser creada desde una estructura dieléctrica dada
- Los valores propios  $\beta^2$  y vectores propios  $\Psi$ , tienen que ser hallados

El problema a encarar es la determinación de  $\beta^2$  y  $\Psi$ .  $\Theta$  puede ser diagonalizada completamente, más este cálculo es pesado, sin embargo, uno típicamente está interesado en resolver para los valores más grandes de  $\beta^2$ .

Como ejemplo el método de diferencias finitas es aplicado a una fibra PCF con index-guiding.

La figura (3.14A) muestra una estructura dieléctrica y la figura (3.14B) muestra la distribución del campo del modo fundamental calculado para una longitud de onda normalizada con  $\frac{\lambda}{\Lambda} = 0.15$  observándose que el campo se encuentra bien confinado en la región del núcleo.

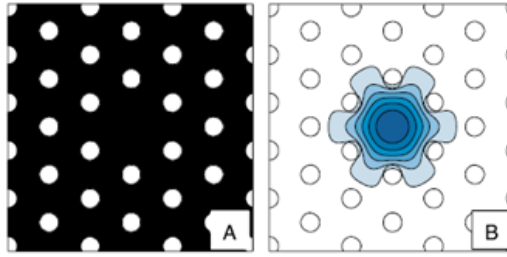


Figura 3.14 (A) Estructura dieléctrica de una PCF index-guiding con  $D/\Lambda=0.4$ . La estructura ha sido discretizada en  $128 \times 128$  puntos. (B) Distribución del campo del modo fundamental, calculada para  $\lambda/\Lambda = 0,15$ . [Ref. J Riishede et all. [3.5]]

Se encuentra que la aproximación escalar coincide con la solución vectorial para longitudes de onda cortas. Para  $\lambda \approx \Lambda$  esta aproximación es inadecuada.

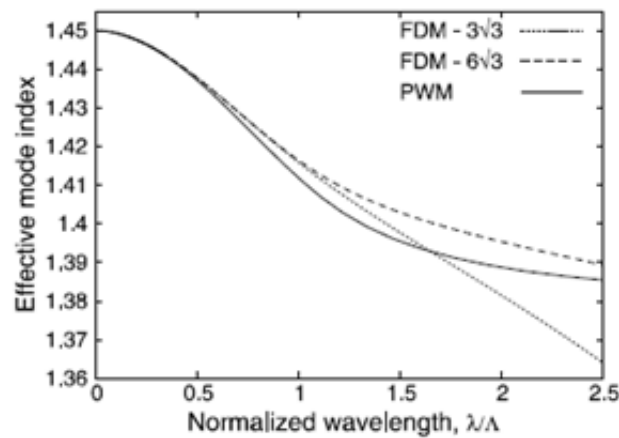


Figura 3.15 Comparación de índices para el modo fundamental en una PCF index-guiding con un diámetro de hueco de  $0,4\Lambda$ . Las curvas punteadas fueron calculadas por el método de diferencias finitas (FDM) para dos diferentes anchos de la estructura dieléctrica, la curva sólida fue calculada por el método de ondas planas (PWM) [3.4]

Fibras ópticas especiales o microestructuradas (PCFs) incorporan un arreglo geométrico variado en forma y tamaño de agujeros en el núcleo y la casca de la fibra, ejemplos de tales estructuras son mostradas en la figura 3.16. La presencia de estos agujeros, permiten manejar las propiedades de guiado de la fibra óptica: las pérdidas por dispersión cromática, pérdidas por dispersión debido a birrefringencia, longitud de onda de corte, ventanas de transmisión, etc. Asimismo, la presencia de los agujeros permite el diseño de diversos dispositivos sensores que llevan en el interior de la fibra las sustancias a ser testadas ó sustancias que servirán como la referencia para las medidas.

El mecanismo de guiado en este tipo de fibras ahuecadas ocurre como resultado de un band-gap fotónico creado por el arreglo de huecos o por la reflexión total interna de la luz guiada por el núcleo de la fibra y la región de la cubierta del núcleo.



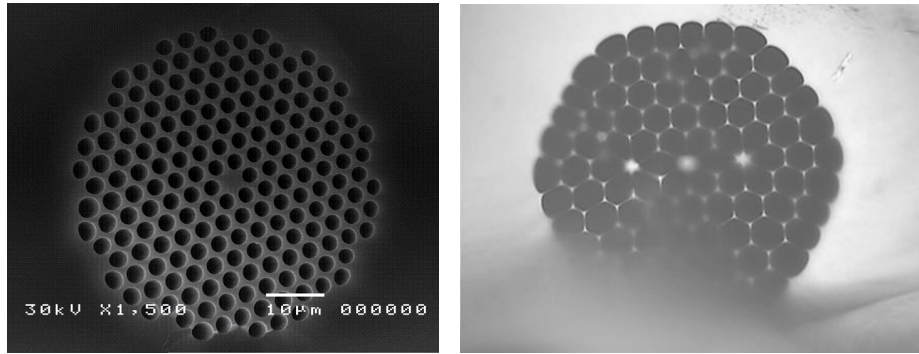


Figura 3.16 Fibras ópticas especiales (fibras de cristal fotónico) con arreglo hexagonal de huecos y con un núcleo (fig. izquierda), y tres núcleos (fig. derecha). Laboratorio de Fibras Especiales UNICAMP (2014).

La grabación de redes de periodo largo (LPG) en este tipo de fibras requiere de estudio previo de simulación para maximizar las pérdidas inducidas en la transmitancia debido a la grabación de la LPG. Nuestros primeros trabajos de simulación son mostrados en la fig. 3.17, donde se observa una dependencia del tamaño o período de la LPG con el cociente del diámetro de los agujeros sobre la distancia entre agujeros de la fibra micro estructurada.

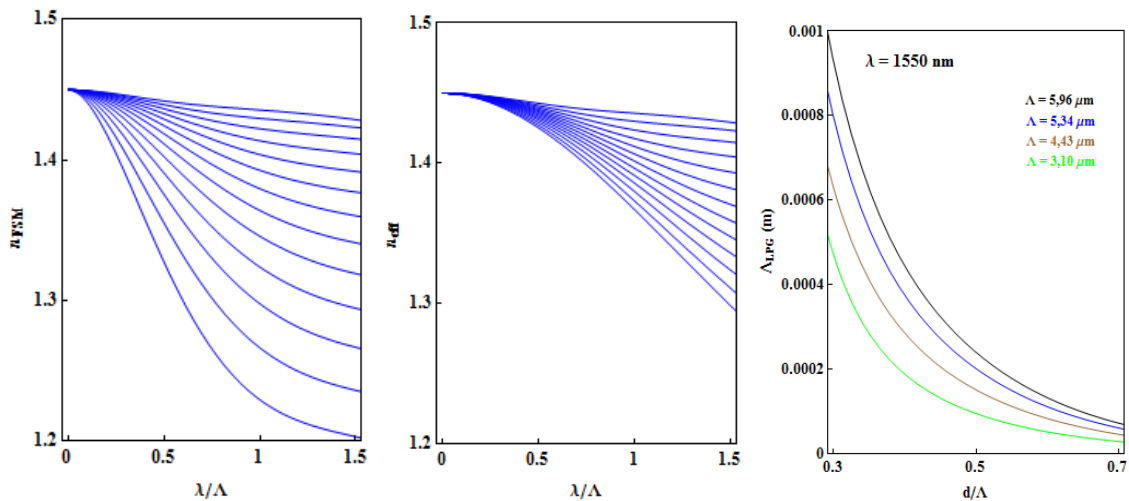


Figura 3.17 Las figuras muestran la dependencia del valor del índice refractivo efectivo de la cubierta ( $n_{FSM}$ ) y del núcleo de la fibra ( $n_{eff}$ ), con la distancia entre agujeros ( $\Lambda$ ) de la estructura de la fibra, así como la dependencia del período óptimo de la red LPG con el cociente: diámetro de los agujeros versus distancia entre agujeros (pitch) de la estructura ahuecada de la fibra óptica. Post Doctorado UNICAMP 2014.



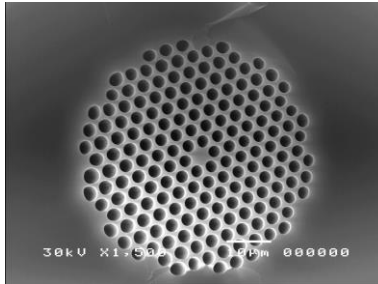
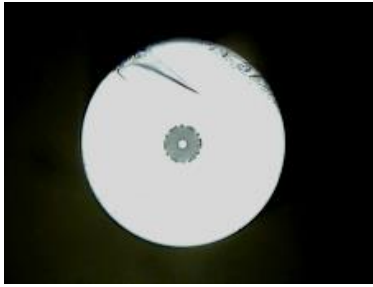


Figura 3.18 La figura muestra una fibra PCF con 125  $\mu\text{m}$  de diámetro de cladding y núcleo de 12  $\mu\text{m}$  provisto de una estructura hexagonal de huecos, con un pitch de 0,58. Laboratorio de Fibras Especiales Post Doctorado UNICAMP 2014.

LPG en PCFs de núcleos de gran área fueron usados ya como refractómetros altamente sensibles, exhibiendo una sensibilidad de 1500 nm/RIU para un índice refractivo de 1.33 (Rindorf and Bong, 2008). La alta sensibilidad fue obtenida infiltrando la muestra en los huecos de la PCF.

En el análisis de la optimización de la LPG intervienen la longitud y el número de perturbaciones de la red, el cociente aire–hueco, el período de la red  $\Lambda$ , el diámetro del hueco “d” y el factor aire filling  $d/\Lambda$  de la fibra PCF.

En fibras PCF, la asunción de que el acoplamiento entre los modos del cladding es pequeña en comparación con el acoplamiento core-cladding, que es válida para fibras convencionales, no siempre es válida en algunas fibras microestructuradas.

La longitud de onda resonante de una LPG escrita en una PCF se corre hacia el azul cuando se incrementa el periodo de la red, contrario al caso usual de una fibra mono-modo convencional (SMF). Redes LPG inducidas por láser de  $\text{CO}_2$  en este tipo de fibras pueden ocasionar colapso de los huecos de la PCF, especialmente en el caso de huecos grandes, resultando en altas pérdidas de inserción.

#### REDES LPG GRAVADAS EN PCF

##### PCF-10P

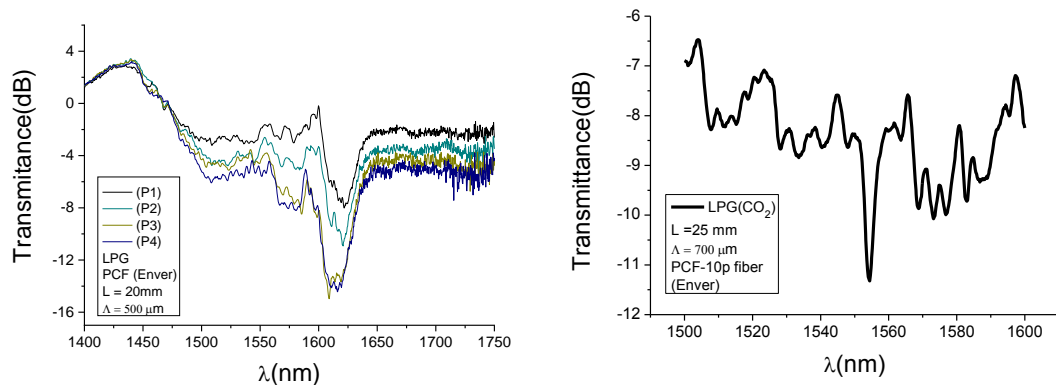


Figura 3.18b Trasmisión de las redes LPG gravadas en fibras PCF con arreglo hexagonal de huecos y con núcleo sólido, usando una red de presión mecánica (fig. izquierda), y grabación permanente con un láser de  $\text{CO}_2$  (fig. derecha). Post Doctorado UNICAMP 2014.

PCF-8P

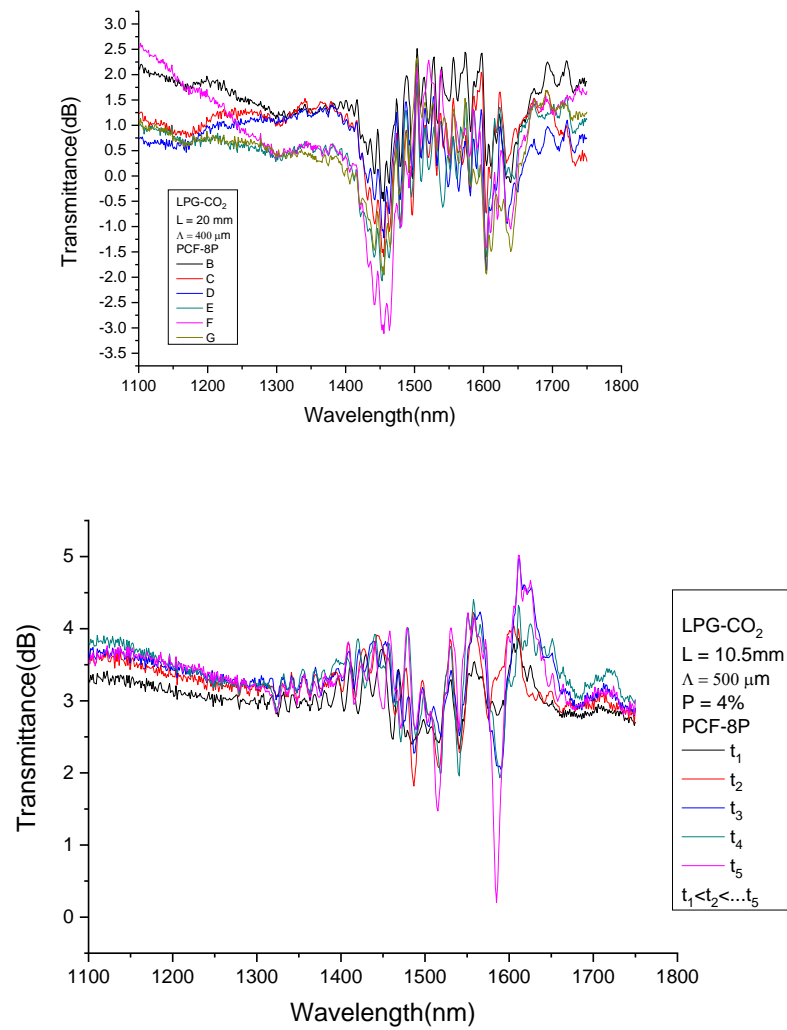


Figura 3.19 Espectros de transmisión de las redes LPG gravados con láser CO<sub>2</sub> en fibras PCF con arreglo hexagonal de huecos y con núcleo macizo. Post Doctorado UNICAMP 2014.

REDES LPG EN PCF CON D/Λ VARIABLE:

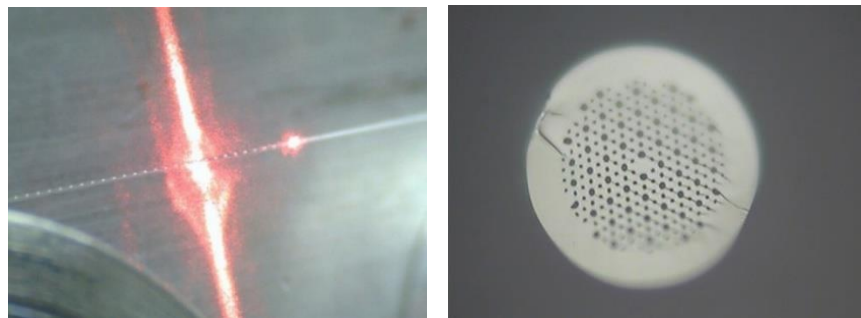


Figura 3.20 Red LPG gravado en fibra óptica especial (fibra con D/Λ variable). Post Doctorado UNICAMP 2014.

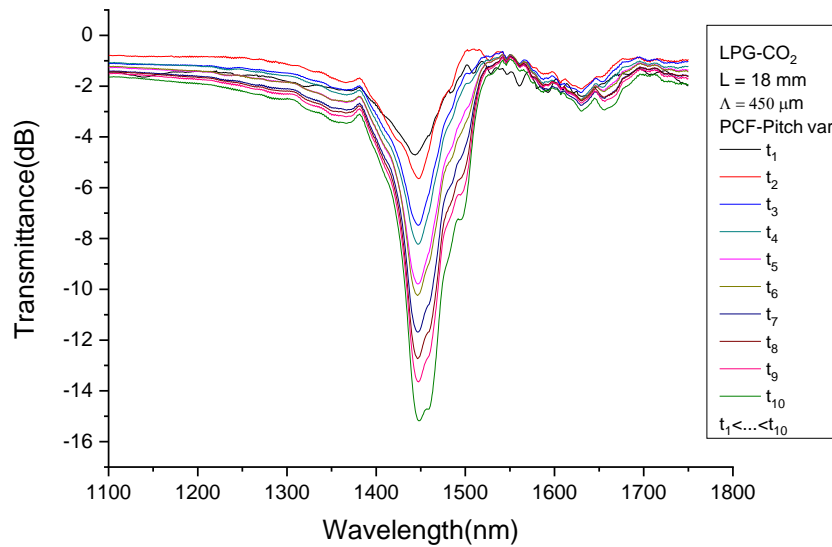


Figura 3.21 Espectros de transmisión de la LPG gravada en la fibra PCF (fibras de cristal fotónico) con arreglo de pitch variable. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Red LPG gravada en pcf aplicada como sensor de índice refractivo

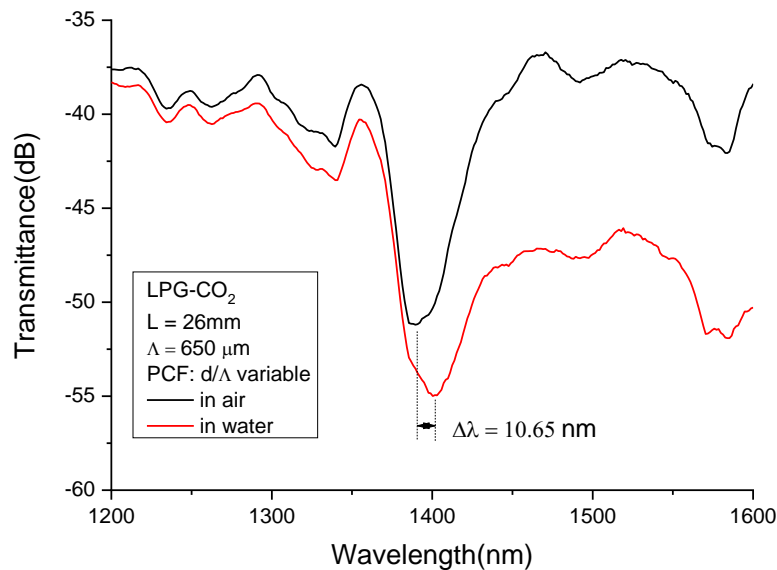


Figura 3.22 Sensibilidad a variación del índice refractivo externo del espectro de transmisión de la red LPG gravada en la fibra óptica especial (fibras de cristal fotónico con arreglo de pitch variable). Post Doctorado UNICAMP 2014.

### 3.5 RED LPG GRAVADA EN FIBRA AFINADA (TAPERS)

Un buen número de sensores de fibra óptica basan su funcionamiento en la interacción de los modos guiados con el exterior, bien directamente y/o a través del acoplamiento con estructuras materiales (normalmente en forma de capas). Existen diversos procedimientos para hacer posible el acceso de ese campo guiado a esas estructuras, entre los cuales el afinado de la fibra

llamado *tapering* o estrechamiento de la fibra ha sido uno de los más empleados. La fibra óptica es estrechada calentándola y estirándola al mismo tiempo, en un procedimiento experimental cuyos parámetros deben controlarse con cuidado.

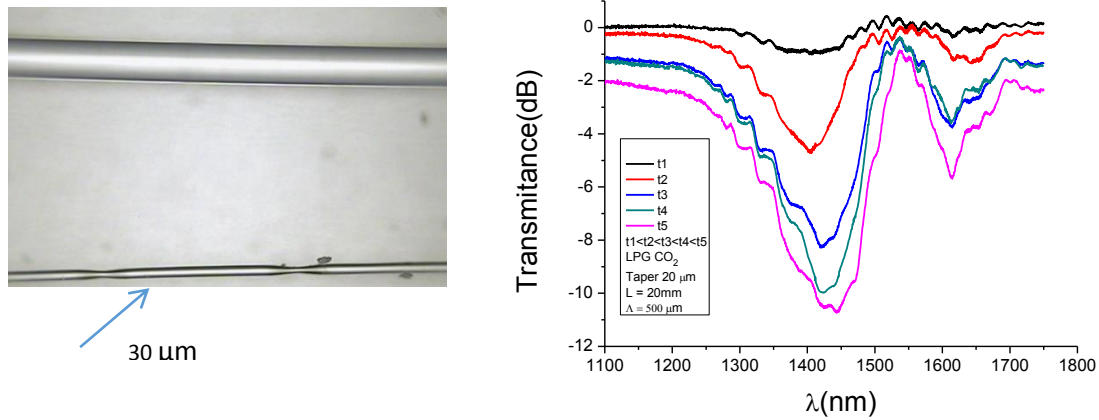


Figura 3.23 Espectro de trasmisión de una red LPG gravada en fibra óptica afinada (20  $\mu\text{m}$  de diámetro). Grabación permanente con láser de  $\text{CO}_2$ . Longitud de la red  $L = 20\text{ mm}$ , período de la red  $\Lambda = 500\ \mu\text{m}$ . Laboratorio de fibras especiales UNICAMP (2010).

En principio, es posible conseguir fibras estrechadas de configuración variada, siendo las magnitudes que definen al *taper*, el diámetro de su cintura (región más estrecha), la longitud del estrechamiento y el perfil de la región de transición. Si el estrechamiento se ha realizado adecuadamente se puede conseguir un nivel de pérdidas muy bajo, con lo que la mayoría del campo guiado por la fibra consigue atravesar el *taper*.

Nosotros hemos gravado redes LPGs sobre fibras afinadas, usando el láser de  $\text{CO}_2$ , y un espectro característico de esta red es mostrado en la figura 3.23. Allí se observa que el valle de resonancia, correspondiente al acoplamiento de los modos guiados núcleo-casca, es más abierto, producto del gravado sobre la fibra en regiones que se van afinando.

Al afinar la fibra, la luz que es guiada en el modo fundamental del core es transferida al modo fundamental del cladding. Al inicio de  $V_{\text{core}} < 1$  (notar que, aunque la condición  $V_{\text{core}}=1$  que define el punto de transición depende de la longitud de onda, su localización en el taper varía aproximadamente  $15\ \mu\text{m}$  cuando  $\lambda$  cambia de  $0.8$  a  $1.5\ \mu\text{m}$ , por lo tanto, el punto de transición se puede considerar invariante con respecto a  $\lambda$ ).

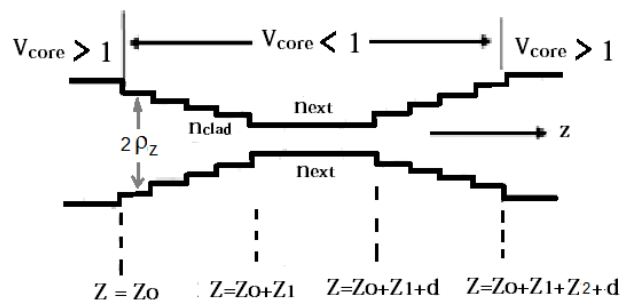


Figura 3.24 (a) Fibra afinada con perfil bicónico. La región  $V_{\text{core}} < 1$  tiene una longitud total  $z_1 + z_2 + d$ , donde  $d$  es la longitud de la parte estrechada.  $n_{\text{clad}}$  es el índice de la cubierta y  $n_{\text{ext}}$  es el índice del medio externo (aire).  $p(z)$  es el radio local de la fibra.

Para diámetros de  $10\ \mu\text{m}$  o más, este guiado, cladding-medio externo, es multimodo (debido al alto valor de  $V_{\text{clad}}(z)$ ) y el afinado progresivo del cladding acopla los modos con simetría

angular  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ ,  $LP_{03}$ , (si el taper es simétrico). Cuando el taper es curvado se produce además acoplamiento con los modos impares ( $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,...).

A la salida del taper, solo la luz en el modo fundamental del cladding es reacoplada al modo fundamental del core (la potencia en el modo  $LP_{11}$  y otros modos de alto orden del cladding no se acoplan al modo fundamental del core, permaneciendo en el cladding), entonces, la pérdida en la transmitancia está determinada por el acoplamiento del modo fundamental del cladding a los modos distintos soportados en la región  $V_{core} < 1$ .

La constante de acoplamiento entre los modos del cladding cuando no existe curvatura es calculado de

$$C_{nm;pq} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \varepsilon_{pq}^{(i+1)}(r, \vartheta) \varepsilon_{nm}^{(i)}(r, \vartheta) r dr d\vartheta \quad (3.16)$$

$$C_{nm;pq} \neq 0 \quad \text{if } n = p \\ = 0 \quad \text{if } n \neq p$$

Donde,

$\varepsilon_{nm}$  es la función propia normalizada del modo  $LP_{nm}$

El acoplamiento de los modos, principalmente con simetría angular  $LP_{01}$ ,  $LP_{02}$ , y  $LP_{03}$  (aún para  $V$  tan altos como  $V > 100$ ) origina la conducta oscilatoria en la transmitancia, mostrada en la figura 3.25.

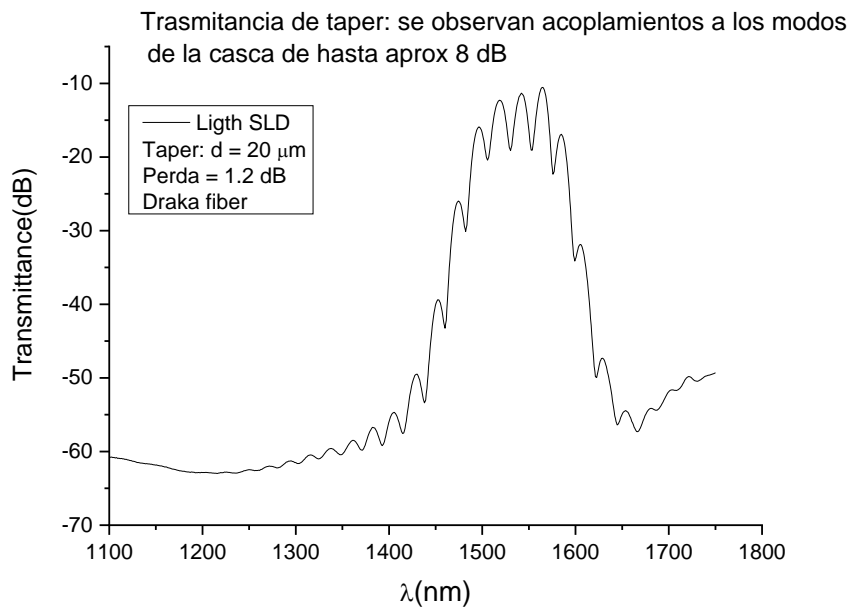


Figura 3.25 Se muestran las oscilaciones en la transmitancia de un taper de 20mm, 20μm, fabricado en fibra Draka en el lab. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Cuando la fibra es curvada, además de acoplamiento entre los modos radiales  $LP_{0m}$ , se origina acoplamiento a los modos no simétricos  $LP_{1q}$ , y, en general, acoplamiento entre los modos  $LP_{nm}$  y  $LP_{nq}$  o  $LP_{n\pm 1q}$  originándose la presencia de los dips profundos en la transmitancia, mostrados en la figura 3.23.

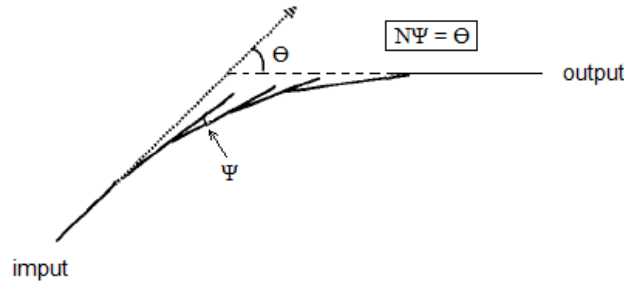


Figura 3.26 Geometría para cálculo de los efectos de curvatura del Taper. Los ángulos de curvatura  $\Theta$  y  $\Psi$  son mostrados.

$$C_{nm;pq}^{\Psi} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \varepsilon_{nm}^{(i)} \varepsilon_{pq}^{(i+1)} \left[ J_0(X_{nm}^{(i)} r) + 2jJ_1(X_{nm}^{(i)} r) \cos(\theta) \right] r dr d\theta \quad (3.17)$$

$$C_{nm;pq}^{\Psi} \neq 0 \quad \text{if } n = p \text{ or } n = p \pm 1$$

$$= 0 \quad \text{otherwise}$$

Donde,

$$X_{nm}^{(i)} = \beta_{nm}^{(i)} \psi$$

$\beta_{nm}^{(i)}$ : cte. de propagación del modo nm.

### 3.6 IMPLEMENTACIÓN DE EQUIPO EXPERIMENTAL PARA LA ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES LPG DE FIBRA ÓPTICA

Un equipo para grabar y caracterizar redes LPG en fibras ópticas de sílice y/o poliméricas tipo monomodo, multimodo, de núcleo estructurado (PCF), fibras afinadas y capilares, ha sido implementado en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI. El equipo utiliza un láser de CO<sub>2</sub> Synrad serie 48 de 10,6  $\mu\text{m}$  y 1 Watt de potencia para grabar las redes en las fibras ópticas. Un trasladador micrométrico NRT100/M de la ThorLabs equipado con un mecanismo para sostener la fibra óptica permite desplazar la fibra horizontalmente, pudiéndose grabar redes con períodos a partir de los 50 $\mu\text{m}$ . Un motor de paso permite trasladar la fibra verticalmente para asegurar exposición uniforme de la fibra al láser de CO<sub>2</sub>. El láser dispone de una cabeza electrónica Synrad UC 2000 que permite configurar la potencia y tiempo de aplicación del láser. Una lente de Selenuro de Cadmio es empleada para focalizar la luz láser sobre la fibra óptica.

La caracterización óptica de las redes LPG fabricadas se realiza observando la transmitancia espectral de la fibra. Una fuente de luz de super diodo LED Safibra modelo OFLS-B provee luz de intensidad máxima centrada en 1550  $\mu\text{m}$  y es utilizada para iluminar la fibra a la entrada. La intensidad transmitida por la fibra es captada con un fotodetector de Germanio Newport modelo 2033. La composición espectral de la luz transmitida es analizada por un espectrómetro STS NIR de la Ocean Optics.

Un diagrama esquemático del equipo empleado en la grabación de redes LPG en fibras ópticas es mostrado en la figura 3.27. Una fotografía del equipo implementado es mostrada en la figura 3.28.

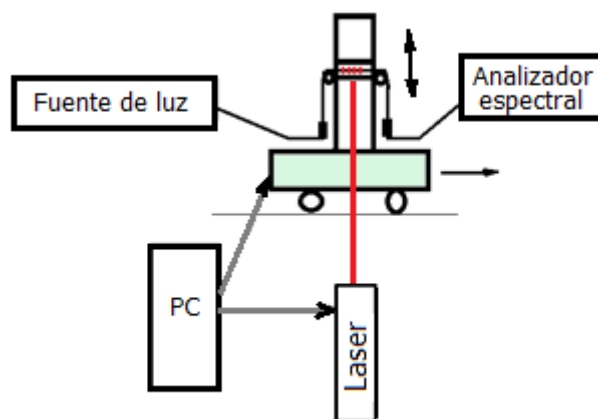


Figura 3.27 Diagrama esquemático del equipo para grabado de redes LPG en fibras ópticas.

Equipo de grabación de redes LPG implementado

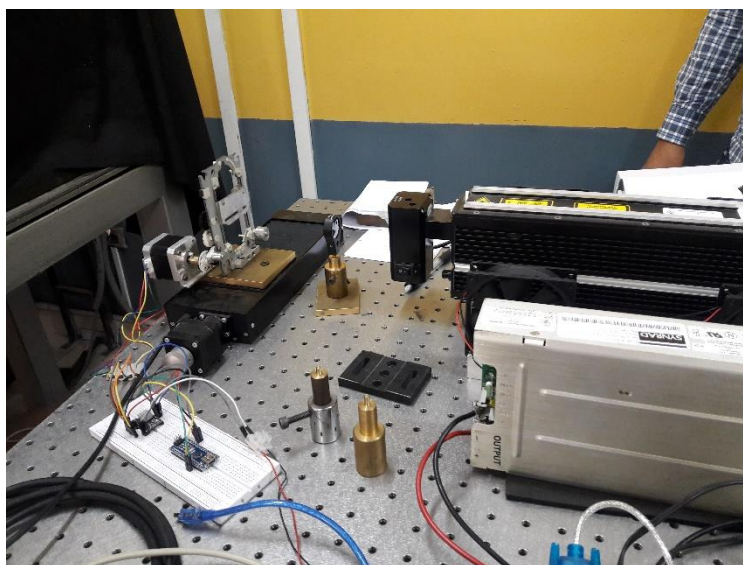


Figura 3.28 Se muestra el láser de CO2 y el trasladador micrométrico empleados como parte del equipo para grabado de redes LPG en fibras ópticas. Laboratorio de Física de la FIC.

Sensores LPG fabricados

Los primeros sensores fabricados por nuestro equipo se realizaron con procedimiento manual. La cabeza electrónica del láser de CO2 permite digitalización de los parámetros de láser. El trasladador micrométrico fue desplazado girando su micrómetro incorporado manualmente. Recientemente en el marco de una tesis de maestría se ha implementado el software que automatiza el proceso de grabado de la red LPG.

La figura 3.39 muestra una de las redes LPG grabada por el láser de CO2 en fibra monomodo comercial haciendo uso del equipo implementado en la FIC.



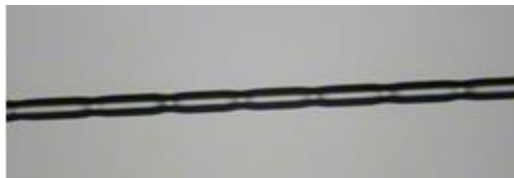


Figura 3.29. Red LPG grabada en fibra óptica comercial monomodo usando láser de CO<sub>2</sub>. Laboratorio de Física FIC.

La figura 3.30 muestra la luz guiada por la fibra monomodo al pasar por la red LPG grabada en ella.

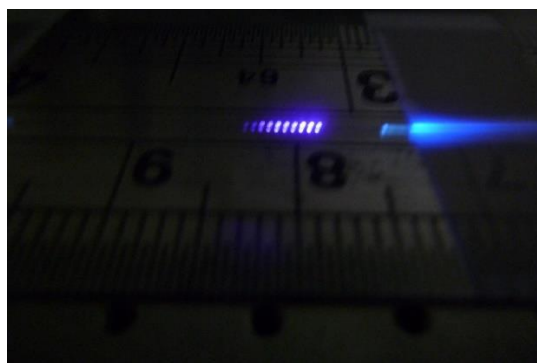


Figura 3.30 La figura muestra la luz atravesando una red LPG de 10 períodos de 500  $\mu\text{m}$

Para observar la respuesta dinámica del sensor se sujetó la red sobre una regla de madera en configuración de voladizo. Las vibraciones de la regla fueron registradas simultáneamente por el sensor de fibra óptica y un acelerómetro de estado sólido dispuesto cercano al sensor de fibra óptica. Las respuestas de ambos sensores son mostradas en la figura 3.31. Las transformadas de Fourier correspondientes son mostradas en la figura 3.32. El sensor de fibra óptica mostró gran sensibilidad a las deformaciones flexurales observándose señales semejantes a las del sensor electrónico comercial. Las transformadas rápidas de Fourier realizadas a las señales detectadas por ambos sensores mostraron buena coincidencia para los valores de las frecuencias correspondientes a los picos observados en la gráfica FFT.



Figura 3.31. Respuesta dinámica del sensor LPG de fibra óptica (curva amarilla) y del acelerómetro de estado sólido de la marca PASCO (curva negra). Estudio de vibraciones de una regla de madera en configuración de voladizo.



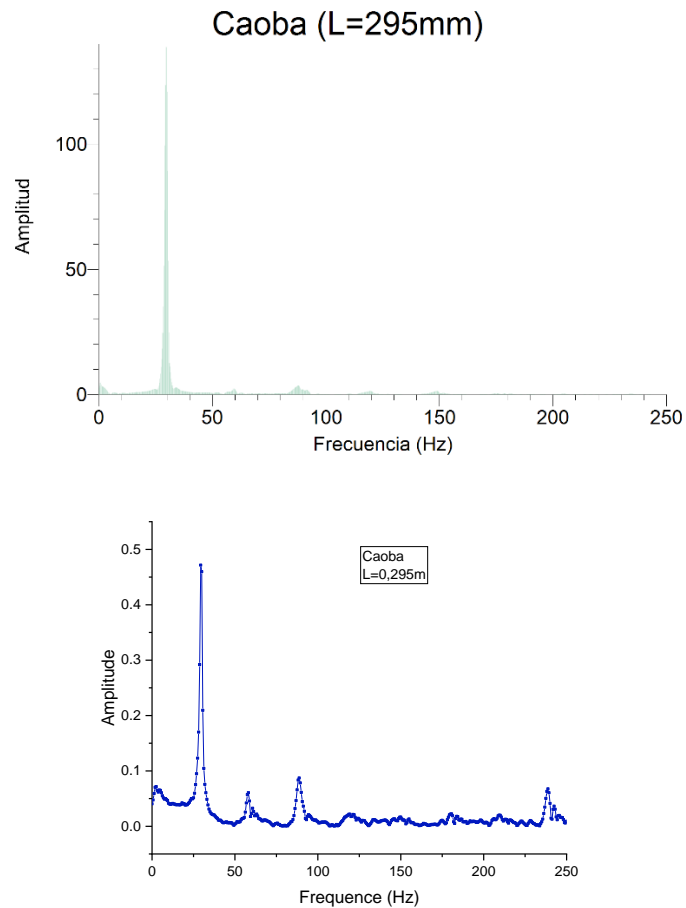


Figura 3.32. Transformadas de Fourier mostrando el mismo valor de frecuencia (29.5 Hz) para el primer modo de mayor amplitud, detectado por ambos sensores, PASCO (curva verde) y LPG (curva azul).

Para la caracterización espectral de nuestras redes, a la fecha sólo disponemos de un espectrómetro con un rango de detección de 600nm a 1100nm y estamos en proceso de adquirir un espectrómetro en el rango de de 1000nm a 1700nm.

## CAPÍTULO 4

### APLICACIONES DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES LPG

Redes de período largo LPG son usados como sensores de temperatura, índice de refracción, humedad, desplazamientos, curvaturas, presiones, vibraciones, como sensores de gases, sensores de nivel de líquidos, etc. Los sensores LPG son capaces de medir simultáneamente más de un parámetro. El mecanismo de sensado de los sensores basados en redes LPG se basa en el cambio del índice refractivo del núcleo y/o del revestimiento del núcleo, en el cambio del índice de refracción del medio externo y en la variación del período de la red vía estiramiento o compresión de la fibra.

Asumiendo una perturbación  $\xi$  actuando sobre la fibra en la que se ha grabado una red LPG de período  $\Lambda$ , deducimos que se producirá un corrimiento en la longitud de onda de acoplamiento  $\lambda$  dado por:

$$\frac{d\lambda}{d\xi} = \frac{d\lambda}{d(n_{eff}-n_{cl})} \frac{d(n_{eff}-n_{cl})}{d\xi} + \frac{d\lambda}{d\Lambda} \frac{d\Lambda}{d\xi} \quad (4.1)$$

#### 4.1 APLICACIONES DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Los sensores de fibra óptica se basan en la medición de cambios inducidos en la intensidad de la luz transmitida y/o en la medición de cambios en la fase de la luz transmitida, como se muestra en la figura 4.1.

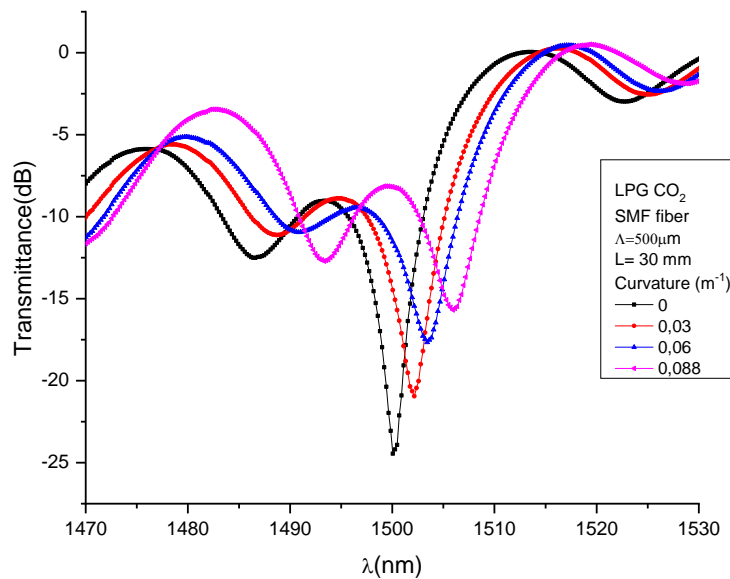


Figura 4.1 La figura muestra los cambios en la Intensidad de la luz transmitida, así como los cambios en la fase del dip de resonancia correspondiente a  $\lambda=1500\text{nm}$ . Los cambios son producidos debido a variación de la curvatura de la fibra óptica con una LPG grabada en ella. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Mostramos a continuación diferentes aplicaciones de los sensores LPG desarrollados en el laboratorio de fibras especiales de la UNICAMP en Brasil, en el laboratorio de optoelectrónica de Valencia en España y en el laboratorio de Física de la FIC-UNI.

## 4.2 SENSORES BASADOS EN CAMBIOS DE LA INTENSIDAD DE LA LUZ TRANSMITIDA POR LA FIBRA ÓPTICA

### 4.2.1 SENSOR DE NIVEL DE LÍQUIDOS

El sensor es una LPG de 45mm de longitud y de 500  $\mu\text{m}$  de período, grabado en fibra óptica comercial monomodo SMF-28. El sensor es aplicado para detectar el nivel de aceite de Soya al interior de un recipiente. La figura 4.2 muestra la señal de transmitancia de la red, observándose disminución de la intensidad de resonancia en la longitud de onda  $\lambda = 1560\text{nm}$  al ir aumentando el nivel de aceite que moja la red. Luego del experimento secando la red con papel toalla y limpiándola con alcohol se recupera la transmitancia de la red original.

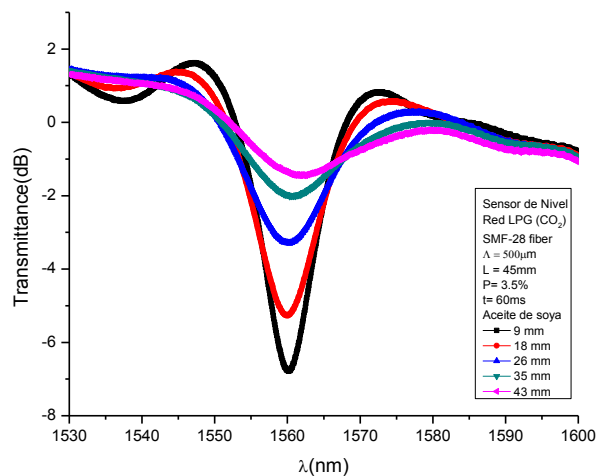


Figura 4.2 LPG como sensor de nivel de aceite. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

### 4.2.2 SENSOR DE SONIDO

Propagación de pulsos transversales y longitudinales en una barra de aluminio

#### RESUMEN

Dos acelerómetros LPG de fibra óptica fueron pegados sobre la superficie de una varilla metálica simplemente apoyada en sus extremos. Pulsos transversales y longitudinales fueron excitados en uno de los extremos de la regla. Los sensores fueron colocados cercanos a los extremos de la varilla. El paso del pulso es detectado por cada sensor LPG. Midiendo la distancia entre los sensores y el tiempo de viaje del pulso, las velocidades de transmisión de los pulsos longitudinales y transversales son determinados, a partir de lo cual es estimado el valor del módulo de elasticidad de la varilla metálica.

#### INTRODUCCION

Conocer las características de elasticidad de los materiales es una tarea de suma importancia en ingeniería civil. El módulo de Young es uno de los parámetros importantes del material ya que determina su resistencia a carga [1]. El módulo de Young puede ser obtenido desde medidas estáticas o dinámicas. Aunque el módulo de Young puede ser medido dinámicamente usando sensores eléctricos [2,3], los sensores de fibra óptica presentan diferentes ventajas como su reducido tamaño e inmunidad a interferencia electromagnética [4,5]. En este artículo se muestra el empleo de sensores LPG de fibra óptica para determinar el módulo de Young de una barra metálica de Aluminio, midiendo las velocidades de propagación de pulsos longitudinales y transversales a lo largo de la barra vía la respuesta óptica de los sensores LPG.

#### TEORÍA

La relación general entre los esfuerzos aplicados y la deformación de un material elástico, es dado por la siguiente expresión [6]:

$$t_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad (4.2)$$

la que es conocida como la ley de Hooke generalizada.  $\sigma_{ij}$  es el tensor de esfuerzos,  $\varepsilon_{kl}$  es el tensor de deformaciones, y  $C_{ijkl}$  es el tensor de elasticidad.

Es conveniente escribir:

$$\begin{aligned} t_{11} = t_1; t_{22} = t_2; t_{33} = t_3 \\ t_{23} = t_{32} = t_4; t_{13} = t_{31} = t_5; t_{12} = t_{21} = t_6 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Asimismo,

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} = \varepsilon_1; \varepsilon_{22} = \varepsilon_2; \varepsilon_{33} = \varepsilon_3 \\ \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \varepsilon_4; \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = \varepsilon_5; \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \varepsilon_6 \end{aligned} \quad (4.4)$$

De donde:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

En materiales isotrópicos:

$$t_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2\mu} \left( t_{ij} + \frac{\lambda}{3\lambda+2\mu} \delta_{ij} t_{kk} \right) \quad (4.7)$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \\ t_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$\lambda$  and  $\mu$ , son las constantes de Lamé. Las constantes de Lamé se relacionan con el módulo de Young y cociente de Poisson a través de las siguientes relaciones:

$$E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu} \quad (4.9)$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)} \quad (4.10)$$

Las relaciones de las velocidades del sonido al interior del material con las constantes de Lamé, están dadas por:

$$\lambda = \rho(c_l^2 - 2c_t^2) \quad (4.11)$$

$$\mu = \rho c_t^2 \quad (4.12)$$

Por lo que las constantes elásticas  $C_{11}$  y  $C_{44}$  se relacionan con la velocidad transversal  $c_t$  y longitudinal  $c_l$  del sonido propagándose en el material isotrópico de la siguiente forma:

$$C_{11} = \rho c_l^2 \quad (4.13)$$

$$C_{44} = \rho c_t^2 \quad (4.14)$$

Una constante adicional de importancia en ingeniería es el módulo de rigidez ( $G$ ), definido como:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \mu \quad (4.15)$$

De las relaciones anteriores, el módulo de Young ( $E$ ), el módulo de rigidez ( $G$ ) y el cociente de Poisson ( $\nu$ ), quedan expresados en función de las velocidades de las ondas acústicas longitudinal ( $c_l$ ) y transversal ( $c_t$ ):

$$E = \frac{3\rho c_t^2 (c_l^2 - \frac{4}{3}c_t^2)}{(c_l^2 - c_t^2)} \quad (4.16)$$

$$G = \rho c_t^2 \quad (4.17)$$

$$\nu = \frac{(c_l^2 - 2c_t^2)}{2(c_l^2 - c_t^2)} \quad (4.18)$$

#### EXPERIMENTO

La figura 4.3 muestra el arreglo experimental usado para medir las velocidades de los pulsos transversales y longitudinales propagándose en una barra de aluminio simplemente apoyada en sus extremos. Dos redes LPG escritas en fibra óptica mono modo comercial SMF28, usando

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

láser de CO<sub>2</sub>, son localizadas cerca a los extremos de la barra de 3 m de longitud. Pulsos transversales y longitudinales son originados en la barra golpeando uno de sus extremos en forma perpendicular o colineal a su longitud. Los pulsos son detectados por la deformación de las LPGs debido al paso de los pulsos.

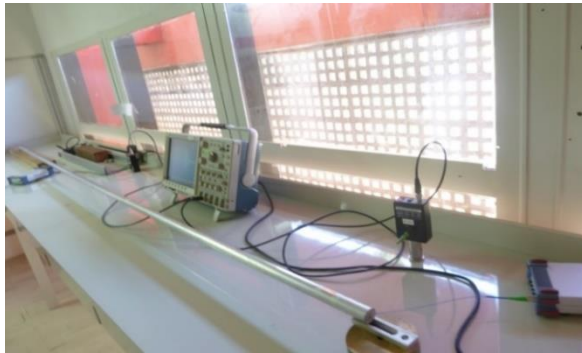


Figura 4.3 Arreglo experimental usado para la detección de los pulsos transversales o longitudinales viajando a lo largo de una barra de Aluminio. El pulso es generado por impacto cerca a uno de los extremos de la barra. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Un osciloscopio es usado para detectar la perturbación en la potencia transmitida por las LPGs. Las velocidades son calculadas midiendo la distancia entre las LPGs y la diferencia de tiempo transcurrido entre las detecciones en ambas LPGs.

La figura 4.4 muestra la señal óptica registrada por los sensores LPG, distanciados 2,55m. Observamos que el tiempo promedio de paso de un pulso longitudinal fue de 432  $\mu$ s. Una velocidad de 5900 m/s fue determinada para estos pulsos.

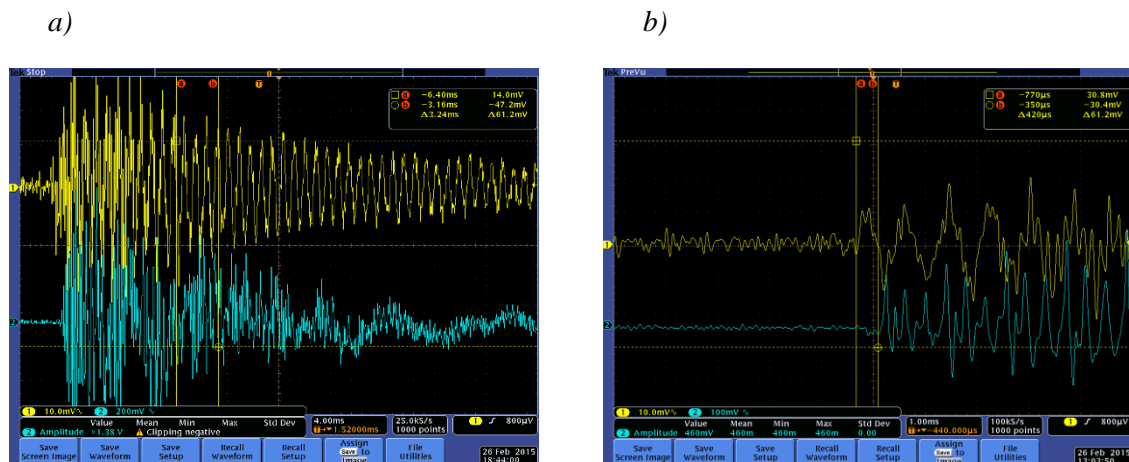


Figura 4.4 a) Perturbación en la transmitancia de las LPGs al paso de un pulso longitudinal viajero, b) Lapso de tiempo transcurrido entre las detecciones de los sensores LPG. Post Doctorado UNICAMP 2014.

La figura 4.5 muestra la señal óptica registrada por los sensores LPG, distanciados 2,55m. Observamos que el tiempo promedio de paso de un pulso transversal fue de 814,8  $\mu$ s. Una velocidad de 3129,6 m/s fue determinada para estos pulsos.

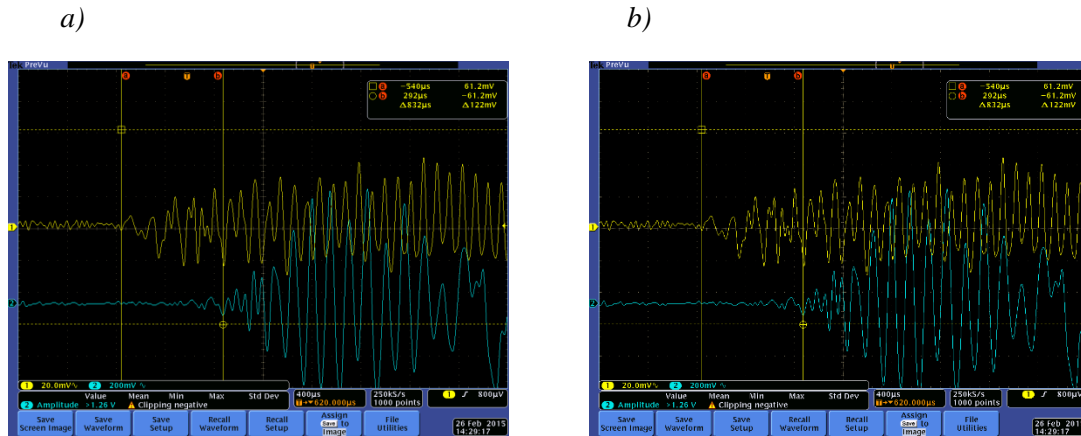


Figura 4.5 a) Perturbación en la transmitancia de las LPGs al paso de un pulso ltransversal viajero, b) Lapso de tiempo transcurrido entre las detecciones de los sensores LPG. Post Doctorado UNICAMP 2014.

La tabla 4.1 muestra el registro de tiempos empleados por los pulsos para recorrer la distancia entre los sensores LPG ópticos.

Tabla 4.1 Tiempos de viaje de los pulsos transversales y longitudinales excitados en una barra de Aluminio.

n	$\Delta T_L$ ( $\mu s$ )	$\Delta T_T$ ( $\mu s$ )
1	432	830
2	448	830
3	448	800
4	378	830
5	420	832
6	440	808
7	444	808
8	444	810
9	424	810
10	444	790
	$\Delta T_L = 432,2$	$\Delta T_T = 814,8$

$L = 2,55m$  (distancia entre los centros de las LPGs)

$\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ ;

$\Delta T_t = 815 \times 10^{-6}$ ;

$\Delta T_l = 432 \times 10^{-6}$ ;

$V_T = L / \Delta T_t$ ;

$V_L = L / \Delta T_l$ ;

Un módulo de Young  $E = 68.967 \times 10^9$  Pascales fue encontrado para el Aluminio usando esta técnica. Asimismo, valores de la constante de rigidez  $G = 26.432 \times 10^9$  Pascales y un módulo de Poisson  $\nu = 0.3046$ .

## ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

Los valores encontrados para las constantes elásticas del Aluminio usando nuestra técnica mostraron buen acuerdo con los valores de los módulos de Young, de rigidez y Poisson determinados por otras técnicas [7-10]:

$$E = 69.72 \times 10^9 \text{ Pascales}$$

$$G = 25.26 \times 10^9 \text{ Pascales}$$

$$\nu = 0.32-0.34$$

## PUBLICACIONES

- [1] **L Mosquera**, Jonas H Osório and Cristiano M B Cordeiro. Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings. *Meas. Sci. Technol.* 27 (2016) 015102.
- [2] **L Mosquera**. Determination of Young's Modulus of a metallic bar using traveler pulse detection by fiber optic sensors type LPG. 17th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. Jamaica (2019).

## REFERENCIAS

- [1] S.P. Timoshenko "*History of strength of materials*". Dover Publications, New York (1953).
- [2] A. S. Birks and R. E. Green, "*Nondestructive Testing. Handbook*," vol. 7 of Ultrasonic Testing, American Society for Nondestructive Testing, 1991.
- [3] M. Radovic, E. Lara-Curzio and L. Riester, "*Comparison of diferente experimental techniques for determination of elastic properties of solids*," *Materials Science and Engineering A*, 368, 1-2, 2004.
- [4] H. Li, D. Li, G. Song, "*Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*," *Engineering Structures*, 26, 2004.
- [5] B. Lee, "*Review of the present status of optical fiber sensors*," *Optical Fiber Technology*, 9, 2003.
- [6] S.P. Timoshenko "*Resistencia de Materiales*". Thomson Editores. Spain (2005).
- [7] F. Pigeon, S. Pelissier, A. Mure-Ravaud, H. Gagnaire, C. Veillas, "*Optical fibre young modulus measurement using an optical method*," *Electronics Letters*, 28, 11, 1992.
- [8] P. Antunes, H. Lima, J. Monteiro, P. S. André, "*Elastic constant measurement for standar and photosensitive single mode optical fibres*," *Microwaves and Optical Technology Letters*, 50, 9, 2008.
- [9] S. Lago, S. Brignolo, R. Cuccaro, C Musacchio, P. A. Giuliano Albo, P. Tarizzo, "*Application of acoustic methods for a non-destructive evaluation of the elastic properties of several typologies of materials*," *Applied Acoustics*, 75, 10- 16, 2014.
- [10] S. Ruben, 1985, "*Handbook of the elements*," La Salle, IL: Open Court Publishing Company.



### 4.2.3 SENSOR DE CURVATURA

#### RESUMEN

En este trabajo se muestra la fabricación y caracterización de sensores de curvatura basados en una red de período largo (LPG) formada introduciendo cambios periódicos en el índice de refracción del núcleo de una fibra monomodo de núcleo sólido (SMF), o colapsando algunos huecos de la estructura del núcleo en el caso de una fibra fotónica (PCF), usando un láser de CO<sub>2</sub> enfocado sobre la fibra. Los sensores mostraron una respuesta sensible a la dirección de curvatura, resultado de la perturbación asimétrica en el índice de refracción de la fibra, causado por la irradiancia lateral del láser CO<sub>2</sub> sobre la fibra óptica. Respuesta lineal y sensibilidades de 40 nm/m<sup>-1</sup> en corrimiento de fase y de 18 dB/m<sup>-1</sup> en pérdida de transmitancia fueron obtenidos con el sensor grabado en fibra SMF y una alta sensibilidad en corrimiento de fase, en muy pequeño rango de curvatura, en el caso del sensor grabado en fibra PCF. La respuesta lineal, la facilidad y bajo costo del proceso de fabricación muestran a estos sensores interesantes para su uso en el monitoreo de estructuras diversas.

#### SENSORES DE CURVATURA

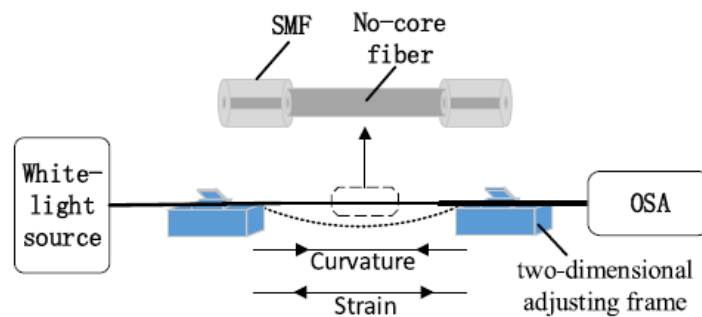


Figura 4.6 Arreglo esquemático para la medida de variaciones en la curvatura de un material.

#### ESCRITA DE LA RED LPG

##### i) Red LPG en fibra SMF

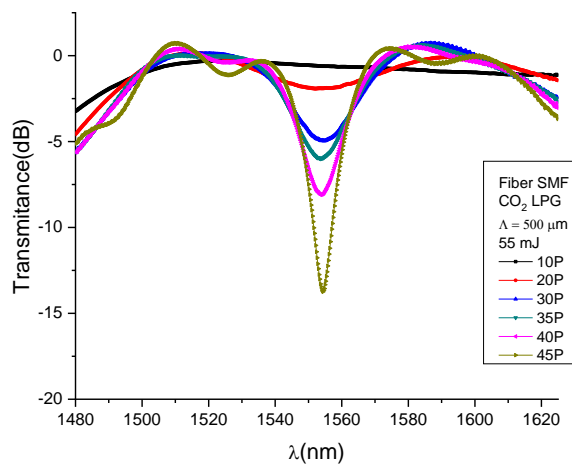


Figura 4.7 Red LPG grabada con láser de CO<sub>2</sub> en fibra SMF28e. Se muestra la evolución de la red al ir aumentando el número de períodos de la red. Laboratorio de Fibras Especiales Post Doctorado UNICAMP 2014.

ii) Red LPG en fibra PCF

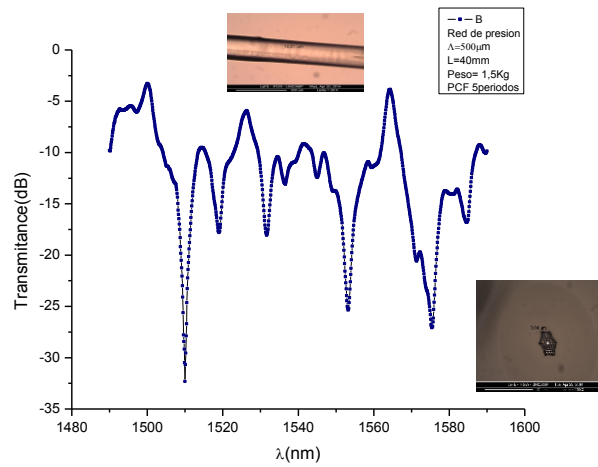


Figura 4.8 Red LPG mecánica en fibra PCF de sílica. Se muestra la enmenda de las fibras SMF y PCF, la estructura PCF de 5 anillos y la red con dips en la trasmittancia mayores de 20 dB. Post Doctorado UNICAMP 2014.

MEDIDA DE CURVATURA

i) Sensor: LPG (CO<sub>2</sub>) in SMF

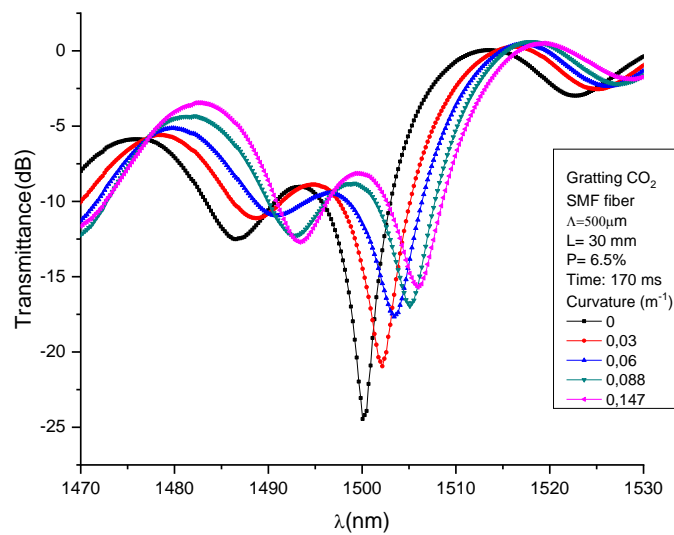


Figura 4.9 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra SMF28 mostrando su sensibilidad a cambio de curvatura. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

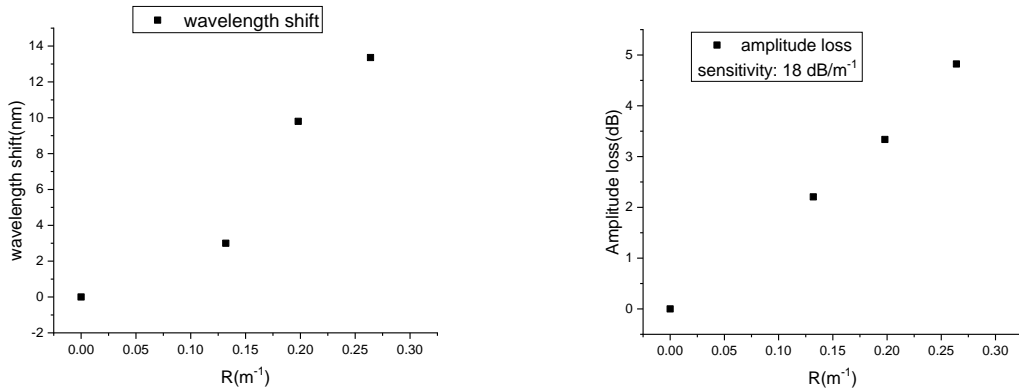


Figura 4.10 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra SMF28 mostrando dependencia lineal del cambio de fase y cambio de amplitud del dip en la transmitancia respecto al cambio de curvatura de la fibra. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### iii) SENSOR: LPG (CO<sub>2</sub>) in PCF (LAFE)

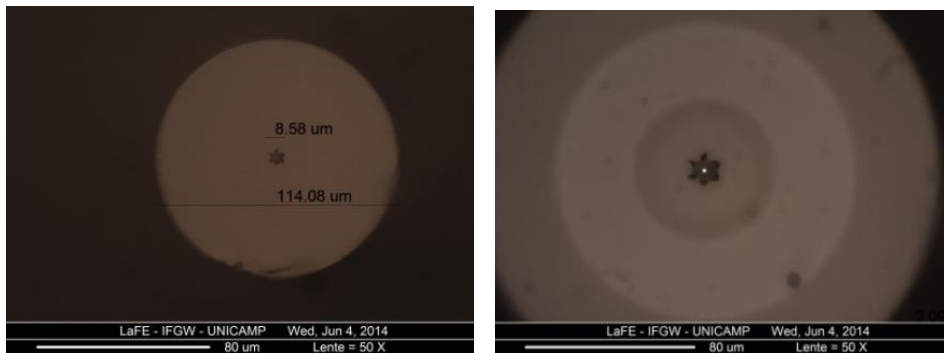


Figura 4.11 Fibra PCF con núcleo hexagonal. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### UNIÓN DE FIBRAS: SMF-PCF

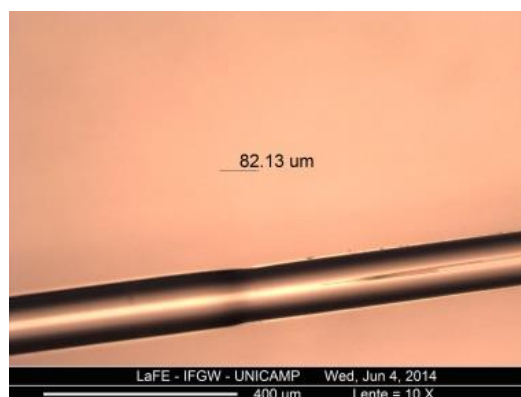


Figura 4.12 Unión de Fibra PCF de núcleo hexagonal con fibra común mono modo. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Red LPG GRABADA EN PCF:

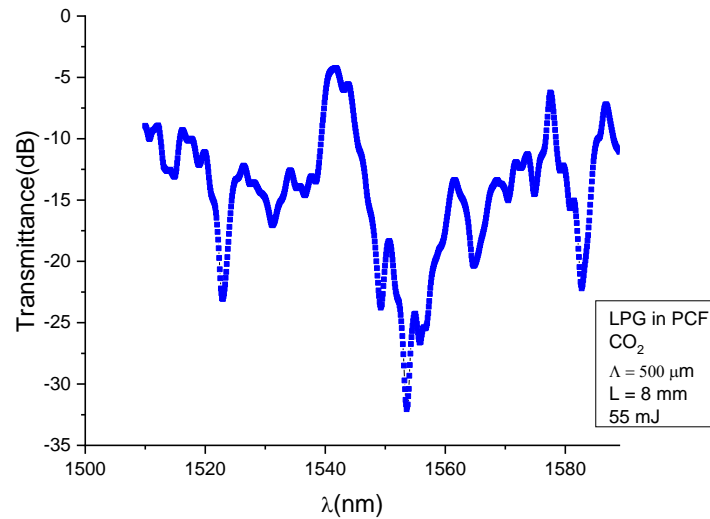


Figura 4.13 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra PCF de 5 anillos. El dip en la transmitancia fue mayor de 15 dB. Post Doctorado UNICAMP 2014.

MEDIDA DE CURVATURA:

Se observa que, en menos de 2 nm de corrimiento del pico, este sume debido a que ganan energía los modos de  $\lambda$  cercanos, por ello se mide curvatura usando variaciones de intensidad en la transmitancia.

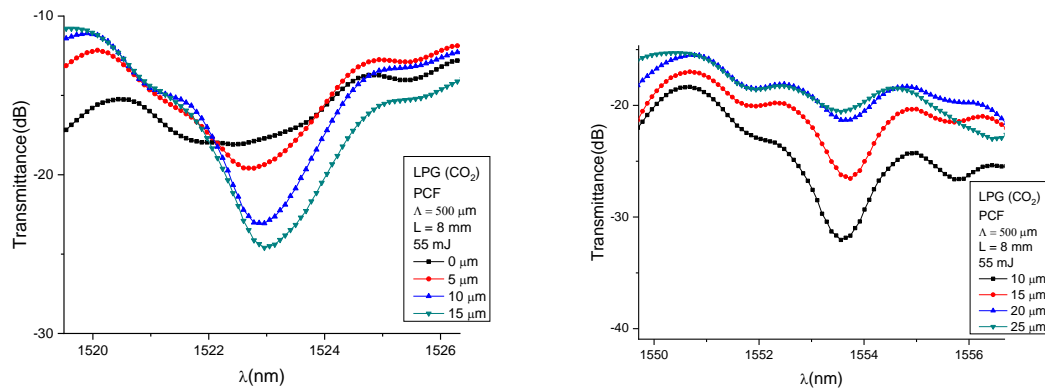


Figura 4.14 Red LPG escrita con láser de CO<sub>2</sub> en fibra PCF (LAFE) mostrando cambio de amplitud del dip en la transmitancia respecto al cambio de curvatura de la fibra. Post Doctorado UNICAMP 2014.

BIBLIOGRAFIA

[1] Huaping Gong, Haifeng Song\*, Xiaorui Li, Jianfeng Wang, Xinyong Dong. “An optical fiber curvature sensor based on photonic crystal fiber modal interferometer”. Sensors and Actuators A 195 (2013) 139– 141.

- [2] Long Jin, Wei Jin, *Senior Member, IEEE*, and Jian Ju. “Directional Bend Sensing With a CO<sub>2</sub>-Laser-Inscribed Long Period Grating in a Photonic Crystal Fiber”. *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, VOL. 27, NO. 21, NOVEMBER 1, 2009.
- [3] Li-Yang Shao, Albane Laronche, Mateusz Smietana, Predrag Mikulic, Wojtek J. Bock, Jacques Albert. “Highly sensitive bend sensor with hybrid long-period and tilted fiber Bragg grating”. *Optics Communications* 283 (2010) 2690–2694.
- [4] Sun Yin-shan, Zhong Jian-ying, Wang Zhen, Zhang Wen-tao, and Di Hai-ting. “Bending Curvature Measurement Based on Fiber Optic Technology and its Applications in High Voltage Switch”. *Applied Mechanics and Materials* Vols. 568-570 (2014) pp 26-29 © (2014) Trans Tech Publications, Switzerland. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.568-570.26.
- [5] T. Allsop, A. Gillooly, V. Mezentsev, T. Earthgowl-Gould, R. Neal, D. J. Webb, and I. Bennion. “Bending and Orientational Characteristics of Long Period Gratings Written in D-Shaped Optical Fiber”. *IEEE. Transactions on instrumentation and measurement*, VOL. 53, NO. 1, FEBRUARY 2004.
- [6] H. W. Lee and K. S. Chiang, “CO laser writing of long-period fiber grating in photonic crystal fiber under tension,” *Opt. Exp.*, vol. 17, no. 6, pp. 4533–4539, Mar. 2009.

#### 4.2.4 SENSOR DE DESPLAZAMIENTO

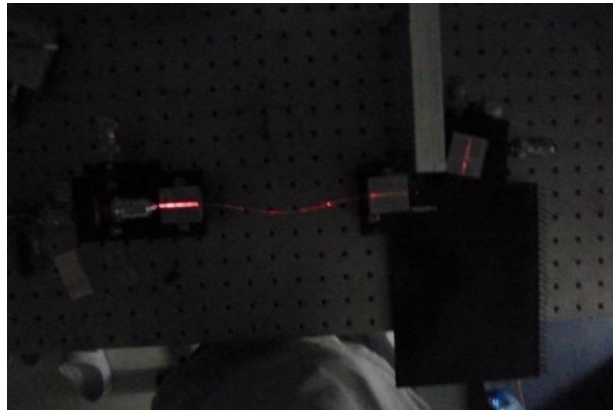
Cuando una fibra afinada es curvada, además de acoplamiento entre los modos radiales  $LP_{0m}$ , se origina acoplamiento a los modos no simétricos  $LP_{1q}$ , y, en general, acoplamiento entre los modos  $LP_{nm}$  y  $LP_{nq}$  o  $LP_{n\pm 1q}$  originándose la presencia de los dips profundos en la transmitancia.

Observación inicial del fenómeno

Taper: Fibra SMF28

L= 10mm

d=30micras



*Figura 4.15 La fotografía muestra la fibra afinada en la zona central de una fibra óptica sujeta por un extremo a un soporte fijo y por extremo opuesto a un soporte móvil. Post Doctorado UNICAMP 2014.*

Un extremo de la fibra afinada (taper) es pegada a un soporte fijo, la luz es insertada por este extremo usando lente de microscopio; el otro extremo de la fibra es sujeto a un soporte que se puede desplazar micrométricamente, este extremo es unido a un pigtail usando splicer para lectura de la transmitancia. Inicialmente el taper es curvado para observar los mínimos en el espectro de transmitancia, (la longitud de onda y el número de mínimos observados depende de la curvatura del taper), seguidamente el extremo móvil es desplazado micrométricamente observando que a medida que aumenta la curvatura, los mínimos en la transmitancia se corren hacia el azul. El efecto se puede observar en el OSA (por corrimiento de fase) o en un osciloscopio (por pérdida de transmitancia).

La figura 4.16 muestra el corrimiento hacia menores longitudes de onda en los dip de la transmitancia al desplazar un extremo aumentando la curvatura del taper.

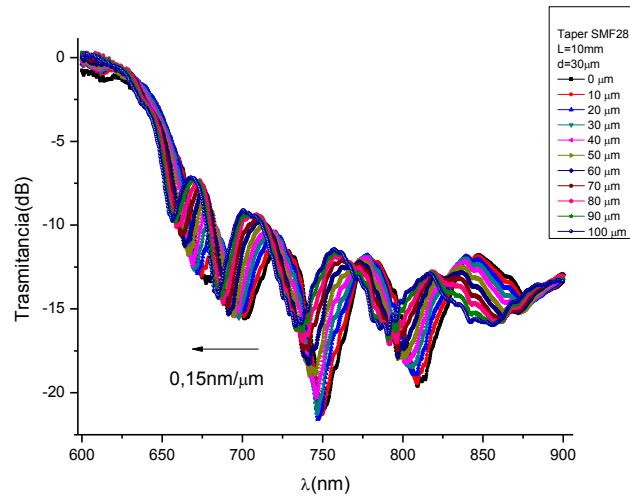


Figura 4.16 Espectro de transmitancia correspondiente al taper mostrado en la figura 4.15. Se observa corrimiento hacia menores longitudes de onda en los dip de la transmitancia al desplazar un extremo aumentando la curvatura del taper. Post Doctorado UNICAMP 2014.

La figura 4.17 muestra el corrimiento hacia menores longitudes de onda en los dip de la transmitancia al desplazar un extremo aumentando la curvatura del taper.

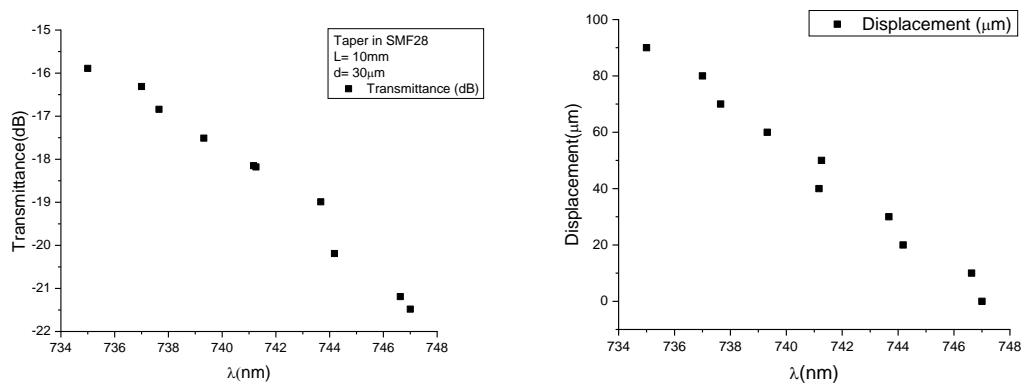


Figura 4.17 Las figuras muestran la dependencia lineal de la intensidad del dip de transmitancia al ir aumentando la curvatura. Post Doctorado UNICAMP 2014.

La figura 4.18 muestra la dependencia lineal del corrimiento de fase del dip de transmitancia al ir desplazando uno de sus extremos aumentando la curvatura del taper.

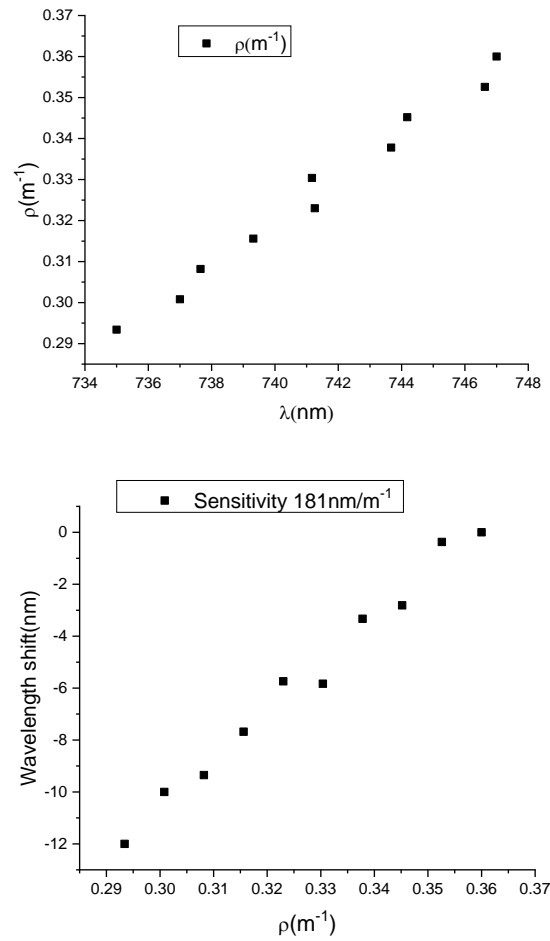


Figura 4.18 Las figuras muestran la dependencia lineal del corrimiento de fase del dip de transmitancia al ir desplazando un extremo de la fibra aumentando la curvatura. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Optimizando la forma de la curvatura de la fibra para obtener la mayor sensibilidad a cambios de curvatura de la fibra o a desplazamientos de uno de sus extremos.

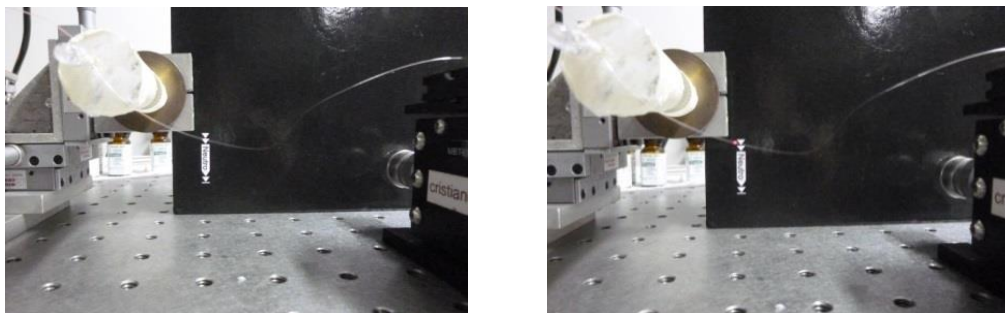


Figura 4.19 Curvatura del taper. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.



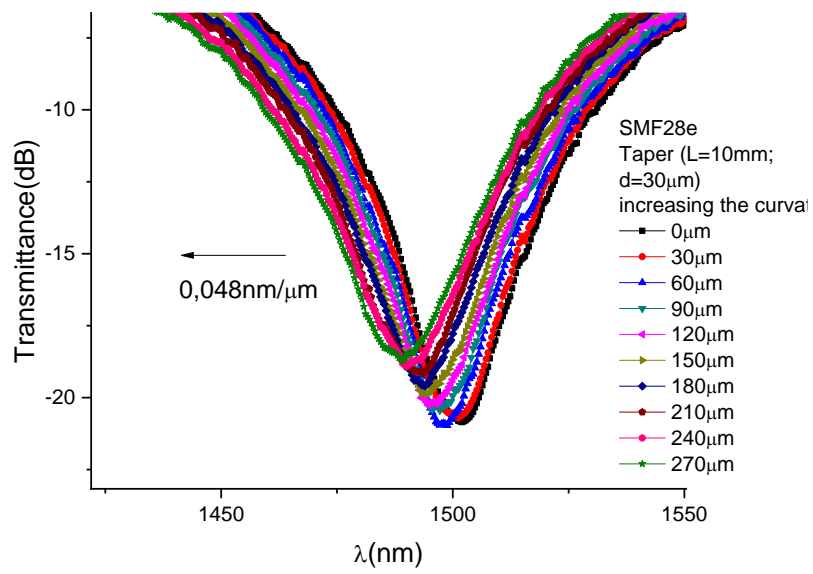


Figura 4.20 Transmittancia del taper curvado mostrado en la figura 4.19 al ir aumentando la curvatura. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

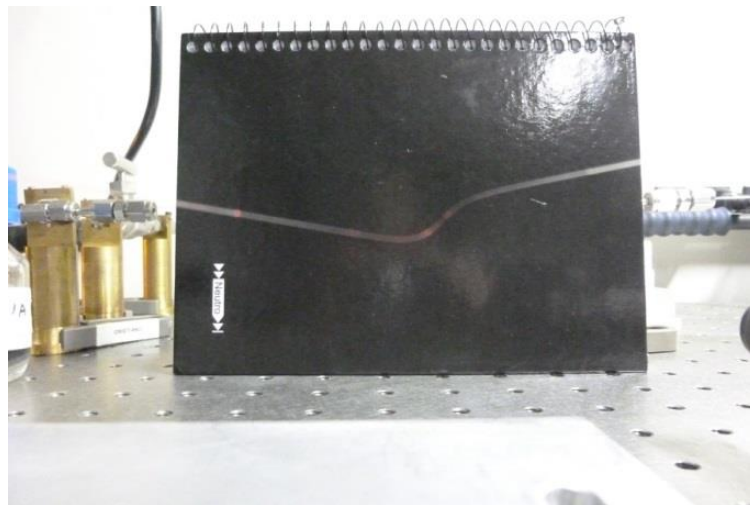


Figura 4.21 Curvatura del taper en forma de S. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

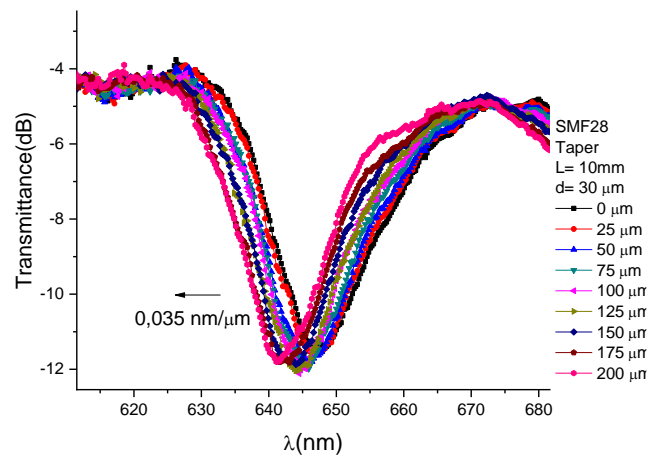


Figura 4.22 Transmitancia del taper curvado en S al ir aumentando la curvatura. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

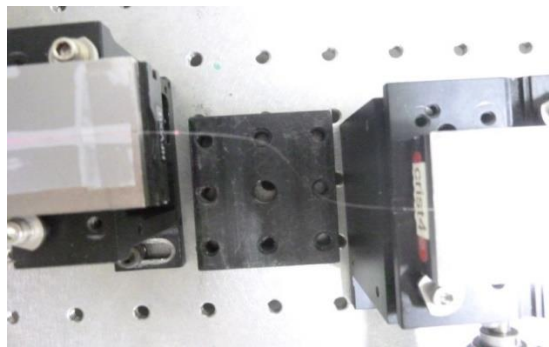


Figura 4.23 Método sencillo de obtener curvatura en forma de S. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

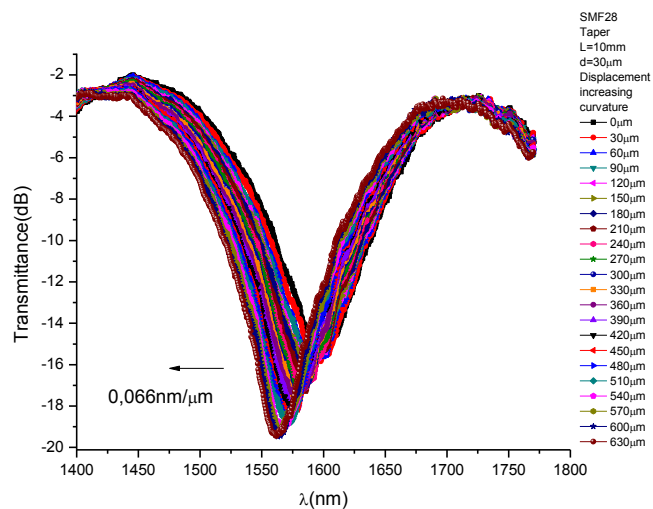


Figura 4.24 Transmitancia del taper curvado en S mostrado en la figura 4.23 al ir aumentando la curvatura. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Taper de 30 micras con “curvatura congelada”

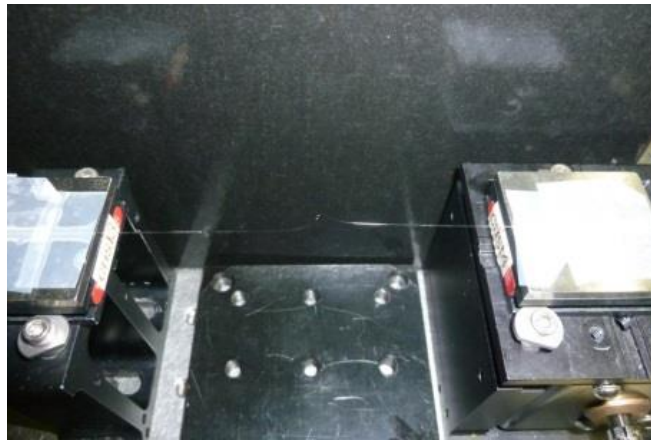


Figura 4.25 La fotografía muestra el taper con “curvatura congelada” fabricada en fibra SMF28 comercial. Post Doctorado UNICAMP 2014.

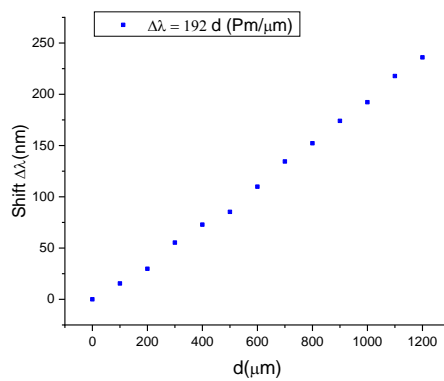
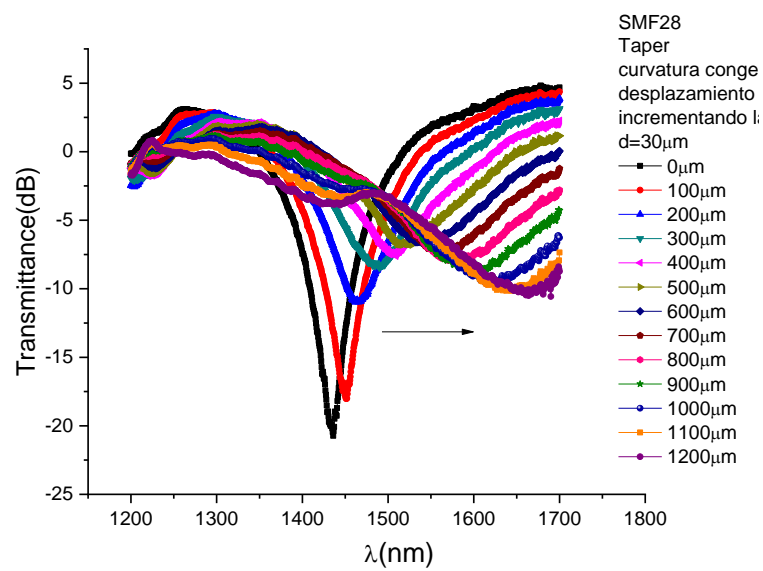


Figura 4.26 Sensibilidad del taper con “curvatura congelada” a variaciones de curvatura originados por desplazamiento. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

En la figura 4.26 se observa desplazamiento hacia longitudes de onda mayores del dip en la transmitancia del taper al ir aumentando la curvatura por desplazamiento axial del soporte donde se encuentra fijado uno de los extremos del taper. La sensibilidad alcanzada fue de 192 Picómetros por micra de desplazamiento.

Rango 1200  $\mu\text{m}$

Sensibilidad: 192 Pm/ $\mu\text{m}$

Resolución: 10  $\mu\text{m}$  en el desplazamiento “d” (menor al 1% del rango)

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Hang Zhou Yang, Xue Guang Qiao, Dong Luo, Kok Sing Lim, WuYi Chong, Sulaiman Wadi Harun. “A review of recent developed and applications of plastic fiber optic displacement sensors”. *Measurement* 48 (2014) 333–345.
- [2] Ji-Huan Chen, Xu-Guang Huang, Jia-Rong Zhao, Jin Tao, Wei-Xin He, Song-Hao Liu. “Fabry–Perot interference-based fiber-optic sensor for small displacement measurement”. *Optics Communications* 283 (2010) 3315–3319.
- [3] Ya-nan Zhanga, Yong Zhaoa,b, Qi Wang. “Improved design of slow light interferometer and its application inFBG displacement sensor”. *Sensors and Actuators A* 214 (2014) 168–174.
- [4] Ana Margarida Rodrigues Pinto, José Manuel Baptista, José Luís Santos, Manuel Lopez Amo and Orlando Frazão. “Micro-Displacement Sensor Based on a Hollow-Core Photonic Crystal Fiber”. *Sensors* 2012, 12, 17497-17503; doi:10.3390/s121217497.
- [5] Chen-feng Fan, Chih-lun Chiang, and Chin-ping Yu. “Birefringent photonic crystal fiber coils and their application to transverse displacement sensing”. (C) 2011 OSA 10 October 2011 / Vol. 19, No. 21 / *OPTICS EXPRESS* 19948.
- [6] Karolina Orłowska, Piotr Słupski, Michał Świątkowski, Piotr Kunicki, Anna Sankowska, Teodor Gotszalk. “Light Intensity Fibre Optic Sensor for MEMS displacement and vibration metrology”. *Optics & Laser Technology* 65 (2015) 159–163.

#### **4.2.5 SENSOR DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG APLICADO AL MONITOREO DE VIBRACIONES FLEXURALES Y DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE YOUNG DINÁMICO DE MATERIALES**

##### **RESUMEN**

Un sensor de fibra óptica basado en las características de deformación por flexión de una red de periodo largo (LPFG), fue fabricada en fibra óptica monomodo común utilizando un láser de CO<sub>2</sub>. El sensor se aplicó a la monitorización del movimiento de flexión y a la determinación del módulo dinámico de Young de vigas en voladizo. Las vigas se sometieron a vibraciones de flexión libre simplemente liberándolas desde una posición de flexión y la respuesta dinámica fue detectada por el sensor LPFG obteniéndose a partir de la medición del desplazamiento, la velocidad y la aceleración de la viga. La identificación de la constante de amortiguamiento viscosa del sistema y el análisis de FFT por desplazamiento debido a flexión se utilizaron en la ecuación de frecuencia para calcular el módulo de Young. El sensor se probó en una serie de materiales industriales y al comparar el módulo de Young medido con valores conocidos de la literatura se encontró una buena concordancia. Los resultados mostraron la viabilidad de los acelerómetros de fibra óptica LPFG para el monitoreo de la salud estructural (SHM) de estructuras de ingeniería civil y para la caracterización dinámica de los materiales en función de las mediciones de su respuesta dinámica.

##### **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo mostramos la viabilidad de los sensores de fibra óptica tipo LPG para el monitoreo de salud estructural (SHM) basados en mediciones de la respuesta dinámica de las estructuras. Los desplazamientos, las velocidades, las aceleraciones y las frecuencias naturales de las vibraciones de flexión de placas delgadas de diferentes materiales dispuestos en una configuración en voladizo se miden en base a un sensor de flexión LPG fabricado con láser CO<sub>2</sub>. Los movimientos de flexión de las placas se modelan como un movimiento armónico amortiguado y, a partir del ajuste del modelo con la respuesta dinámica del sensor LPG, se calculan los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de las placas. Las frecuencias de los modos normales de vibración se obtienen de la transformada rápida de Fourier (FFT) del desplazamiento y el módulo de Young se obtiene de la dependencia de la frecuencia fundamental con la longitud de la placa en voladizo [1-5].

Los resultados mostraron una buena concordancia con los valores determinados por otras técnicas demostrándose la capacidad de los sensores LPG para monitorear vibraciones estructurales [6-9].

Este acelerómetro LPG muestra una serie de ventajas con respecto a otros acelerómetros, tales como tamaño pequeño, fácil fabricación, alta sensibilidad (42,37 V/m), inmunidad a la interferencia electromagnética, baja pérdida de inserción, fácil integración y robustez incluso en condiciones corrosivas y otros ambientes hostiles [10-13].

##### **TEORÍA**

Una LPG es una perturbación periódica en el índice de refracción de la fibra, esta perturbación acopla la luz que viaja en los modos de núcleo con los modos de revestimiento alrededor del núcleo y que cumplen la condición de coincidencia de fase dada por la expresión  $\lambda^{(m)} = (n_{co} - n_{cl}^{(m)})\Lambda$ . Este acoplamiento origina mínimos en la transmitancia que se expresan por:  $T^{(m)} = 1 - \sin^2(\kappa^{(m)}L)$ . En las aplicaciones de las redes LPG, la longitud de onda de resonancia y las caídas de atenuación en la transmitancia varían con la tensión, la temperatura, el índice de refracción del entorno que rodea la fibra, la flexión, la torsión o la carga transversal sobre esta [15-18].

Las redes LPG son muy sensibles a la curvatura, y el cambio en la longitud de onda de resonancia y las caídas en la transmitancia varían linealmente con la curvatura aplicada. Además, como se muestra en la Figura 4.27, la sensibilidad a la curvatura de las LPG, escrita por un láser de CO<sub>2</sub>, depende de la dirección de curvatura [19].

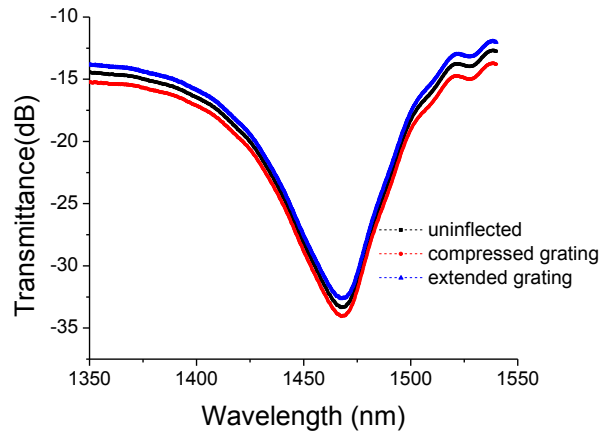


Figura 4.27 Sensibilidad a flexión de la red LPG gravada con un láser de CO2 en fibra SMF comercial. Período de la red  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ ; longitud de la red  $L=2,5 \text{ mm}$ . Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Es posible analizar la sensibilidad a curvatura de las LPGs observando las ecuaciones para  $\lambda^{(m)}$  y  $T^{(m)}$ . La curvatura origina estiramiento o compresión de la fibra cambiando los índices de refracción  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$  debido al efecto elasto-óptico. Además, la deformación elástica cambia el período de la red ( $\Lambda$ ). Los cambios en los índices de refracción de la fibra y en el período de la LPG originan un corrimiento en la longitud de onda de resonancia  $\lambda$ , dado por la ecuación 4.19 [4.1]:

$$\frac{d\lambda}{d\varepsilon} = \left( \frac{dn_{co}}{d\varepsilon} - \frac{dn_{cl}^{(m)}}{d\varepsilon} \right) \Lambda + \left( n_{co} - n_{cl}^{(m)} \right) \frac{d\Lambda}{d\varepsilon} \quad (4.19)$$

La ecuación para  $T^{(m)}$  expresa la fuerza de acoplamiento que gobierna la transferencia de energía entre los modos de núcleo y revestimiento. En esta ecuación,  $L$  es la longitud de la rejilla, y  $\kappa^{(m)}$  denota el coeficiente de acoplamiento entre el modo de núcleo y el modo de revestimiento de orden  $m$  dado como:

$$\kappa^{(m)} = \frac{\pi \Delta n_{co} J^{(m)}}{\lambda} \quad (4.20)$$

Donde,  $\Delta n_{co}$  es la modulación de índice del núcleo de la fibra, y  $J^{(m)}$  es la integral de superposición entre el modo guiado fundamental y los modos de revestimiento en el área del núcleo de la fibra. Con el aumento de la flexión (en compresión), más energía se propagará hacia el medio externo, que luego se perderá por dispersión y absorción. La pérdida de energía en el modo de revestimiento reduce la integral de superposición entre el modo de núcleo fundamental y el modo de revestimiento, causando la reducción de la eficiencia de acoplamiento en el modo de núcleo al modo de revestimiento de la red LPG, disminuyendo la profundidad del mínimo en la transmittancia. Un efecto contrario es observado al curvar la fibra estirándola (red en extensión), en este caso la transmittancia se incrementa.

Si una LPG es pegada sobre la superficie de una regla en la configuración de viga en voladizo, como se muestra en la figura (4.28), entonces, tensión axial  $\varepsilon$  de la LPG pegada sobre la placa se incrementa o decrece con el movimiento flexural de la placa observándose una oscilación en la transmittancia que acompaña a la oscilación de la placa en configuración de voladizo [3]:

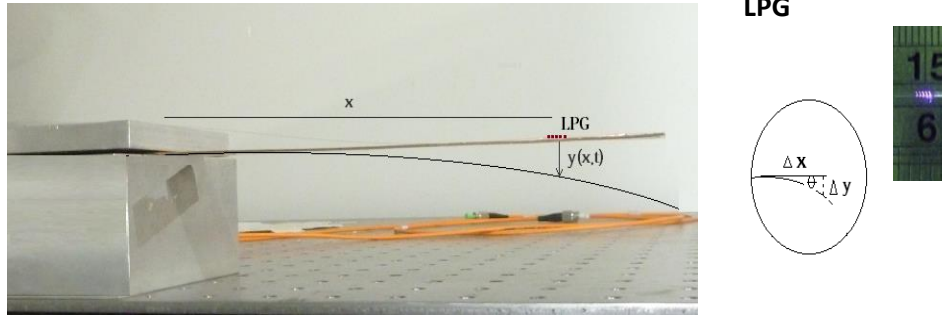


Figura 4.28. Viga en voladizo sin deformar (línea horizontal) y viga deformada en un momento posterior (línea negra). Cada punto distanciado  $x$  del extremo fijado experimenta un desplazamiento transversal  $y$ . Post Doctorado UNICAMP 2014.

Para pequeñas variaciones del esfuerzo axial  $\varepsilon$  de la LPG pegada sobre la placa, podemos escribir:

$$\Delta\varepsilon = \Delta x = \frac{\Delta y}{\theta} \quad (4.21)$$

De las ecuaciones anteriores se deduce la ecuación que relaciona la variación de la intensidad de la luz transmitida por la LPG con la variación del desplazamiento transversal de la placa [3]:

$$\Delta I = K \Delta y \quad (4.22)$$

siendo la constante  $K$  la sensibilidad de la intensidad a deflexión.

En este trabajo, se muestra la aplicación de la alta sensibilidad del sensor LPG a variaciones de curvatura para monitorear, el desplazamiento, velocidad, aceleración del movimiento flexural de reglas de distintos materiales en la configuración de voladizo. Asimismo, para determinar el módulo dinámico de Young de esos materiales, a partir del análisis de su desplazamiento transversal oscilatorio.

Nosotros usamos el modelo de Euler-Bernoulli para analizar el movimiento transversal oscilatorio del cantiléver mostrado en la figura (4.28). Cuando el cantiléver se mueve verticalmente ligeramente desde su posición de equilibrio horizontal y luego se libera, se observa un movimiento oscilatorio amortiguado. La ecuación diferencial del movimiento en el modelo de Euler-Bernoulli, es de la forma [21]:

$$\left(\frac{\partial^4 y}{\partial x^4}\right) + \frac{\rho A \partial^2 y}{YI \partial t^2} = 0 \quad (4.23)$$

Siendo su solución  $y(x, t)$  expresada como:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x) e^{i r_n t} = \sum_{n=1}^{\infty} w_n(x) e^{-\frac{k_v}{2\rho A} t} e^{\pm i \sqrt{\frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{l}\right)^4 - \left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2} t} \quad (4.24)$$

donde, la frecuencia del movimiento es dada por la expresión:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{l}\right)^4 - \left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2} \quad (4.25)$$

El parámetro  $\lambda_n$  es asociado con el  $n$ -ésimo modo flexural, y es una constante determinada por las condiciones de frontera (para el primer modo flexural,  $\lambda_1 = 1,875$  corresponde a la configuración en voladizo, con deformación transversal inicial diferente de cero y velocidad inicial igual a cero).  $Y$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $A$ , son, respectivamente, el módulo de Young, el momento de inercia, la densidad y la sección transversal de la placa. El movimiento oscilatorio del cantiléver es amortiguado.  $k_v$  representa la constante de amortiguamiento viscoso del sistema y su valor es



determinado desde el ajuste de la función  $y(x,t)$  dada por la ecuación (4.24) con los valores medidos por el sensor LPG.

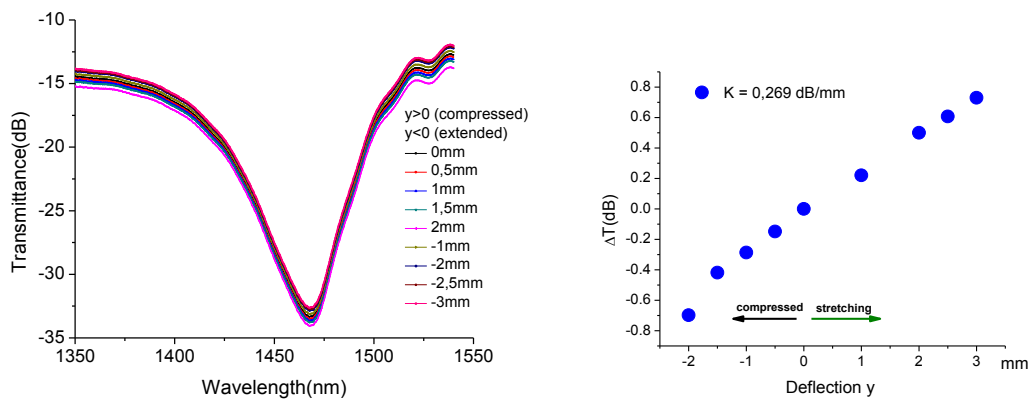
Seguidamente, las frecuencias normales de vibración de la placa en voladizo son determinadas aplicando la transformada rápida de Fourier FFT a la función de desplazamiento transversal de la placa,  $y(x, t)$ , para cada valor de longitud ( $l$ ) de voladizo. Un ajuste de los valores de frecuencia del primer modo normal de oscilación en función de la longitud de voladizo nos permite determinar el módulo de Young dinámico del material.

**EXPERIMENTO**

a) Respuesta lineal del sensor LPG a cambios de curvatura

Una LPG ( $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ ;  $L= 2,5\text{mm}$ ) de 19 dB centrada en 1468nm fue grabada en fibra comercial SMF28. La sensibilidad a curvatura de esta LPG fue testada encontrándose cambios en el dip de la transmitancia de hasta 1,5 dB sin observarse corrimiento en la longitud de onda de resonancia figura (4.29a). Para determinar la sensibilidad ( $K$ ), a cambios de curvatura de nuestro sensor LPG, una placa fue dispuesta en configuración cantiléver. El sensor LPG fue pegado sobre la superficie superior de la placa a una distancia  $l$  del extremo fijo. La placa fue flexionada midiéndose el desplazamiento transversal ( $y$ ), en la posición central de la LPG y el cambio respectivo en el dip de la transmitancia fue registrada por un analizador espectral OSA.

El rango lineal en la respuesta de la variación en la transmitancia  $\Delta T$  versus el desplazamiento transversal ( $y$ ), observado para nuestro sensor fue de  $-1,5\text{mm} < y < 3\text{mm}$ , el valor de la constante  $K$ , determinado del ajuste lineal de los datos mostrados en la figura (4.29 b), fue de  $K = 0,269 \text{ dB/mm}$ .



*Figura 4.29 (a) Espectro de transmission de la LPG ( $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ ;  $L= 2,5\text{mm}$ ). Variación de  $\lambda=1468\text{nm}$  del mínimo de transmitancia versus la deflección; (b) Variación de la intensidad de la transmitancia versus la deflección ( $y$ ) en dB/mm. Post Doctorado UNICAMP 2014.*

b) Sensibilidad  $K$  expresada en mV/mm

El arreglo experimental usado para monitorear la vibración flexural del cantiléver es mostrado en la figura (4.30). Un OFLS-6 SLED SAFIBRA centrado en 1500nm es usado como fuente de luz. La LPG es pegada sobre la superficie superior de la placa y la luz transmitida, convertida en voltaje por un fotodetector NEW FOCUS 2033 es leída en un osciloscopio.



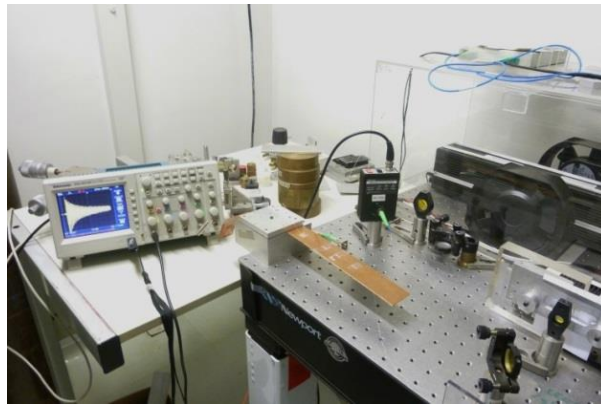


Figura 4.30 Arreglo experimental usado para monitorear la vibración flexural del cantiléver. Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

A fin de simplificar el método de medida, nosotros usamos un fotodetector para monitorear el movimiento oscilatorio del cantiléver observando las variaciones en la intensidad de la luz transmitida. Para expresar la sensibilidad a curvatura ( $K$ ) de nuestro sensor LPG, en unidades de voltaje versus la amplitud de deflexión ( $y$ ), graficamos el cambio en la intensidad de la luz leída por el fotodetector en función de la deflexión ( $y$ ) en el centro de la LPG (figura 4.31). El valor obtenido fue de  $K = 42,372 \text{ mV/mm}$  y el rango lineal observado fue de  $-1,5 \text{ mm} < y < 1,5 \text{ mm}$ .

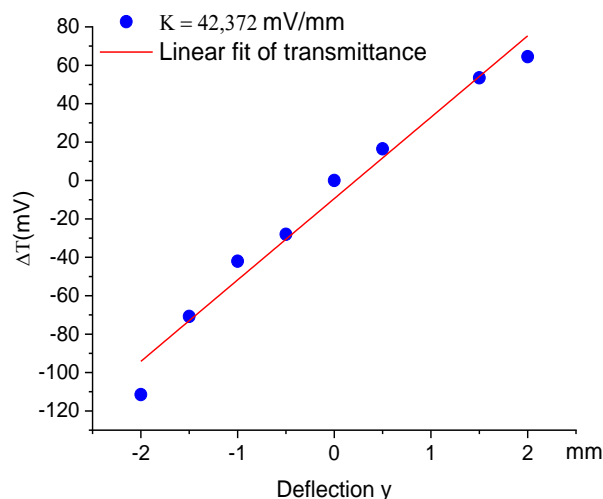


Figura 4.31 Intensidad de transmitancia versus la deflexión ( $k$ ) es expresada en  $\text{mV/mm}$ . Laboratorio de Fibras Especiales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

c) Monitoreo de Vibraciones flexurales de placas en voladizo

Con la finalidad de monitorear el movimiento oscilatorio del cantiléver, nosotros lo flexionamos ligeramente ( $y < 2 \text{ mm}$ ) y luego lo dejamos moverse libremente.

El movimiento oscilatorio de la placa origina la señal de transmitancia del sensor que es mostrada en la figura (4.32 a). En esta figura la transmitancia está expresada en voltios. Usando la constante ( $K = 42,372 \text{ mV/mm}$ ) de sensibilidad del sensor, la transmitancia es expresada en desplazamiento flexural  $y(L_1, t)$ , el resultado es mostrado en la figura (4.32b).  $L_1 = 0,130 \text{ m}$  es la distancia desde el extremo fijo de la regla hasta el centro del sensor LPG pegado sobre la regla y a una distancia de  $0,09 \text{ m}$  del extremo libre del cantiléver. La transformada rápida de Fourier (FFT) del desplazamiento  $y(L_1, t)$  es mostrada en la figura (4.32c). En esta

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

gráfica la frecuencia  $f = 10$  Hz corresponde al primer modo normal de oscilación del cantiléver para una longitud de voladizo  $L = 0,22$ m.

Un ajuste de la función  $y(x,t)$  expresada en la ecuación (4.25) con la curva experimental  $y(L_1,t)$  es mostrada en la figura (4.32d). Una constante de amortiguamiento viscoso  $K_v = 0,062$  Ns/m es aproximado desde este ajuste. La velocidad y aceleración del movimiento oscilatorio, obtenidas derivando la curva experimental de desplazamiento  $y(L_1,t)$ , son mostrados en las figuras (4.32e) y (4.32f).

Placa de acero

$L_1 = 130$  mm

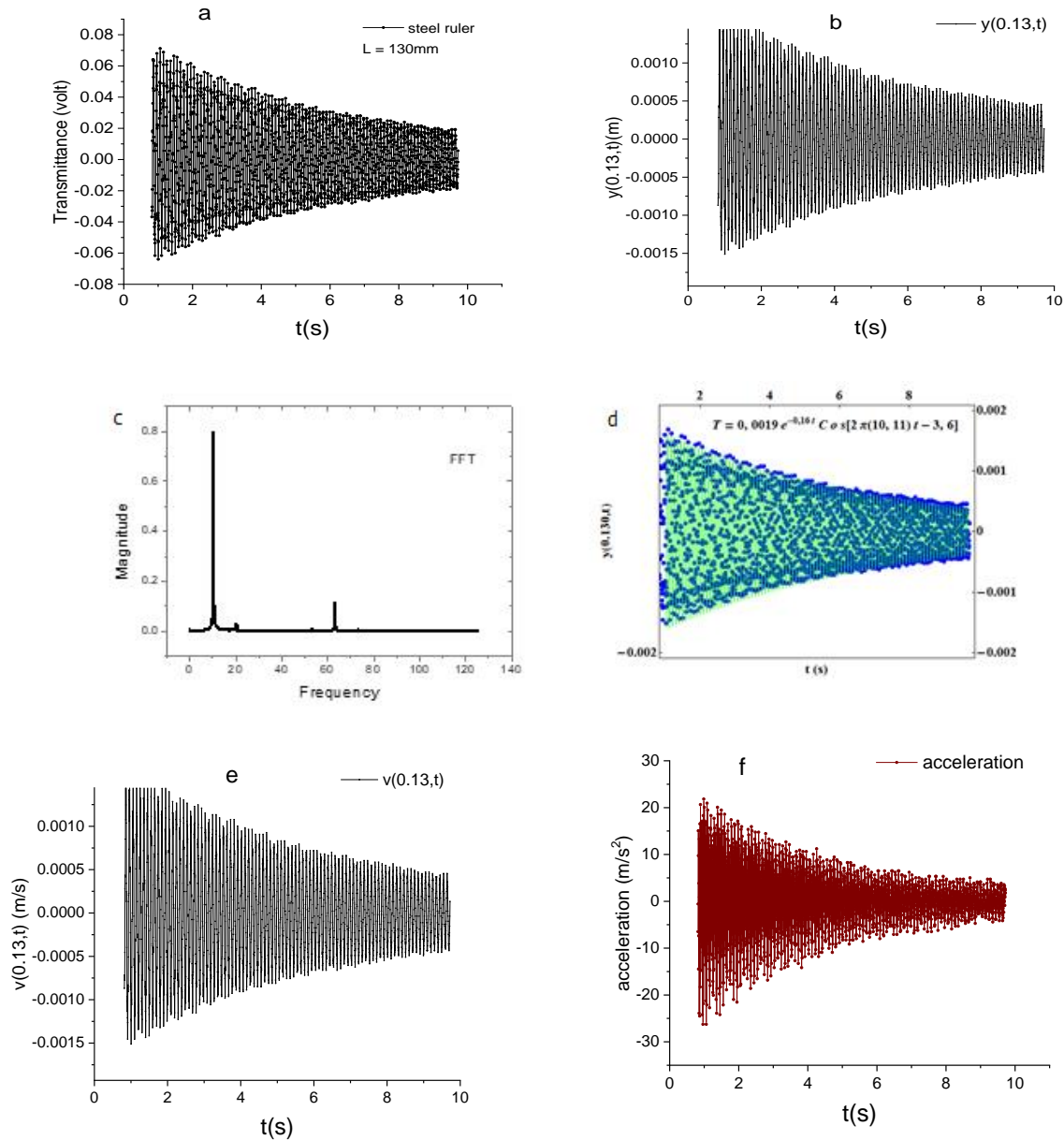


Figura 4.32 a) Intensidad de la luz detectada a la salida del sensor LPG b) desplazamiento transversal y del cantiléver a 0.13m del extremo fijo, c) FFT del desplazamiento  $y(0.13,t)$  mostrando  $f_1 = 10.11$  Hz, d)  $y(0,13,t)$  de desplazamiento obtenida del ajuste de los datos experimentales, e) velocidad del cantiléver en  $x = 0.13$ m, f) aceleración del cantiléver en  $x = 0.13$ m. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

d) Determinación del módulo de Young

El valor encontrado para  $K_v$  (en todos los casos) muestra que  $\left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2 \ll \frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{L}\right)^4$ , por lo que la ecuación (4.25) puede aproximarse a:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\lambda_n}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{YI}{\rho A}} \quad (4.26)$$

El módulo de Young del material del cantiléver es determinado del ajuste de la curva de datos experimentales de la frecuencia del primer modo normal ( $f_1$ ) versus la longitud de voladizo ( $L$ ) del cantiléver. La tabla 4.2 muestra los valores de las frecuencias del primer modo normal, correspondientes a diferentes longitudes de voladizo  $L$  de una regla de acero de ancho  $b=25,28\text{mm}$  y grosor  $a=0,98\text{mm}$ .

La figura (4.33) muestra la curva de ajuste de datos experimentales de la frecuencia del primer modo normal ( $f_1$ ) versus la longitud de voladizo ( $L$ ) del cantiléver de acero. Un valor de 197,87 Giga Pascales fue determinado para el acero.

Tabla 4.2 Regla de acero

material	L(m)	f(Hz)	b(m)	$\rho(\text{kg/m}^3)$	a(m)	A=ab (m <sup>2</sup> )	Y (Pa)
Acero	0.22	16.42	0.02528	7935	0.00098	2.47744E-05	2.00E+11
	0.24	13.66	0.02528	7935	0.00098	2.47744E-05	1.96E+11
	0.26	11.62	0.02528	7935	0.00098	2.47744E-05	1.95E+11
	0.28	10.11	0.02528	7935	0.00098	2.47744E-05	1.99E+11

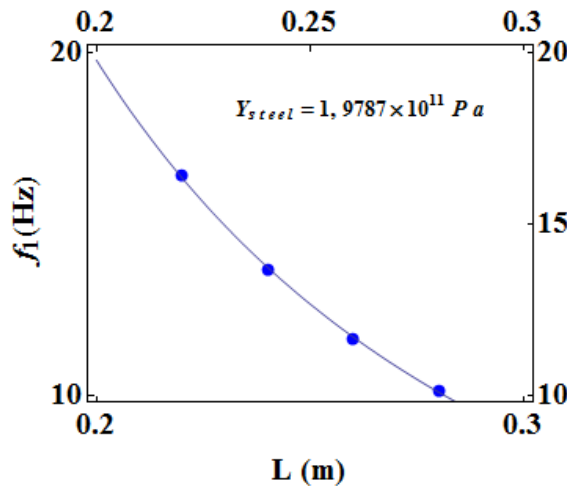


Figura 4.33 Frecuencias de los primeros armónicos  $f_1$  (círculos azules) versus la longitud de voladizo del cantiléver. La curva continua representa el ajuste de la ecuación (4.26) con los datos experimentales. Post Doctorado UNICAMP 2014.

e) Resultados para diferentes materiales

Valores de los módulos dinámicos de Young ( $Y$ ) determinados para el aluminio, cobre y acrílico, usando el mismo sensor y el mismo procedimiento, son mostrados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3 Módulos de Young

<b>material</b>	<b>a(m)</b>	<b>b(m)</b>	<b><math>\rho(\text{kg/m}^3)</math></b>	<b>Y (Pa)</b>
Acero	0.00098	0.02528	7935	2.00E+11
Aluminio	0.00149	0.04913	2700	7.09E+10
Cobre	0.00094	0.03638	8960	1.08E+11
Acrílico	0.00325	0.0347	1190	3.03E+09

CONCLUSIONES

En conclusión, en este trabajo se muestra la factibilidad de aplicación de sensores de fibra óptica, basados en redes LPG gravadas con láser de CO<sub>2</sub>, para el monitoreo de vibraciones de estructuras, así como para la determinación de sus características elásticas. La variación de la intensidad de salida de la red LPG es analizada y el modelo matemático para los cálculos de desplazamientos, velocidades y aceleraciones es mostrada. Asimismo, se muestra el modelo de Euler-Bernoulli para determinar el módulo de Young de los materiales desde los datos de desplazamiento transversal. Los rangos de medición observados para nuestro sensor fueron de  $-1,5\text{mm} < y < 1,5\text{mm}$  para el desplazamiento transversal en la posición del sensor,  $-1,25\text{ms}^{-1} < \dot{y} < 1,25\text{ms}^{-1}$  para la velocidad y  $\pm 2\text{g m/s}^2$  para la aceleración.

PUBLICACIONES

- [1] **L Mosquera**, Jonas H Osório and Cristiano M B Cordeiro. Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings. Meas. Sci. Technol. 27 (2016) 015102.
- [2] **L Mosquera**, L Yana, J Basurto. LPG Fiber Optic Sensor Applied to the Determination of the Flexural Elasticity Modulus of Woods. (2019).

REFERENCIAS

- [1] Rafael M. Digilov and Haim Abramovich. Flexural Vibration Test of a Beam Elastically Restrained at One End: A New Approach for Young's Modulus Determination. Hindawi Publishing Corporation. Advances in Materials Science and Engineering. (2013). ID 329530. Doi.org/10.1155/2013/329530.
- [2] Satoshi Tanaka, Hiroyuki Somatomo, Atsushi Wada, and Nobuaki Takahashi. Fiber-Optic Mechanical Vibration Sensor Using Long-Period Fiber Grating. Japanese Journal of Applied Physics 48 (2009).
- [3] Cuihua Shi, Tao Zhu, Yunjiang Rao, and Ming Deng. Fiber optic accelerometer based on Long Period Fiber Grating induced by CO<sub>2</sub> laser pulses. Microwave and Optical Technology Letters / Vol. 53, No. 4 (2011).
- [4] Jia He, Qin Huang and You-Lin Xu. Synthesis of vibration control and health monitoring of building structures under unknown excitation. Smart Mater. Struct. 23 (2014).
- [5] Rupika P Bandara, Tommy HT Chan and David P Thambiratnam. Structural damage detection method using frequency response functions. Structural Health Monitoring (2014), Vol. 13(4) 418–429.
- [6] M. Radovic, E. Lara-Curzio, L. Riester. Comparison of different experimental techniques for determination of elastic properties of solids. Materials Science and Engineering A368 (2004) 56–70.
- [7] Mohd. Mansoor Khana, Nishtha Panwarb, Ravi Dhawan. Modified cantilever beam shaped FBG based accelerometer with self-temperature compensation. Sensors and Actuators A 205 (2014) 79– 85.
- [8] A. Wolfenden, Ed., Dynamic Elastic Modulus Measurements in Materials. American Society for Testing and Materials, (1990).

- [9] Derek K. Shaeffer, Inven. MEMS Inertial Sensors: A Tutorial Overview. Sense, Inc. IEEE Communications Magazine • April (2013): 100-109.
- [10] A.Taghipour, A.Rostami, M.Bahrami, H.Baghban, M.Dolatyari, Comparative study between LPFG- and FBG-based bending sensors, Optics Communications 312 (2014) 99–105.
- [11] Xiao feng Zhou, Lufeng Che, Bin Xiong, Xiaolin Li, Jian Wu, Yuelin Wang. A novel capacitive accelerometer with a highly symmetrical double-sided beam-mass structure. Sensors and Actuators A 179 (2012) 291–296.
- [12] Romualdo Sorrentino. OLC – a signal conditioning and calibration technique for Magnetoelastic Sensors. Smart Sensor Technology and Measurement Systems, edited by Eric Udd, Daniele Inaudi, Proceedings of SPIE Vol. 5384 SPIE, Bellingham, WA, (2004); doi: 10.1117/12.539547.
- [13] Feng Peng, Jun Yang, Xingliang Li, Yonggui Yuan, Bing Wu, Ai Zhou, and Libo Yuan. In-fiber integrated accelerometer. OPTICS LETTERS / Vol. 36, No. 11 / June 1, (2011)
- [14] Ashish M. Vengsarkar, Paul J. Lemaire, Justin B. Judkins, Vikram Bhatia, Turan Erdogan, and John E. Sipe. Long-period fibre gratings as band rejection filters. J. Lightwave Technol. Vol14, N°1: 58–64. (1996).
- [15] Toru Mizunami, Toshihiro Mori, and Tsubasa Fujiyoshi. Long-Period Fiber Gratings and their Sensing Applications. International Conference on Fiber Optics and Photonics © OSA (2012). ISBN: 978-146734718-1.
- [16] Yiping Wang. Review of long period fiber gratings written by CO<sub>2</sub> laser. Journal of Applied Physics 108, 081101. (2010).
- [17] Oleg V. Ivanov. Application of cladding modes of optical fibers for sensing: review of recent developments. LAT 2010: International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, edited by Vladislav Panchenko, Gérard Mourou, Aleksei M. Zheltikov, Proc. of SPIE Vol. 7994, 79941E · © (2011). Doi: 10.1117/12.881086.
- [18] Stephen W James and Ralph P Tatam. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. Meas. Sci. Technol. 14, (2003), R49–R61.
- [19] Yi-Ping Wang, Member, IEEE, and Yun-Jiang Rao. A Novel Long Period Fiber Grating Sensor Measuring Curvature and Determining Bend-Direction Simultaneously. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 5, NO. 5, OCTOBER (2005).
- [20] Satoshi Tanaka, Atsushi Wada, and Nobuaki Takahashi. Highly sensitive operation of LPG vibration sensor using bending-induced spectral change. 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, edited by Wojtek J. Bock, Jacques Albert, Xiaoyi Bao, Proc. of SPIE Vol. 7753, 77539Q · © (2011) SPIE · doi: 10.1117/12.885055.
- [21] Stephen P. Timoshenko and James M. Gere. Theory of Elastic Stability. Dover Publications 2<sup>da</sup> Edición. (2009).

#### 4.2.6 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG APLICADOS A LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN SUELOS

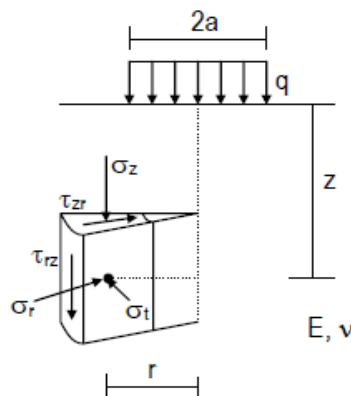
##### RESUMEN

En este trabajo se muestra la aplicación de sensores de fibra óptica tipo LPG a la determinación del esfuerzo transmitido y deformación de una muestra de suelo confinado sometido a cargas superficiales. El esfuerzo transmitido fue medido por un sensor de presión LPG mecánico y la curvatura del suelo por sensores LPG permanentes enterrados a diferentes profundidades. Suelo característico de la UNICAMP fue depositado en un cilindro de 0,8m de longitud y 0,305 m de diámetro. El suelo fue ligeramente compactado en capas, instalándose sobre cada capa un sensor LPG. Cargas superficiales de hasta 227 KPa fueron aplicadas sobre la superficie del suelo midiéndose las deformaciones axiales del suelo. Los valores de los módulos de elasticidad para este tipo de suelo fueron determinados a partir del ajuste de las ecuaciones de Boussinesq con los valores medidos por los sensores LPG enterrados. Un módulo de Young de 5,39 MPa y un coeficiente de Poisson  $\nu=0,52$  fueron determinados para este tipo de suelo.

##### INTRODUCTION

Uno de los primeros modelos de transmisión de esfuerzos en suelos fue desarrollado por Boussinesq en el año de 1885[1-5], en este modelo se considera que la transmisión de esfuerzo vertical ( $\sigma_z$ ) en el suelo sometido a una carga superficial "q", uniformemente distribuida sobre un disco de radio "a" localizado sobre su superficie, figura (4.34), viene dado por la expresión:

$$\sigma_z = q \left[ 1 - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad (4.27)$$



*Figura 4.34 Esfuerzos presentes al interior del suelo (modelo de Boussinesq)*

Determinándose, asimismo, la deformación  $\xi(z)$  del suelo, en el eje vertical, a partir de:

$$\xi[z_-] := \frac{(1+\nu)q}{\pi * a^2 * Y} \left[ 1 - 2\nu + \frac{2\nu * z}{(a^2+z^2)^{1/2}} - \frac{z^3}{(a^2+z^2)^{3/2}} \right] \quad (4.28)$$

En este trabajo experimental se muestra la aplicación de sensores de fibra óptica tipo LPG para la medición del esfuerzo transmitido ( $\sigma_z$ ) y la deformación del suelo ( $\xi_z$ ) arcillo-arenoso, de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP) en Sao Paulo-Brasil, a profundidades de hasta 0,6m. Usando el modelo de Businessq determinamos las constantes elásticas del suelo (módulos de Young y de Poisson) a partir del ajuste del modelo teórico con los valores de esfuerzo y deformación medidos por los sensores LPG.

LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Determinado el rango de variación del esfuerzo transmitido por simulación teórica, nos decidimos por usar sensores LPG mecánicos de  $600\mu\text{m}$  de período y  $15\text{mm}$  de longitud [9-11]. La variación de la transmitancia de este sensor sometido a cargas de hasta  $101\text{ KPa}$  es mostrada en la figura (4.35).

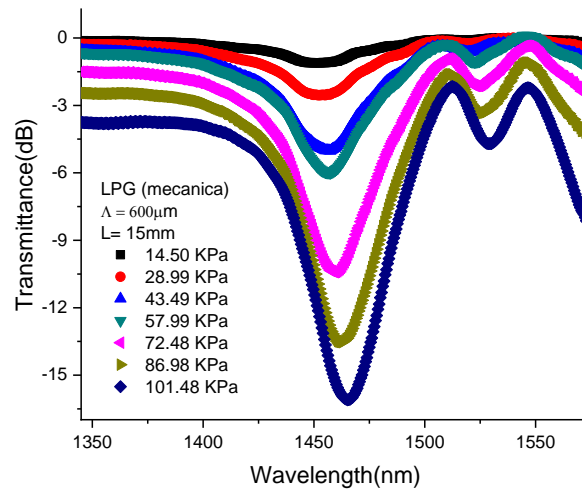


Figura 4.35 Cambios en amplitud y fase de la transmitancia del sensor LPG mecánico de fibra óptica sometido a cargas de hasta  $101\text{ KPa}$ . Jesús Basurto. Tesis de Maestría UNI (2019).

Una sensibilidad de  $25,854\text{ dBnm/KPa}$  fue determinada para este sensor desde el ajuste lineal.

La sensibilidad a flexión de las redes grabadas en fibras monomodo con láser de  $\text{CO}_2$  y la técnica para determinar su sensibilidad a cambios de curvatura son mostrados en las referencias [12-14]. Nosotros gravamos redes LPG con diferentes sensibilidades afín de no exceder la región lineal de respuesta a curvatura (Fig. 4.36).

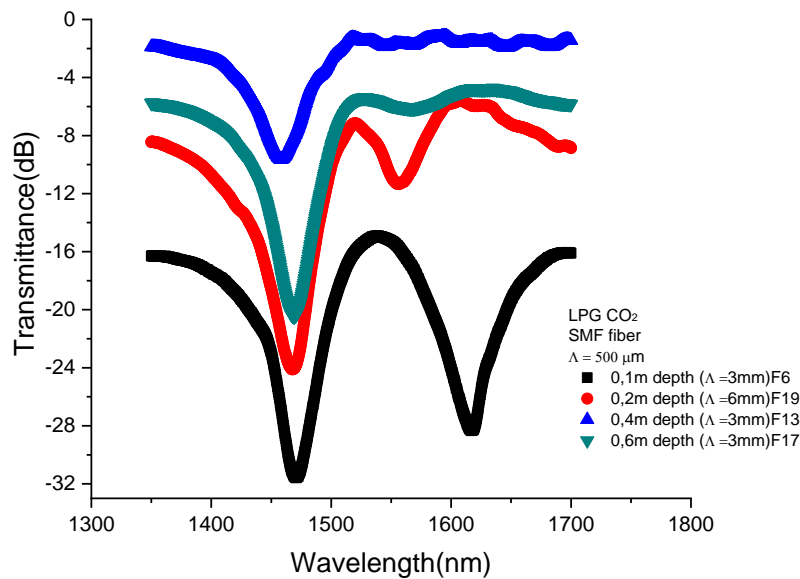


Figura 4.36 Redes LPG grabadas en fibra monomodo usando un láser de  $\text{CO}_2$ . Jesús Basurto. Tesis de Maestría UNI (2019).



MEDICIONES

Un cilindro de 0,305m de diámetro y 0,8m de longitud fue llenado de tierra arcilla-arenoso obtenida del suelo residual diabásico de la UNICAMP y fue compactada por capas. La energía de compactación fue de 0,24 KNm/m<sup>3</sup>. Los sensores finalmente quedaron instalados a profundidades de 0,1m, 0,2 m, 0,4m y 0,6m, sobre el eje vertical del cilindro, como se muestra en la figura (4.37). Las cargas fueron aplicadas sobre una placa circular de aluminio de 0,1m de diámetro colocada sobre la superficie del suelo.

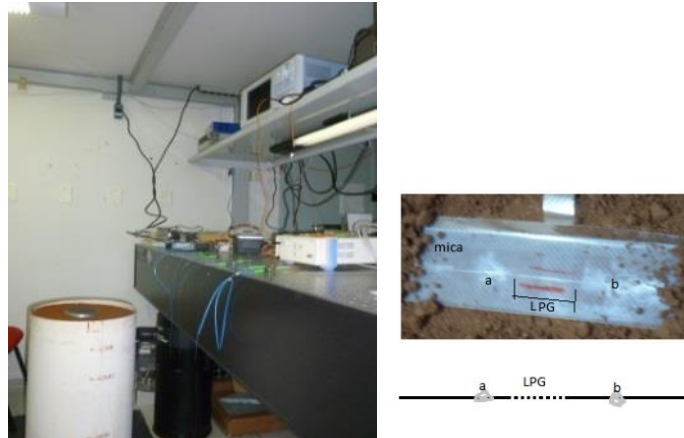


Figura 4.37 Se muestra el arreglo experimental usado para la determinación de esfuerzos transmitidos y deformación del suelo. Jesús Basurto. Tesis de Maestría UNI (2019).

MEDICIÓN DE DEFORMACIÓN DEL SUELO

La sensibilidad determinada para nuestros sensores LPG fue de 0,030 dB/KPa. El suelo fue sometido a cargas de hasta 226,8 KPa.

La figura (4.38) muestra los valores de la deformación del suelo versus la profundidad, medidos por los sensores LPG, cuando este fue sometido a las diferentes cargas superficiales.

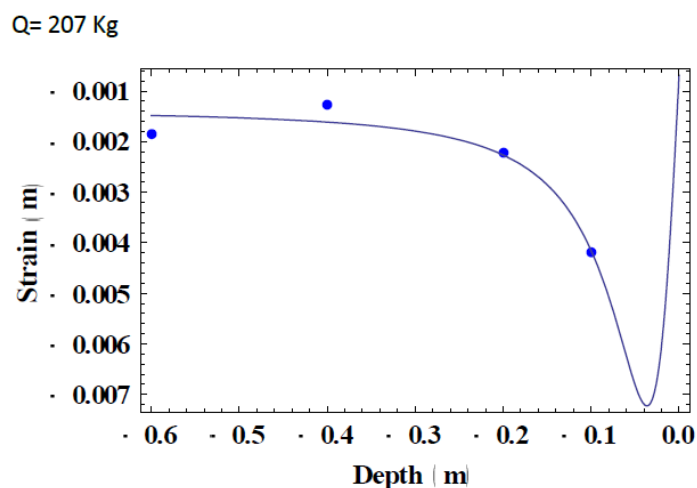


Figura 4.38 Los puntos en los gráficos muestran los valores de la deformación del suelo versus la profundidad, medidos por los sensores LPG, cuando este es sometido a una carga superficial de 207Kg. Las curvas de líneas continuas son las curvas de ajuste de parámetros (Y, v) usando la ecuación de Bousinessq. Jesús Basurto. Tesis de Maestría UNI (2019).



#### DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ELASTICIDAD DEL SUELO

La tabla 4.4 muestra los valores del módulo de Young y coeficiente de Poisson determinados por las curvas de ajuste no lineal mostradas en la figura (4.38).

*Tabla 4.4 Parámetros de elasticidad del suelo*

Carga en la superficie (KPa)	Módulo de Young Y (MPa)	Coefficiente de Poisson $\nu$
0,1	5,39	0,52
0,2	5,40	0,52
0,4	5,40	0,52
0,6	5,39	0,52

#### CONCLUSIONES

- Redes LPG mecánicas y LPG grabadas con láser de CO<sub>2</sub> fueron utilizadas para medir la curvatura del suelo ocasionada por cargas superficiales de 62,3 a 227 KPa así como la carga transmitida por el suelo a una profundidad de 0,2m.
- El valor encontrado para el módulo de Young  $Y = 5,40$  MPa se encuentra en el rango de valores correspondiente al tipo de suelo usado (arcilla arenosa semi compactada) y medido por Paulo Rocha [6] utilizando un equipo triaxial.
- El valor encontrado para el cociente de Poisson  $\nu = 0,52$  contrasta con el valor esperado para este tipo de suelo  $\nu \approx 0,4$  la causa probablemente se origine del efecto de confinamiento de la muestra (cilindro metálico de  $r = 0,15$ m).
- Los valores de las cargas transmitidas a la profundidad de 0,2m medidas por la red LPG mecánica mostraron buen acuerdo con los valores esperados de la ecuación de Boussinesq (ec. 4.27).

#### PUBLICACIONES

- [1] **L. Mosquera** and J. Basurto Pinao. Fiber optic sensors type LPG applied to the determination of stresses and deformations in soils. Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics. OSA Technical Digest (online) paper JTu2A.45. Zurich (2018). <https://doi.org/10.1364/BGPPM.JTu2A.45>.
- [2] **Mosquera L.**, Basurto Pinao, J. Monitoring of stresses and deformations in soils by fiber optic sensors. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology. Lima (2018).

#### REFERENCIAS

- [1] T. Keller, M. Berli, S. Ruiz, M. Lamandé, J. Arvidsson, P. Schjøning, A.P.S. Selvadurai, Transmission of vertical soil stress under agricultural tyres: Comparing measurements with simulations. Soil & Tillage Research 140 (2014) 106–117.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

- [2] E. A. Novikov, V. L. Shkuratnik, R. O. Oshkin, and M. G. Zaitsev, Effect of the stress-strain state of sandy-clay soils on their thermally stimulated acoustic emission. *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, No. 2, pp. 12-17, March-April, 2017
- [3] Sunita Mishrai, Tanusree Chakraborty, Dipanjan Basu. High strain rate stress-strain response of soils- A review. *International Workshop on Geotechnics for Resilient Infrastructure. The Second Japan-India Workshop in Geotechnical Engineering. Volume 3 (2016) Issue 2 Pages 80-85* <http://doi.org/10.3208/jgssp.v03.i13>
- [4] Hien Nghiem, Nien-Yin Chang. Soil-Structure Interaction Effects of High Rise. Buildings. *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. 30. (2008) [http://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session\\_01/30](http://scholarsmine.mst.edu/icchge/6icchge/session_01/30).
- [5] Gerd Gudehus. *Physical Soil Mechanics*. Springer-Verlag 2011.
- [6] Paulo José Rocha de Albuquerque. Analysis of Behavior of Small Diameter Pre-Molded Stake, Instrumentated, in Soil Residual of Diabásio of the Campinas Region. Master's thesis in Agricultural Engineering. UNICAMP/ Brasil (1996).
- [7] M. Navarrete F. A. Godínez, M. Villagrán Muniz. Elastic Properties of Compacted Clay Soils by Laser Ultrasonics. *Int J Thermophys* Received: 9 February 2012 / Accepted: 5 January 2013© Springer Science+Business Media New York 201. Doi 10.1007/s10765-013-1389-z
- [8] Américo Hossne García. Sandy loam savanna soil elastoplasticity. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, vol. 26, núm. 2, abril-junio, 2014. Cumaná, Venezuela.
- [9] Namkwon , Jaewon Song, and Jaehee Park. Mechanically Induced Long Period Fiber Grating Array Sensor. *Microwave and Optical Technology Letters / Vol. 53, No. 10*, October 2011.
- [10] Marrujo García Sigifredo et all. Temperature sensing on tapered single mode fiber using mechanically induced long period fiber gratings. *Proc.of SPIE Vol. 9577, 95770K · © 2015 SPIE. doi: 10.1117/12.2186505*.
- [11] L Mosquera et all. High sensitivity LPG Mach-Zehnder sensor for real-time fuel conformity analysis. *Meas. Sci. Technol.* 24 (2013).
- [12] *L Mosquera, Jonas H Osório and Cristiano M B Cordeiro. Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings. Meas. Sci. Technol. 27 (2016) 015102 (6pp).*
- [13] Yiping Wang. Review of long period fiber gratings written by CO<sub>2</sub> laser. *Journal of Applied Physics* 108, 081101- 2010.
- [14] J. S. Hallett, M. Partridge, S.W. James, D. Tiwari, T. Farewell, S. H. Hallett, and R. P. Tatam. Soil Moisture Content Measurement Using Optical Fiber Long Period Gratings. *25th International Conference on Optical Fiber Sensors, Proc. of SPIE Vol. 10323, © 2017 SPIE. doi: 10.1117/12.2263427*.

#### 4.2.7 SENSOR DE FIBRA ÓPTICA APLICADO AL ENSAYO DE MATERIALES

Redes de Bragg

MEDIDAS DE COMPRESIÓN:

a)



b)

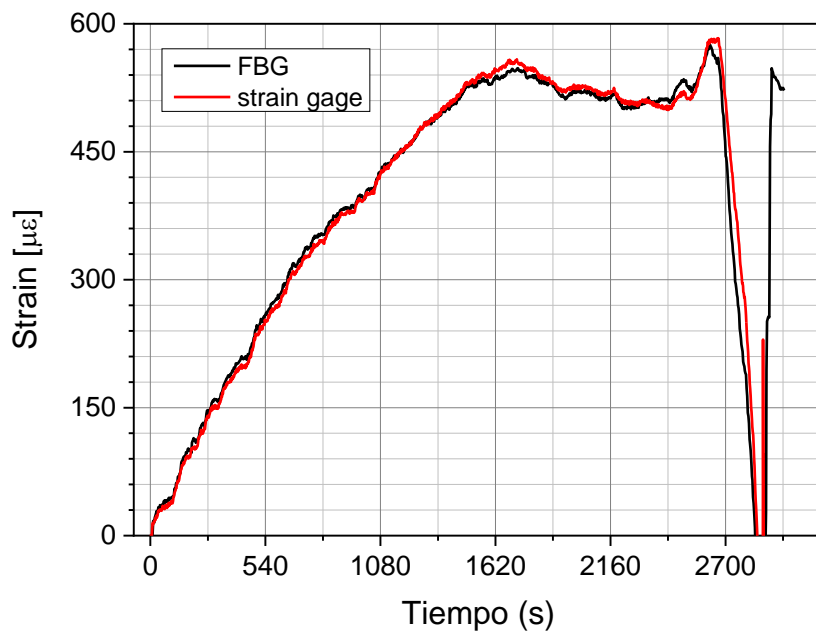
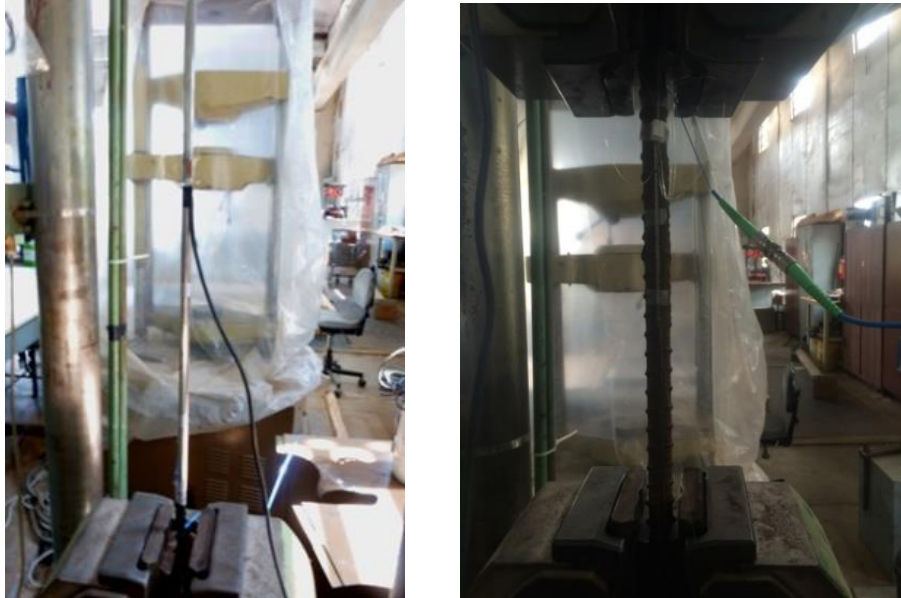


Figura 4.39 a) Prueba de compresión axial de probeta de concreto. La fotografía muestra el analizador espectral usado para la lectura de la luz reflejada por una red FBG pegada sobre la probeta. Un sensor eléctrico (strain gage) acompaña la medida óptica b) curvas de deformación axial registradas por la FBG y por el strain gage resistivo. Post Doctorado UNICAMP 2014.

MEDIDAS DE TRACCIÓN:

a)



b)

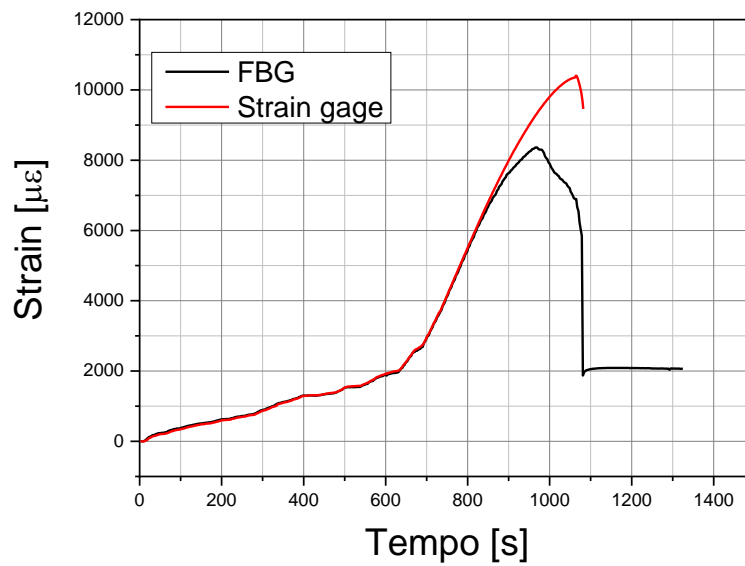


Figura 4.40 a) La fotografía muestra una barra de acero con una FBG y un strain gage pegados juntos para la lectura de su deformación axial por tracción. b) El alargamiento de la barra medido por el sensor FBG y por el strain gage coinciden hasta aproximadamente los 6500 micro-strain, indicando que para alargamientos mayores el sensor óptico fabricado no tiene más una respuesta lineal. *Post Doctorado UNICAMP 2014.*

BIBLIOGRAFIA

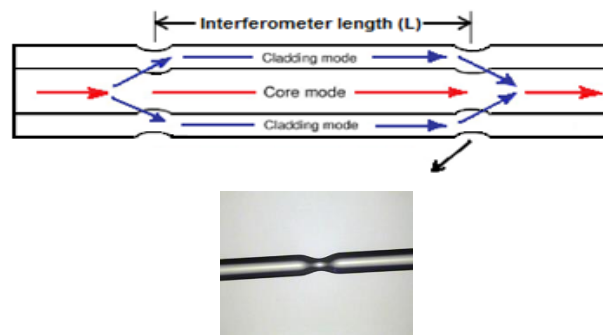
- [1] Guoliang Jiang, Mina Dawood, Kara Peters and Sami Rizkalla. “Global and Local Fiber Optic Sensors for Health Monitoring of Civil Engineering Infrastructure Retrofit with FRP Materials”. DOI: 10.1177/1475921709352989 *Structural Health Monitoring* 2010 9: 309 originally published online 4 December 2009.
- [2] Yu Ge, Mohammed Z.E.B. Elshafie, Samir Dirar, Campbell R. Middleton b. “The response of embedded strain sensors in concrete beams subjected to thermal loading”. *Construction and Building Materials* 70 (2014) 279–290.
- [3] K. Kesavan, K. Ravisankar, S. Parivallal, P. Sreeshylam, S. Sridhar. “Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete”. *Measurement* 43 (2010) 157–163.
- [4] Xiaoguang Ning, Hideaki Murayama, Kazuro Kageyama, Daichi Wada, Makoto Kanai, Isamu Ohsawa and Hirotaka Igawa. “Dynamic strain distribution measurement and crack detection of an adhesive-bonded single-lap joint under cyclic loading using embedded FBG”. *Smart Mater. Struct.* 23 (2014) 105011 (11pp).
- [5] Raffaella Di Sante, Lorenzo Donati, Enrico Troiani, Paolo Proli. “Evaluation of bending strain measurements in a composite sailboat bowsprit with embedded fibre Bragg gratings”. *Measurement* 54 (2014) 106–117.
- [6] Qin Liu, Zeng Ling Ran, Member, IEEE, Yun Jiang Rao, Member, IEEE, Shu Cheng Luo, Hui Qin Yang, and Ya Huang. “Highly Integrated FP/FBG Sensor for Simultaneous Measurement of High Temperature and Strain”. *IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS*, VOL. 26, NO. 17, SEPTEMBER 1, 2014.

### 4.3 SENSORES INTERFEROMÉTRICOS

#### 4.3.1 INTERFERÓMETRO FABRY PEROT GRAVADO SOBRE FIBRA ÓPTICA USANDO LÁSER DE CO<sub>2</sub>

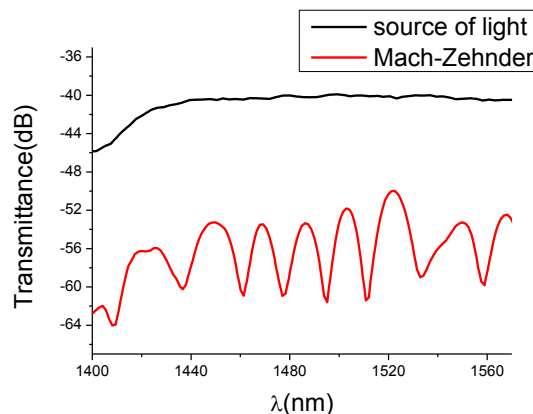
La figura (4.41) muestra un diagrama esquemático del interferómetro tipo Fabry- Perot hecho por dos irradiaciones consecutivas y próximas del láser de CO<sub>2</sub> sobre fibra monomodo Draka. Las dos modificaciones en el índice de refracción de la fibra están separadas una distancia  $d$ . El láser induce micro curvatura sobre la fibra, lo que a su vez origina el cambio en el índice de refracción local de la fibra.

La primera perturbación acopla parte de la luz guiada por el núcleo de la fibra hacia modos guiados en la cubierta del núcleo, esta luz es reacoplada hacia el núcleo de la fibra por la segunda perturbación ó micro curvatura, donde al mezclarse con la luz guiada por el núcleo, origina el patrón de interferencia observado en la transmitancia.



*Figura 4.41 Interferómetro Fabry-Perot fabricado con dos puntos de irradiación, sobre la fibra óptica, con el láser de CO<sub>2</sub>. Post Doctorado UNICAMP 2010.*

Un láser de CO<sub>2</sub> (SYNRAD) con longitud de onda  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  fue usado para fabricar el sensor. La potencia usada fue de 1.5 Watts y el tiempo de exposición para originar la micro curvatura fue de 300 ms. La figura (4.42) muestra el patrón de interferencia del interferómetro. La distancia de separación entre los puntos irradiados fue de  $d = 4 \text{ cm}$ . La visibilidad de las franjas muestra tener cerca de 10 dB, lo cual es suficiente para su aplicación como sensor de diversos parámetros físico-químicos.



*Figura 4.42 Espectro de trasmisión del interferómetro Fabry-Perot fabricado con dos puntos de irradiación, sobre la fibra óptica, con el láser de CO<sub>2</sub>. Post Doctorado UNICAMP 2010.*

Nosotros usamos este interferómetro como sensor de índice refractivo de distintas sustancias en contacto con la fibra. Nuestros resultados se muestran en las figuras (4.43) y (4.44). Un pico del

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

espectro de interferencia es usado para observar su corrimiento en función del índice de refracción de las sustancias testadas, en nuestro caso: aire, agua, metanol y gasolina pura.

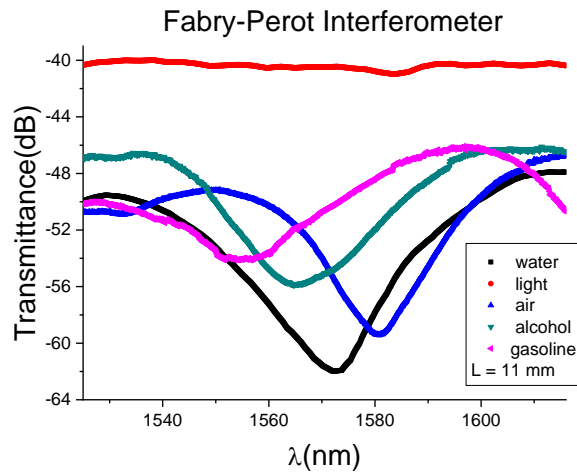


Figura 4.43 Respuesta del interferómetro Fabry-Perot a la variación del índice de refracción que rodea la fibra óptica. Post Doctorado UNICAMP 2010.

La curva de sensibilidad de nuestro dispositivo es mostrada en la figura 3.61, donde ha sido elegido el valle correspondiente a  $\lambda = 1550$  nm, del espectro de interferencia del Fabry-Perot

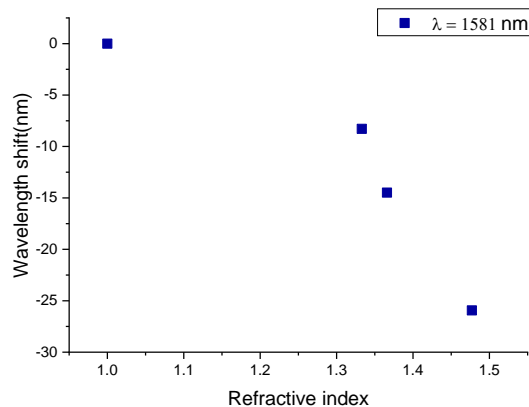


Figura 4.44 Respuesta del interferómetro Fabry-Perot a la variación del índice de refracción que rodea la fibra óptica. Valle correspondiente a la longitud de onda  $\lambda = 1581$  nm. Post Doctorado UNICAMP 2010.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Haiyan Chen. Fiber optic pressure sensor based on a single-mode fiber F–P cavity. *Measurement* 43 (2010) 370–374.
- [2] Jinesh Mathew et al. In-Fibre Fabry-Perot Cavity Sensor for High Temperature Applications. *Journal of Lightwave Technology*. June (2015). DOI: 10.1109/JLT.2015.2397936.
- [3] Peng Chen. Cascaded-Cavity Fabry-Perot Interferometric Gas Pressure Sensor based on Vernier Effect. *Sensors* (2018), 18, 3677; doi:10.3390/s18113677.

### **4.3.2 SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN BASADO EN INTERFERÓMETROS COAXIALES DE MICHELSON GRAVADOS EN FIBRA ÓPTICA PARA LA DETECCIÓN DE ETANOL DISUELTO EN GASOLINA**

#### **RESUMEN**

Se reporta un sensor refractométrico basado en interferómetros inducidos mecánicamente formados con redes de largo período. También se muestran dos configuraciones diferentes basadas en un interferómetro de Michelson y Mach-Zehnder y su aplicación para medir la concentración de etanol en la gasolina.

#### **INTRODUCCIÓN**

En este trabajo, se utilizó un método interferométrico para detectar porcentajes de etanol disuelto en gasolina. Se utilizó el método interferométrico ya que las resonancias de los MLPG son generalmente muy amplias. Aumentamos la resolución de la medición empleando dos configuraciones experimentales: un interferómetro de Michelson y un interferómetro de Mach-Zehnder; los sensores se realizaron y probaron. En ambos casos, los sensores detectaron cambios en el índice de refracción de la mezcla de gasolina y etanol, que se obtiene al variar la concentración de etanol en la mezcla. Los resultados obtenidos mostraron una sensibilidad de 27 pm /% de etanol para la configuración del interferómetro de Michelson y de 25 pm /% de etanol para la configuración de Mach-Zehnder.

La fatiga mecánica no se ha investigado sistemáticamente en este trabajo, pero hemos observado que la presión puede aplicarse a la misma fibra muchas veces sin observar cambios en los espectros de transmisión de la rejilla inducida. está de acuerdo con lo que se informa en las referencias [8,9]. Por lo tanto, con el diseño y el material adecuados para fabricar el dispositivo, esto se puede aplicar en el lugar de trabajo.

#### **INTERFERÓMETRO DE MICHELSON**

Usando una LPG inducida mecánicamente implementamos un sensor de índice refractivo tipo Michelson. El esquema de nuestro dispositivo es mostrado en la figura (4.45). Luz blanca se propaga a lo largo de la fibra hasta llegar a la MLPG con un apropiado valle de resonancia en la transmitancia. La red MLPG acopla el modo fundamental propagándose en el núcleo con los modos co-propagantes de la casca a determinadas longitudes de onda. Un espejo de oro depositado en el extremo de la fibra óptica, por el método de evaporación en vacío, es usado para reflejar la luz guiada por el núcleo y por la casca. La misma MLPG re-acopla la luz reflejada en la casca hacia el núcleo de la fibra, originándose entonces la interferencia entre las ondas luminosas guiadas por el núcleo y la casca, observándose un patrón de interferencia en la transmitancia, cuya forma depende del índice refractivo del medio que rodea la fibra óptica.

Nosotros estudiamos y mostramos la dependencia del espectro de interferencia con la frecuencia espacial de la red, con la presión sobre la red y con la longitud de la cavidad del interferómetro, buscando optimizar la sensibilidad de nuestro sensor.

Debido a que los sensores de fibra óptica son ideales para la detección de sustancias disueltas en combustibles debido a la inexistencia del peligro de chispas originados por dispositivos de corriente eléctrica, nosotros usamos este dispositivo para detectar porcentajes de etanol disuelto en gasolina pura. El sensor detecta los cambios de índice refractivo de la gasolina originados variando la cantidad de etanol disuelto en ella y puesto en contacto con la parte sensora del interferómetro.

Los resultados obtenidos muestran una sensibilidad de 35 pm/porcentaje de etanol disuelto.



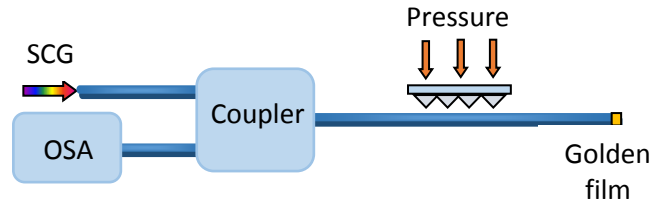


Figura 4.45 Diagrama esquemático del sensor interferométrico MLPG tipo Michelson. Post Doctorado UNICAMP 2010.

El trabajo experimental estuvo dirigido para obtener un dispositivo que opere a la longitud de onda más conveniente, la cual es determinada por la enorme cantidad de componentes en comunicaciones ópticas que trabajan en la banda de 1530 a 1580 nm. Asimismo, para lograr la mayor sensibilidad a variaciones del índice de refracción del medio externo en contacto con la fibra. Un modelo fenomenológico del interferómetro, tomando en cuenta la transmitancia de la LPG, el corrimiento de fase relativo entre las ondas que viajan por el núcleo y por la casca y la densidad de potencia espectral de la luz en la fibra fue usada para estudiar la dependencia del espectro de franjas de interferencia con los diversos parámetros, como carga sobre la red, longitud de la cavidad, índices refractivos del medio externo. El modelo llevó a la siguiente expresión para la reflectancia en función de la longitud de onda  $\lambda$  de la luz:

$$R(\lambda) = 1 - 4T_{co}(\lambda)T_{clad}(\lambda)\text{Sin}^2\left(\frac{2\pi\Delta nL_{cav}}{\lambda} + \theta\right) \quad (4.29)$$

Donde  $T_{co}(\lambda)$  es la transmitancia de la LPG para la luz guiada por el núcleo,  $T_{clad}(\lambda)$  es la transmitancia para la luz guiada por la casca, ambas deducidas desde las ecuaciones (3.2) y (3.3).  $L_{cav}$  es la longitud de la cavidad del interferómetro,  $\Delta n$  es la diferencia entre los índices refractivos del núcleo y de la cubierta del núcleo y  $\theta$  es el corrimiento de fase de acoplamiento en la MLPG.

Para evaluar y calibrar la performance del sensor, incrementamos la carga sobre la red, obteniendo franjas de interferencia con buena visibilidad (figura (4.46)). Asimismo, variamos la longitud de la cavidad sensora, la que se extiende desde el extremo de la LPG hasta el espejo de oro, variando con ello el número de franjas, su ancho espectral y en consecuencia la resolución alcanzable (figura (4.47)).

Una MLPG gravada en fibra Draka, con periodo  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ , y longitud  $L = 20\text{mm}$ , fue usada para originar las franjas de interferencia. La longitud de la cavidad sensora,  $L_{cav} = 73\text{mm}$  fue mantenida constante, incrementándose la carga.

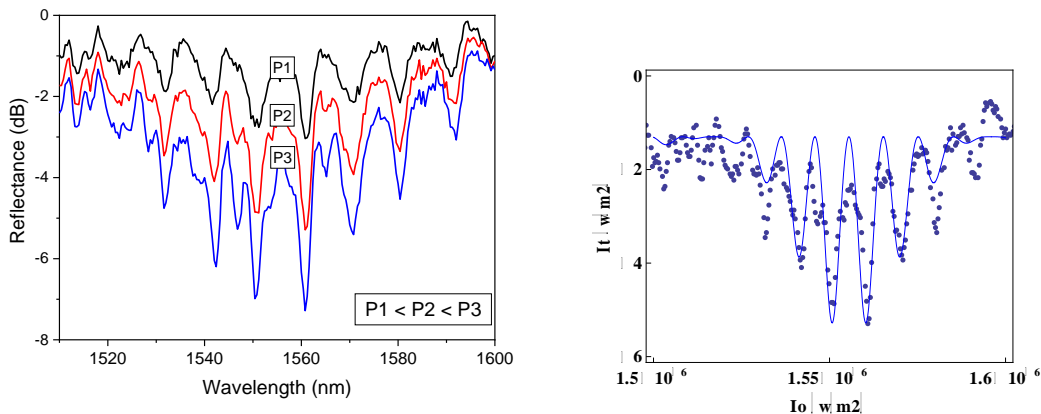


Figura 4.46 MLPG-Michelson interferómetro. Visibilidad de las franjas de interferencia en función de la carga aplicada sobre la red. Post Doctorado UNICAMP 2010.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

La figura (4.47) muestra la dependencia del espectro de interferencia a variaciones de la longitud de la cavidad. El período y longitud de la MLPG usados fueron  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$  y  $L = 20 \text{ mm}$ , respectivamente.

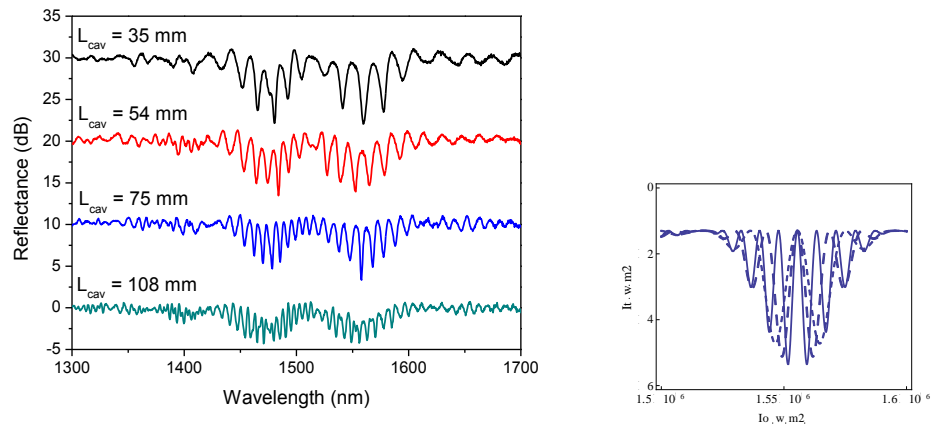


Figura 4.47 MLPG-Michelson interferómetro. Franjas de interferencia en función de la longitud de la cavidad del interferómetro. Post Doctorado UNICAMP 2010.

Una vez optimizado el sensor, nosotros lo usamos para detectar diferentes porcentajes de etanol disueltos en gasolina pura. La figura (4.48) muestra el corrimiento de fase en la señal del interferómetro al sumergir el sensor en la mezcla gasolina-etanol. La sensibilidad del sensor, calculada desde este gráfico fue de  $35 \text{ pm/porcentaje de etanol disuelto en la gasolina pura}$  (figura (4.49)).

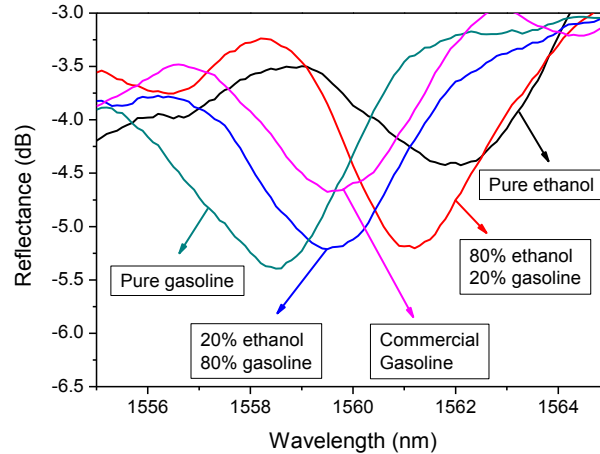


Figura 4.48 Corrimiento espectral de las franjas de interferencia del sensor MLPG-Michelson como una función del porcentaje de etanol disuelto en gasolina pura. MLPG:  $\Lambda=500\mu\text{m}$ ;  $L = 20\text{mm}$ ;  $L_{cav}= 67\text{mm}$ . Post Doctorado UNICAMP 2010.

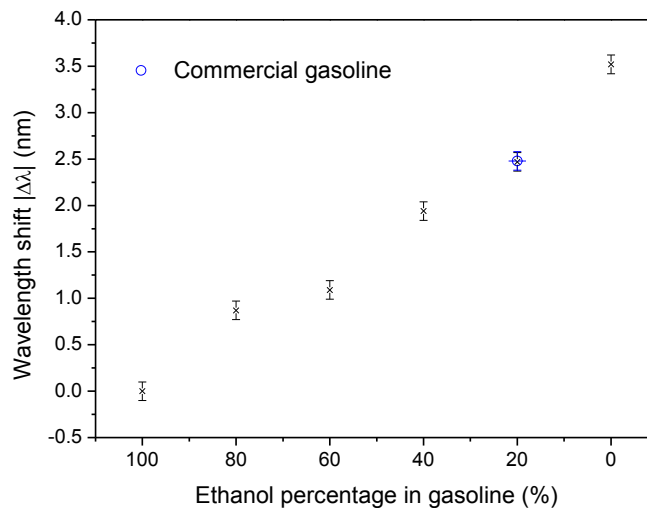


Figura 4.49 MLPG-Michelson interferómetro, curva de sensibilidad. Post Doctorado UNICAMP 2010.

## CONCLUSIONES

En este documento, se informó sobre el desarrollo de rejillas de largo período inducidas mecánicamente (MLPG) y su aplicación como sensores de índice de refracción del medio circundante. Se lograron redes con dips de 17 dB de profundidad.

Se lograron construir dos interferómetros: un interferómetro de Michelson, basado en el uso de un único MLPG y un espejo en el extremo de la fibra; y un interferómetro Mach-Zehnder constituido por dos MLPG en serie. Ambos dispositivos se aplicaron como sensores para detectar los porcentajes de etanol disuelto en la gasolina. La resolución de los interferómetros, determinada por el ancho en la banda de resonancia MLPG, así como por la longitud de la fibra detrás de la red para el caso de la configuración de Michelson y por la distancia entre las redes para el caso de la configuración de Mach-Zehnder, fue suficiente para detectar cambios en porcentajes de etanol en gasolina. La visibilidad de las franjas de interferencia se optimizó fácilmente por la versatilidad de los aparatos para ajustar el acoplamiento entre los modos de núcleo y revestimiento. La sensibilidad alcanzada fue de 27 pm/% de etanol en gasolina (interferómetro de Michelson) y 25 pm /% de etanol en gasolina (interferómetro de Mach-Zehnder).

## PUBLICACIONES

[1] **L. Mosquera**, Jonas H. Osório, Juliano G. Hayashi, Cristiano M.B. Cordeiro. Refractometric sensor based on all-fiber coaxial Michelson and Mach-Zehnder interferometers for ethanol detection in fuel. *Journal of Physics: Conference Series* 274 (2011) 012020.

## REFERENCIAS

- [1] Ashish M V, Lemaire P J, Judkins J B, Bhatia V, Turan E and Sipe J E 1996 *J. Lightwave Tech.* 14 N° 1
- [2] James S W and Tatam RP 2003 *Meas. Sci. Technol.* 14 R49-61
- [3] Chomát M, Berková D, Matejec V, Kasík I, Kanka J, Slavík R, Jancárek A and Bittner P 2006 *Mater. Sci. Eng. C* 26 457-61
- [4] Petrovic J S, Dobb H, Mezentsev V K, Kyriacos K, Webb D J and Bennion I 2007 *J. Lightwave Tech.* 25 N° 5
- [5] Chan H M, Fares A, Tomov I V and Lee H P 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* 20 N° 8

- [6] Dürr F, Rego G, Marques P V S, Semjonov S L, Dianov E M, Limberger H G and Salathé R P 2005 *J. Lightwave Tech.* 23 N° 11
- [7] Smietana M, Bock W J and Mikulic P 2010 *Meas. Sci. Technol.* 21
- [8] Savin S, Digonnet M J F, Kino G S and Shaw H J 2000 *Optic. Lett.* 25 N° 10
- [9] Xiaojun Z, Chen C, Zhang Z, Qin Z and Liu Y 2009 *14th OptoElectronics and Communications Conf. OECC* art. N° 5218070
- [10] Swart P L 2004 *Meas. Sci. Technol.* 15 1576-80
- [11] Barrios P, Sáez R D, Rodríguez A, Cruz J L, Díez A and Andrés M V 2009 *J. Sensors* ID 815409
- [12] Liu Y, Williams J A R, Zhang L and Bennion I 1999 *Opt. Commun.* 164 27-31
- [13] Wei T, Lan X and Xiao H 2009 *IEEE Photon. Technol. Lett.* 21 N° 10 669-71
- [14] Young-Geun H, Lee B H, Won-Taek H, Paek U C and Chung Y 2001 *Meas. Sci. Technol.* 12 778-81
- [15] Falate R, Kamikawachi R C, Fabris J L, Müller M, Kalinowski H J, Ferri F A S, and Czelusniak L K 2003 *Proc. Microwave and Optoelectronics Conference (20-23 Sept 2003)* vol. 2 pp 907-10

### 4.3.3 SENSOR LPG MACH – ZEHNDER APLICADO AL ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN DE COMBUSTIBLE EN TIEMPO REAL

#### RESUMEN

Un sensor de índice de refracción de alta sensibilidad basado en la combinación de redes LPGs inducidas mecánicamente y fibra adelgazada es aplicado al análisis de la composición de un combustible basado en la mezcla de etanol con gasolina. El sensor se diseñó en una configuración interferométrica de Mach – Zehnder constituida por dos redes LPG dispuestas en serie a lo largo de una fibra óptica monomodo comercial. Para mejorar la sensibilidad del sensor, el diámetro de la fibra óptica comprendida entre las dos redes LPGs fue adelgazada de 125µm a 10 µm. El sistema fue probado midiendo la concentración de agua disuelta en etanol y la concentración de etanol disuelta en gasolina comercial. El sensor mostró una sensibilidad promedio de 930 nm/RIU, 18 veces más alta que la versión con fibra no adelgazada. El límite de la resolución del sistema se estimó en un 0,06% de etanol disuelto en gasolina. Para fines de monitoreo en tiempo real, el sistema de interrogación se diseñó basado en interferometría de luz blanca. El sensor diseñado nos permitió registrar la evolución de la concentración de etanol en el agua con una resolución del 0,005% (v / v).

#### INTRODUCCIÓN

La gasolina es una mezcla compleja de hidrocarburos líquidos derivados a partir del petróleo, volátil e inflamable, con propiedades físicas y químicas que permiten su aplicabilidad en el campo de los combustibles, especialmente como combustible para la combustión interna. La composición exacta de la gasolina varía con las características de la materia prima, su proceso de producción y las especificaciones impuestas por los organismos reguladores. En Brasil, de acuerdo con las leyes gubernamentales distribuidas y la gasolina comercializada contiene etanol anhidro, con un porcentaje de volumen entre el 20% y el 25%. La mezcla etanol – gasolina tiene algunas ventajas sobre la gasolina pura. Por ejemplo, la inclusión de etanol mejora la eficiencia termodinámica del producto proporcionando un mejor rendimiento para motores de combustión. Además, la combustión de la mezcla etanol - gasolina proporciona una reducción significativa en la emisión de contaminantes del aire. Finalmente, un dato relevante es que el etanol se deriva de la biomasa fermentada, un recurso natural renovable [1, 2].

Sin embargo, uno de los mayores problemas con esta práctica es que el sector tiene que lidiar con la adulteración del combustible. Una mala práctica común es aumentar la concentración del disolvente y / o etanol en proporciones superiores a las declaradas por la legislación. El monitoreo de la calidad del combustible requiere la aplicación de una rigurosa técnica de muestreo en conjunto con varios y costosos análisis de las propiedades físicas y químicas del combustible. Por otro lado, el uso de fuentes de energías alternativas y renovables han llamado mucho la atención en los últimos años [1, 2].

En este contexto, el etanol es uno de las alternativas más comunes. Mientras que el etanol puede considerarse un compuesto ecológico, es un disolvente versátil miscible en todas las proporciones con agua. En consecuencia, operando un motor con un combustible de etanol con un alto porcentaje de agua o con una mezcla de gasolina con contenido de alcohol hidratado demasiado alto puede causar daños al motor y un bajo rendimiento, con posibles consecuencias para el medio ambiente. Por lo tanto, un cuidadoso monitoreo del contenido de agua en etanol combustible es necesario para evitar estos problemas. En este contexto, el desarrollo de sistemas de monitorización inteligentes capaces de evaluar la conformidad del combustible suministrando resultados confiables en tiempo real supone una gran importancia [1, 2].

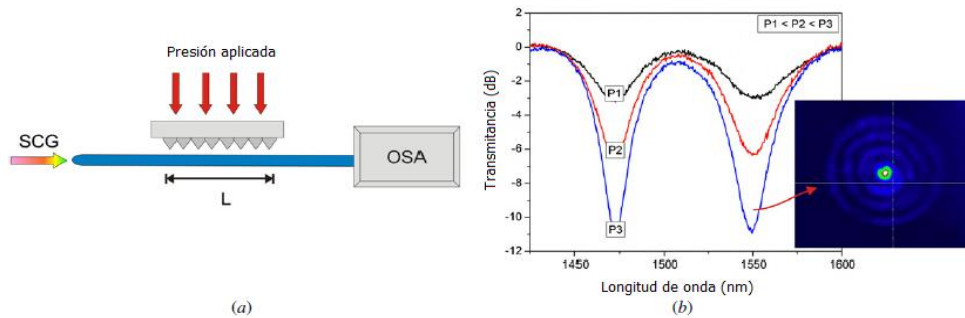
Los sensores de fibra óptica son una solución interesante en este contexto debido a su alta sensibilidad, pequeño tamaño, inmunidad electromagnética, pasividad eléctrica, reactividad no química y capacidad para la detección in situ, en tiempo real y remota. Sensores basados en redes de periodo largo (LPG), en particular, pueden usarse como sensores de índice refractivo, siendo de utilidad para tales fines.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

En este trabajo, se propone una solución versátil utilizando interferómetros basados en MLPG. Diferentes configuraciones son estudiadas incluyendo el caso de una fibra con diámetro reducido para aumentar la sensibilidad del sistema. Para monitoreo de alta sensibilidad en tiempo real, se evaluó utilizando interferometría de luz blanca con instrumentación virtual en una configuración diferencial.

##### REDES LPG INDUCIDAS MECÁNICAMENTE

Redes LPG fueron inducidas mecánicamente en fibra óptica monomodo comercial. La figura (4.50a) muestra la configuración experimental utilizada para producir las redes LPG mecánicas MLPG donde una pieza de acrílico ranurado en forma de V fue utilizado para presionar la fibra e inducir las redes LPG. Espectros de transmisión MLPG se midieron usando luz de banda ancha (supercontinuo generado en una fibra de cristal fotónico) en la fibra y conectando el extremo de salida de la fibra a un analizador de espectro óptico (OSA Ando AQ-6315).



*Fig. 4.50 (a) Configuración experimental para la fabricación de MLPG. SCG: generación de supercontinuo en fibra PCF, L: longitud de rejilla. (b) Espectro de transmisión MPLG en función de la presión aplicada ( $L = 20$  mm;  $A = 500$   $\mu$ m). En el recuadro se muestra la imagen de campo cercano del modo de revestimiento en  $\lambda = 1549$  nm. Post Doctorado UNICAMP 2014.*

La Figura (4.50b) muestra el espectro de transmisión de una red MLPG de 20 mm de largo y 500  $\mu$ m de periodo, primero se obtiene el espectro de salida de la fibra sin la red; después de inducir la red mecánica LPG se vuelve a medir el espectro de salida de la fibra y luego se restan las dos curvas. Los mínimos en la transmitancia, observadas a 1473nm y 1549 nm corresponden a las resonancias de los modos guiados por el revestimiento del núcleo de la fibra óptica. Condiciones de coincidencia de fase entre el modo fundamental guiado por el núcleo y los modos del revestimiento se logran a longitudes de onda  $\lambda_n$  que satisfacen la siguiente ecuación [3]:

$$\lambda_n = (n_{co}^{01} - n_{clad}^{0n})\Lambda$$

donde  $n_{co}^{01}$  es el índice de refracción efectivo del modo fundamental guiado por el núcleo de la fibra óptica,  $n_{clad}^{0n}$  es el índice de refracción efectivo del modo de orden n guiado por el revestimiento del núcleo de la fibra y  $\Lambda$  es el período de la red LPG (distancia entre los puntos que presurizan la fibra). Se puede observar que los modos de revestimiento acoplados tienen orden azimutal cero ( $l = 0$ ). Esto sucede porque el acoplamiento debe ocurrir entre modos que resultan en una integral de superposición no nula. Así, los modos de revestimiento acoplados deben tener la luz en la región central de la fibra, lo que es una característica de los modos para  $l = 0$ .

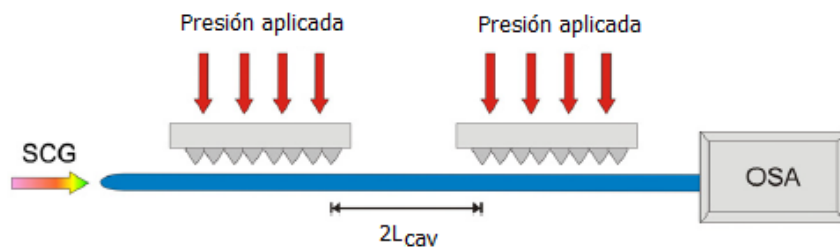
La Figura (4.50b) asimismo presenta la dependencia del espectro de transmisión MLPG con la presión aplicada sobre la fibra. Se puede observar que, al incrementar la presión sobre la fibra, la pérdida de transmisión aumenta a aproximadamente 11 dB. La profundidad de la atenuación depende de un seno cuadrado que tiene el coeficiente de acoplamiento como su argumento. Así, si la presión aplicada es lo suficientemente alta, la profundidad de la resonancia aumenta a un valor máximo y luego disminuye, lo que significa que el modo está siendo reacoplado al núcleo.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

Los modos de revestimiento acoplado fueron identificados analizando la imagen del espectro de transmitancia de la fibra. Un láser sintonizable fue utilizado para acoplar la luz en el modo fundamental guiado por el núcleo y, sintonizando la longitud de onda del láser, un modo de revestimiento fue excitado selectivamente y la luz transmitida por la fibra fue proyectada en una cámara infrarroja (Micron Viewer) utilizando la técnica de campo cercano. El recuadro de la figura (4.50b) muestra el patrón de salida de campo cercano obtenido por el modo excitado LP<sub>06</sub>.

#### CARACTERIZACIÓN DEL INTERFERÓMETRO.

Se implementó un interferómetro Mach-Zehnder de fibra total (MZI) basado en un par de MLPG en serie (figura (4.51)). En esta configuración, una fracción de la potencia en el modo de núcleo se transfiere a los modos de revestimiento por la primera red MLPG. En la región entre las dos MLPGs, la luz se propaga a través del núcleo y del revestimiento simultáneamente. En secuencia, la segunda red MLPG induce el acoplamiento entre los modos del revestimiento y el modo guiado por el núcleo y aparece un patrón de franja espectral en el espectro de transmisión.



*Figura 4.51. Diagrama esquemático del interferómetro MLPG Mach – Zehnder. Post Doctorado UNICAMP 2010.*

También estudiamos las características del corrimiento de fase de esta cascada de MLPGs cuya transmitancia es descrita por la expresión:

$$T = \left| e^{j \left[ \frac{2\pi(n_{\text{core}}^{\text{eff}} - n_{\text{clad}}^{\text{eff}})d}{\lambda} + \phi \right]} t_1 t_2 + r_1 r_2 \right|^2 \quad (4.30)$$

donde  $r_i$  and  $t_i$  describen la reflectancia y transmitancia de las redes MLPGs y donde  $d$  es la distancia entre las redes.

El interferómetro se configuró empleando un par de MLPG con períodos  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$  y longitud  $L = 20 \text{ mm}$ , separados una distancia de  $40 \text{ mm}$ . La figura (4.52) muestra la transmisión de las redes LPG. El recuadro en la figura (4.52) muestra una simulación del espectro de transmisión del interferómetro usando  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$ ;  $\Delta n_1 = 2.955 \times 10^{-3}$ ;  $\Delta n_2 = 3.080 \times 10^{-3}$ ;  $L_1 = 19 \text{ mm}$ ;  $L_2 = 19 \text{ mm}$  y  $2L_{\text{CAV}} = 40 \text{ mm}$ . Las diferencias de índice  $\Delta n_1$  y  $\Delta n_2$  fueron simulados con valores cercanos a los esperados de la ecuación (4.30), utilizando  $\lambda = 1473 \text{ nm}$  y  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$  para obtener el mejor ajuste con los datos experimentales.

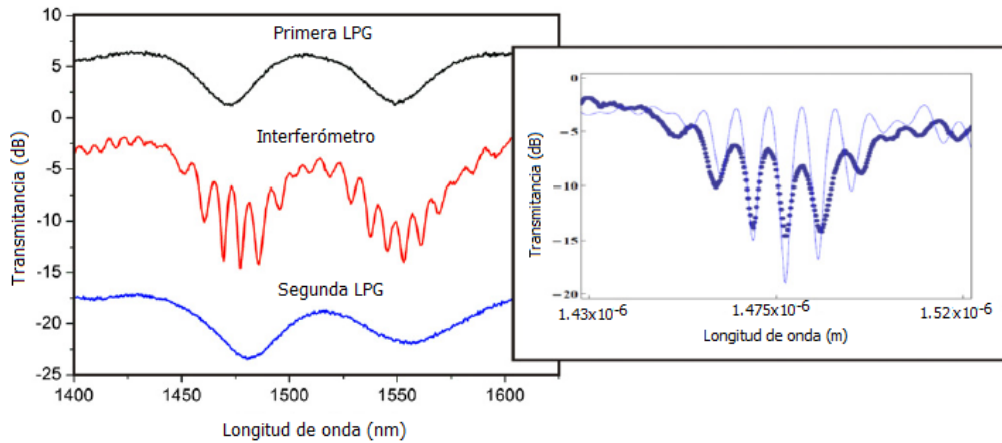


Figura 4.52 Se muestran los espectros individuales de las redes MLPG y el espectro de transmisión de las redes asociadas en serie. El recuadro muestra una simulación (línea continua) para el espectro de transmisión del interferómetro Mach Zehnder usando los siguientes parámetros:  $A = 500 \mu\text{m}$ ;  $\Delta n_1 = 2.955 \times 10^{-3}$ ;  $\Delta n_2 = 3.080 \times 10^{-3}$ ;  $L_1 = 19 \text{ mm}$ ;  $L_2 = 19 \text{ mm}$  y  $2 L_{\text{cav}} = 40 \text{ mm}$ . Los datos experimentales fueron incluidos para comparación. Post Doctorado UNICAMP 2010.

En esta configuración de las MLPG, la separación entre las redes ( $2 L_{\text{cav}}$ ) determina el número de franjas interferométricas en el espectro de transmisión, es decir, el aumento de la separación entre las redes hace que las franjas estén espectralmente más cercanas.

Los datos experimentales mostraron que para  $L_{\text{cav}} = 35 \text{ mm}$ , las franjas tenían una separación de  $17 \text{ nm}$  y para  $L_{\text{cav}} = 108 \text{ mm}$ , una separación de  $7 \text{ nm}$ . Teniendo en cuenta esto, la elección de la longitud de la cavidad debe considerar el rango dinámico de medición (es decir, el intervalo de índice de refracción a evaluar) además de la resolución de la medida.

La configuración presentada tiene la gran ventaja de ser muy simple y barata porque emplea fibras ópticas de telecomunicaciones y placa metálica o acrílica corrugada fácilmente mecanizables, determinando la posibilidad de sintonizar la respuesta espectral ajustando la presión aplicada, tamaño, periodo de la red y longitud de la cavidad del interferómetro. Sin embargo, la sensibilidad de tales dispositivos al índice de refracción externa, que depende en gran medida del orden de modo y del índice de refracción externo, suele ser bajo, típicamente del orden de  $30 \text{ nm/RIU}$  para cambios en el índice de refracción alrededor de  $1.33$  [13] y  $230 \text{ nm/RIU}$  para cambios en el índice de refracción alrededor  $1,42$  [19].

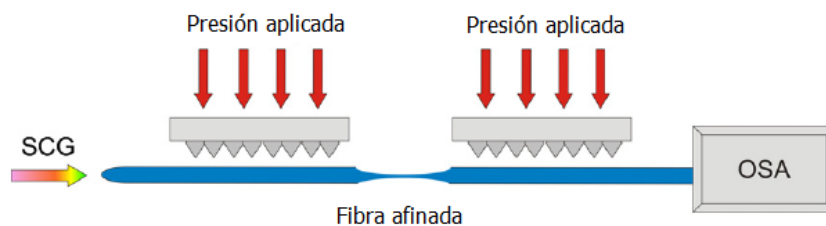


Figura 4.53 Diagrama esquemático del sensor interferométrico MLPG Mach – Zehnder con fibra adelgazada entre las redes MLPGs. Post Doctorado UNICAMP 2010.

Para mejorar dicha sensibilidad, la fibra en la región entre las redes MLPGs se puede afinar como se muestra en la figura (4.53). En este caso, a medida que el estrechamiento de la fibra provoca que una mayor fracción del campo del modo de revestimiento se extienda más allá de la interfaz de fibra (es decir, en el medio), un aumento expresivo en la sensibilidad del sensor



puede ser observado. Una sensibilidad de aproximadamente 172 nm/RIU se logró para el cambio del índice de refracción entre 1.3333 y 1.3624.

Aquí, una región afinada de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro fue utilizada, lo que nos permitió obtener una sensibilidad cercana a 4 veces mayor (695 nm/RIU) para cambios del índice de refracción alrededor de 1.333.

#### APLICACIÓN: SENSORES PARA ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN DE COMBUSTIBLE

Como los dispositivos de fibra óptica presentan un funcionamiento pasivo, pueden ser útiles para determinar la calidad del combustible (detección de adulteración, por ejemplo). Así, en esta investigación, se realizaron experimentos de medición de concentración de agua en etanol y concentración de etanol en gasolina comercial.

La Figura (4.54a) muestra la respuesta del sensor de agua-etanol. Las MLPGs utilizadas tenían 600  $\mu\text{m}$  de paso, 20 mm de largo y estaban 175 mm distantes entre sí. Se evidencia el funcionamiento del sensor por el desplazamiento espectral de las franjas interferométricas cuando el estrechamiento región (15 mm de largo y 10  $\mu\text{m}$  de espesor) se sumergió en soluciones de agua-etanol con diferentes concentraciones. Se Observó que a medida que aumentaba el índice de refracción de las mezclas, las longitudes de onda correspondientes a los mínimos del espectro de transmitancia se desplazaban a la región de longitudes de onda más bajas. A partir de los datos obtenidos, se puede trazar la longitud de onda marginal como una función del índice de la mezcla refractiva (figura (4.54b)). Una sensibilidad de 695 nm/RIU puede entonces ser calculado. Este valor es aproximadamente cuatro veces mayor en relación con los datos reportados en [13].

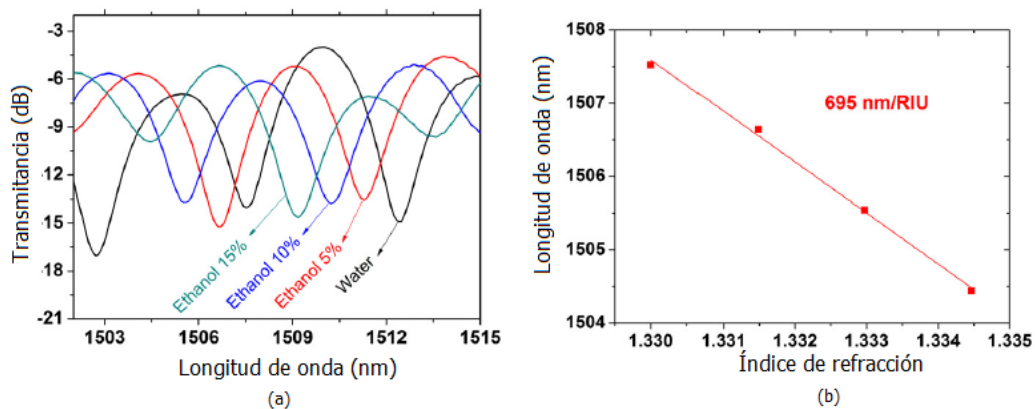


Figura 4.54 (a) Respuesta del sensor de agua-etanol. Se utilizó la configuración de la figura (4.54). Las redes MLPGs tenían 600  $\mu\text{m}$  de paso y 20 mm de largo. Las redes fueron separadas por 175 mm. (b) Longitud de onda de la franja en función del índice de refracción circundante. Una sensibilidad de 695 nm/RIU fue alcanzada. Estancia Posdoctoral Unicamp/Brasil 2010.

Además, la concentración de etanol en la gasolina comercial fue evaluado. La figura (4.55 a) muestra la respuesta del interferómetro cuando actúa como un sensor de gasolina de etanol. Redes MLPGs con un  $\Lambda= 600$  nm y 20 mm de largo. La distancia entre las MLPG fue de 410 mm para obtener un gran número de picos interferométricos y, consecuentemente un ancho de pico de  $\Delta\lambda= 1$  nm. La Figura (4.55b) muestra el desplazamiento espectral de las franjas como una función del índice de refracción de la solución. Este procedimiento demostró la versatilidad del sistema que permite el ajuste sencillo de las características del sensor mediante ajuste mecánico simple.

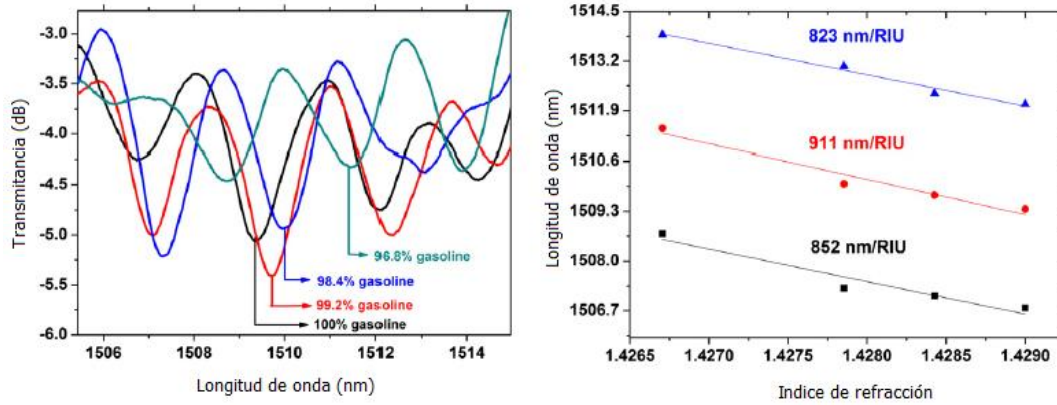


Figura 4.55 (a) Desplazamiento espectral de las franjas interferométricas. MLPGs:  $A = 600 \mu\text{m}$ ;  $L = 20 \text{ mm}$ ;  $2L_{\text{cav}} = 410 \text{ mm}$ . (b) Longitud de onda de los mínimos de las franjas de interferencia como función del índice de refracción asociado con el porcentaje de etanol disuelto en gasolina comercial. Estancia Posdoctoral Unicamp/Brasil 2010.

Observamos que, al aumentar el índice de refracción de las mezclas, los mínimos de transmitancia se desplazaron hacia longitudes de onda más bajas. Por ejemplo, la franja centrada en 1511.46 nm cambió a 1509.38 nm cuando el índice de refracción cambió de 1.422 a 1.424.

El índice de refracción de las mezclas ( $n$ ) de dos líquidos con los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$  se estimaron mediante la ecuación (4.31).

$\varphi$  en la ecuación (4.32) significa la concentración en volumen de líquido con índice de refracción  $n_1$  [20]:

$$n = \sqrt{\frac{2g+1}{1-g}} \quad (4.31)$$

Donde,

$$g = \left(\frac{n_2^2-1}{n_1^2+2}\right)\varphi + \left(\frac{n_1^2-1}{n_2^2+2}\right)(1-\varphi) \quad (4.32)$$

Los índices de refracción utilizados fueron 1.333 para el agua, 1.359 para el agua-etanol [21] y 1.424 para gasolina comercial brasileña [19] —todos ellos a 589 nm. Considerando todos los mínimos de transmitancia presentados en la figura (4.56a), la sensibilidad promedio del sensor fue de 930 nm/RIU. En términos de concentración de etanol. La sensibilidad se puede calcular como 0,62 nm /% de etanol disuelto en gasolina, una sensibilidad 18 veces mayor en comparación con 0,035 nm /% de etanol obtenido sin la región afinada (utilizando la configuración referenciada en la figura (4.51)).

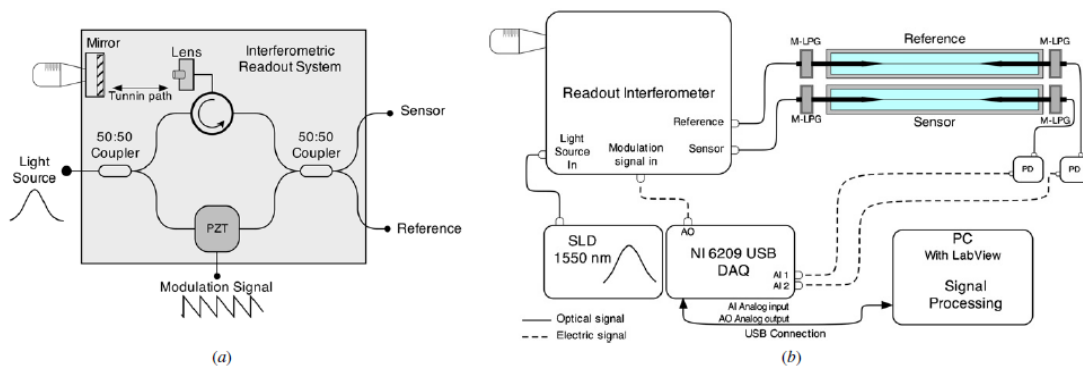
Además, esta sensibilidad es cuatro veces mayor en comparación con 0.15 nm /% de etanol reportado en [19]. Asimismo, la sensibilidad alcanzada es 50% mayor en comparación con el sensor reportado en [22], donde los autores probaron un sensor de índice de refracción basado en redes de Bragg inscritas en las microfibras. Usando el FWHM citado arriba ( $\Delta n = 1 \text{ nm}$ ), se pudo estimar un límite de resolución estimado para nuestro sistema de 0.06% de etanol (considerando que uno puede resolver dos mínimos de transmitancia si están al menos a una diferencia de longitud de onda de  $\Delta\lambda/25 = 0.04 \text{ nm}$ ). Por otra parte, si utilizamos un analizador de espectro óptico con resolución de 10 pm, en términos de índice de refracción, se puede lograr una resolución de  $1.08 \times 10^{-5}$ , un valor que tiene el mismo orden de magnitud que la resolución reportada en [23], donde los autores estudiaron un sensor de índice de refracción basado en la reflexión de Fresnel.

Debemos observar, sin embargo, que este sensor solo puede detectar adulteración si los agentes de manipulación tienen diferentes índices de refracción que la gasolina. Aun así, como el etanol y el querosene, tienen considerablemente diferentes índices de refracción que la gasolina: 1.359 [21] y 1.436 [24], respectivamente, evaluamos que el sensor propuesto sería de utilidad.

**MEDICIÓN DE CONCENTRACIÓN EN TIEMPO REAL CON SISTEMA DE INTERROGACIÓN WLI**

En un contexto operacional, el uso de un espectro óptico no es práctico. Para evitar la adquisición espectral, la técnica WLI se utilizó para la interrogación de sensores en tiempo real. Este método proporcionó un sistema de interrogación que permitió el seguimiento del desplazamiento de la longitud de onda de las franjas en la forma de desplazamiento de fase de una señal portadora electrónica. La Figura (4.56a) muestra la configuración del sistema WLI basada en un MZI estándar de fibra óptica. En uno de los brazos del MZI, un modulador de fase piezoeléctrico (PZT de Optiphase) fue insertado para generación de portadoras mediante modulación de fase periódica. En el otro brazo, a través de un circulador, una trayectoria de aire fue implementado utilizando una lente GRIN y un espejo montado en un sistema de traslación. Este arreglo permitió ajustar el desequilibrio de la trayectoria en los brazos del interferómetro y también modular su fase como se desee. Una modulación en diente de sierra con su amplitud ajustada para obtener una excursión de fase  $2\pi$  se usó produciendo una generación sinusoidal de portadoras a la salida del interferómetro [25].

Con el fin de evaluar la respuesta del sensor desarrollado a los índices de refracción alrededor de 1.33, se evaluó la evaporación del etanol en función del tiempo. La figura (4.56b) muestra la configuración experimental empleada para la medición diferencial del índice de refracción. Se iluminó el interferómetro de lectura con una fuente SLED (diodo emisor de luz super,  $\Delta\lambda \sim 120$  nm y  $L_{\text{coherencia}} \sim 10$   $\mu\text{m}$ ). Una señal de modulación de sierra (1 kHz) con amplitud 4 V generada por un tablero de adquisición de señal (DAQ NI 6259 USB) fue aplicada.

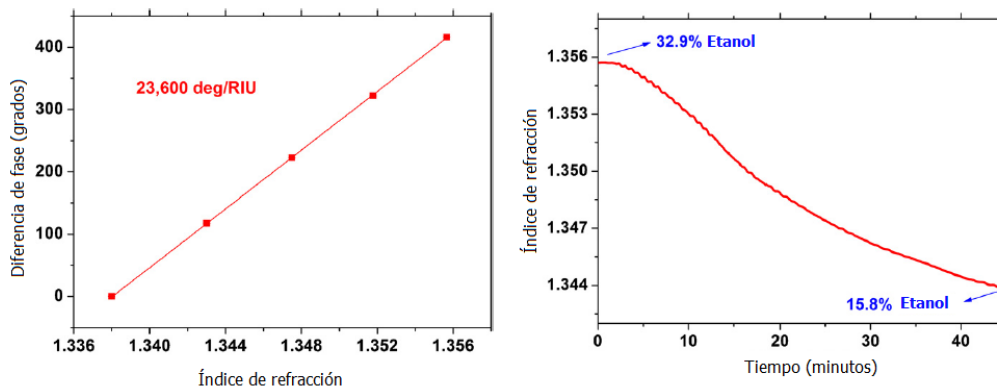


*Figura 4.56. (a) Dispositivo de interrogación para lectura del interferómetro. (b) Configuración para la medición de lectura diferencial del índice de refracción utilizando interferometría MZI y redes mecánicas MLPG. Estancia Posdoctoral Unicamp/Brasil 2010.*

Los dos puertos de salida del interferómetro se utilizaron para interrogar los dos MLPG idénticas. Para sintonizar el interferómetro, se ajustó el camino de los sensores. En esta situación, la fase de la señal portadora de salida fue proporcional al desplazamiento de la longitud de onda de las franjas de interferencia. Usando uno de los interferómetros como referencia y el otro como sensor, obtuvimos la configuración en la que perturbaciones del medio ambiente que afectaban la fase de ambas señales fueron canceladas por sustracción de fase. Por lo tanto, la diferencia de fase entre las dos señales pasó a depender solamente de la modulación inferida por el parámetro de interés permitiendo una medición muy estable y precisa, recuperada utilizando software de comparación de fase [25, 26].

La respuesta del interferómetro a la RI circundante fue estudiada al exponer el sensor a diferentes soluciones de agua destilada, mezclado con diferentes concentraciones de etanol para proporcionar los RI estándares en un rango entre 1.338 y 1.356. La curva de calibración obtenida se representa en la figura (4.57a). Los resultados muestran, como se esperaba, un incremento en la diferencia de fase con el aumento del índice de refracción circundante. Desde la curva de calibración, una sensibilidad de 23 600 grados/RIU fue estimada. El límite de detección se pudo estimar en  $2\sigma$ , donde  $\sigma$  es la desviación estándar más alta considerando todos los puntos de calibración, dividido por la sensibilidad. Así, una resolución media de  $1.5 \times 10^{-5}$  fue calculada, lo cual estuvo cercano al valor de  $1.4 \times 10^{-5}$  obtenida en la medida espectral (estimada asumiendo una resolución de 10 pm y una sensibilidad de 685 nm/RIU obtenida en el experimento previo el agua-etanol).

Sin embargo, cabe mencionar que la resolución con la que se puede rastrear el desplazamiento de las franjas es dada por la máxima resolución del instrumento espectral. La relación señal ruido y un reducido período de las franjas de interferencia a menudo resultan en una resolución degradada. En el caso particular de este sistema interferométrico, con una estabilidad de fase de  $2\sigma = 0.2$  grados, este no fue totalmente optimizado. Mejorando el aislamiento térmico y acústico e introduciendo control de polarización, la resolución puede aumentar en al menos un orden de magnitud.



*Figura 4.57 (a) Curva de calibración diferencia de fase versus valores del índice de refracción. (b) Medición de la evaporación del etanol. Estancia Posdoctoral Unicamp/Brasil 2010.*

La Figura (4.57b) muestra la respuesta del sistema en tiempo real en una medida en la que se observó la rapidez de evaporación del etanol. Para ello, se utilizó una mezcla de agua-etanol, sumergiendo la región afinada de la fibra en la mezcla, midiéndose la diferencia de fase en función del tiempo. El índice de refracción de la mezcla se obtuvo directamente por la diferencia de fase (utilizando la curva de calibración). Tras obtener el índice de refracción de la mezcla, las ecuaciones (4.31) y (4.32) se pueden utilizar para obtener la correspondiente concentración de etanol en agua. Así, observamos que, después de 45 min, la concentración de etanol en la cámara disminuyó de 32.9% a 15.8%. De los resultados obtenidos, se estimó que la concentración de etanol podría rastrearse con una resolución tan alta como 0.005% v/v, demostrando capacidad para la evaluación de combustible en tiempo real con muy alta resolución.

#### PUBLICACIONES

[1] Jonas H Osório, **L Mosquera**, et all. High sensitivity LPG Mach–Zehnder sensor for real-time fuel conformity analysis. Meas. Sci. Technol. 24 (2013) 015102.

REFERENCIAS

- [1] Kawano M S, Heidemann B R, Cardoso T K M, Possetti G R C, Kamikawachi R C, Muller M and Fabris J L 2012 Tailoring fiber grating sensors for assessment of highly refractive fuels Appl. Opt. 51 2015–22
- [2] Possetti G R C, Cocco L C, Yamamoto C I, De Arruda L V R, Falate R, Muller M and Fabris J L 2009 Application of a long-period fibre grating-based transducer in the fuel industry Meas. Sci. Technol. 20 034012
- [3] Vengsarkar A M, Lemaire P J, Judkins J B, Bhatia V, Erdogan T and Sipe J E 1996 Long-period fiber gratings as band-rejection filters J. Lightwave Technol. 14 58–65
- [4] Stegall D B and Erdogan T 2000 Dispersion control with use of long-period fiber gratings J. Opt. Soc. Am. A 17 304–12
- [5] Beltrán-Mejía F, Cordeiro C M B, Andrés P and Silvestre E 2012 Broadband dispersion compensation using inner cladding modes in photonic crystal fibers Opt. Express 20 3467–72
- [6] James S W and Tatam R P 2003 Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application Meas. Sci. Technol. 14 R49–61
- [7] Chan H M, Alhassen F, Tomov I V and Lee H P 2008 Fabrication and mode identification of compact long-period gratings written by CO<sub>2</sub> laser IEEE Photon. Technol. Lett. 20 611–3 7 Meas. Sci. Technol. 24 (2013) 015102 J H Osório et al
- [8] Smietana M, Bock W J and Mikulic P 2010 Comparative study of long-period gratings written in a boron co-doped fiber by an electric arc and UV irradiation Meas. Sci. Technol. 21 025309
- [9] Savin S, Digonnet M J F, Kino G S and Shaw H J 2000 Tunable mechanically induced long-period fiber grating Opt. Lett. 25 710–2
- [10] Lim J, Lee K S, Kim J C and Lee B H 2004 Tunable fiber gratings fabricated in photonic crystal fiber by use of mechanical pressure Opt. Lett. 29 331–3
- [11] Cárdenas-Sevilla G A, Monzón-Hernández D, Torres-Gómez I and Martínez-Ríos A 2009 Mechanically induced long-period fiber gratings on tapered fibers Opt. Commun. 282 2823–6
- [12] Dianov E M, Vasiliev S A, Kurkov A S, Medvedkov O I and Protopopov V N 1996 In-fiber Mach-Zehnder interferometer based on a pair of long-period gratings ECOC'96: 22<sup>nd</sup> European Conf. on Optical Communication (Oslo, Norway) vol 1 pp 65–8
- [13] Ding J-F, Zhang A P, Shao L-Y, Yan J-H and He S 2005 Fiber-taper seeded long-period grating pair as a highly sensitive refractive-index sensor IEEE Photon. Technol. Lett. 17 1247–9
- [14] Cárdenas-Sevilla G A, Monzón-Hernández D, Torres-Gómez I and Martínez-Ríos A 2012 Tapered Mach-Zehnder interferometer based on two mechanically induced long-period gratings as refractive index sensor Opt. Laser Technol. 44 1516–20
- [15] Lee B H and Nishii J 1998 Self-interference of long-period fibre grating and its application as temperature sensor Electron. Lett. 34 2059–60
- [16] Swart P L 2004 Long-period grating Michelson refractometric sensor Meas. Sci. Technol. 15 1576–80
- [17] Barrios P, Sáez-Rodríguez D, Rodríguez A, Cruz J L, Díez A and Andrés M V 2009 Fiber-optic aqueous dipping sensor based on coaxial Michelson modal interferometers J. Sensors 20091–4
- [18] Kim D W, Zhang Y, Cooper K L and Wang A 2006 Fibre-optic interferometric immune sensor using long period grating Electron. Lett. 42 324–5

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

- [19] Falate R, Kamikawachi R C, Müller M, Kalinowski H J and Fabris J L 2005 Fiber optic sensors for hydrocarbon detection *Sensors Actuators B* 105 430–6
- [20] Heller W 1965 Remarks on refractive index mixtures rules *J. Phys. Chem.* 69 1123–9
- [21] Weast R C and Astle M J 1979 *Handbook of Chemistry and Physics* 59th edn (Boca Raton, FL: CRC Press)
- [22] Ran Y, Tan Y-N, Sun L-P, Gao S, Li J, Jin L and Guan B-Ou 2011 193 nm eximer laser inscribed Bragg gratings in microfibers for refractive index sensing *Opt. Express* 19 18577–83
- [23] Kim C-B and Su C B 2004 Measurement of the refractive index of liquids at 1.3 and 1.5 micron using a fibre optic Fresnel ratio meter *Meas. Sci. Technol.* 15 1683–6
- [24] Roy S 1999 Fiber optic sensor for determining adulteration of petrol and diesel by kerosene *Sensors Actuators B* 55 212–6
- [25] Rao Y J and Jackson D A 1996 Recent progress in fibre optic low-coherence interferometry *Meas. Sci. Technol.* 7 981–99
- [26] Kersey A and Berkoff T A 1992 Fiber-optic Bragg-grating differential-temperature sensor *Photon. Technol. Lett.* 4 1183–58

#### 4.3.4 REFRACTÓMETRO FABRY-PEROT ASISTIDO POR UNA RED LPG

##### RESUMEN

Presentamos un refractómetro de fibra óptica basado en un interferómetro de Fabry Perot definido por dos redes de Bragg y una red LPG intracavidad de período largo que hace que la luz confinada en el resonador interactúe con el medio circundante. El índice de refracción externo es monitoreado por las frecuencias resonantes del interferómetro de Fabry Perot, que se puede medir en transmisión o en reflexión. Con este dispositivo, los cambios de longitud de onda son medidos con una resolución de 0.1 pm permitiendo establecer un límite de detección de índice de  $2.1 \cdot 10^{-5}$ .

##### INTRODUCCION

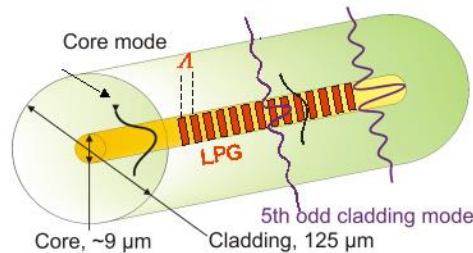
La característica de las redes de periodo largo (LPGs) grabadas en fibra óptica de acoplar los modos en que la luz viaja por el núcleo de la fibra con los modos en que la luz viaja por la capa que recubre el núcleo, para determinadas longitudes de onda, originando uno o más mínimos en el espectro de trasmisión del núcleo de la fibra, ha motivado en los años recientes un fuerte interés en el uso de estas redes como sensores químicos [1-4] debido a su sensibilidad a cambios en el índice refractivo del medio en contacto con la fibra.

La sensibilidad de la LPG se origina del hecho de que el índice refractivo efectivo de un modo en que la luz viaja por el recubrimiento del núcleo (cladding) es dependiente del índice refractivo del medio que lo rodea. Muchas aplicaciones de estos dispositivos de fibra óptica en detección de sustancias químicas y biológicas ya han sido reportadas por investigadores [5-6].

El sensor construido y reportado en este informe se basa en el diseño de una nueva cavidad resonante grabada en fibra óptica y que es la combinación de una red LPG y dos redes de período corto (espejos de Bragg), incrementando de manera considerable la sensibilidad en la determinación de variaciones en la concentración de sustancias disueltas en contacto con el sensor [1,2,7].

##### TEORIA

Una LPG inducida por luz laser ultravioleta modifica el índice refractivo del núcleo de la fibra produciendo una perturbación ( $\Delta n$ ) del orden de  $\sim 10^{-4}$  con periodos típicos comprendidos entre 100  $\mu\text{m}$  and 600  $\mu\text{m}$  (figura 4.58).



*Fig. 4.58 Red de periodo largo (LPG) grabada en fibra óptica.*

La LPG acopla la luz del núcleo de la fibra hacia los modos de la cubierta generando bandas de resonancia centrados en las longitudes de onda  $\lambda_i$ . Después que la luz es acoplada en modos del cladding, esta se atenúa debido a pérdidas por dispersión, originando atenuaciones máximas en el espectro de trasmisión de la fibra óptica (en el modo guiado por el núcleo) a las longitudes de onda  $\lambda_i$ .

Los valores de las longitudes de onda  $\lambda_i$  correspondientes a los máximos de atenuación están dados por las soluciones de la ecuación:

$$[n_{effcore}^{01}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) - n_{effclad}^{iv}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)]\Lambda - \lambda_i = 0 \quad (4.33)$$



#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

Donde:  $n_{\text{eff core}}$  es el índice efectivo del modo del núcleo a la longitud de onda  $\lambda_i$ , el cual es asimismo una función del índice refractivo del núcleo  $n_1$  y el índice refractivo del cladding  $n_2$ . Asimismo,  $n_{\text{eff cladding}}$  es el índice efectivo del modo  $v$ -ésimo del cladding a la longitud de onda  $\lambda_i$  el cual es también una función de ambos: el índice refractivo del cladding  $n_2$  y el índice refractivo del medio que lo rodea  $n_3$ .  $\Lambda$  es el período de la red LPG.

En la ecuación anterior el número 01 se relaciona al modo  $LP_{01}$  del núcleo y el número  $1v$  se refiere al modo axialmente simétrico  $HE_{1v}$  del cladding. Asumimos que la red consiste de una perturbación en el índice circularmente simétrica en todos los planos transversales de la fibra; entonces los únicos coeficientes de acoplamiento distintos de cero entre los modos del núcleo y los modos del cladding son de orden azimutal  $l = 1$  [5].

Las predicciones teóricas para las bandas de atenuación de una LPG en el caso de un medio específico en contacto con la fibra están basadas en el modelo de guía de onda de tres capas desarrollado por Tsao y Erdogan [5]. El análisis de la fibra óptica conduce a una relación de dispersión en el modelo de tres capas que es resuelto numéricamente (usando el método iterativo de Newton-Raphson) determinando las constantes de los modos de propagación del cladding y sus índices refractivos efectivos. También, los valores para los coeficientes de acoplamiento de los modos del cladding son obtenidos de la expresión dada por Erdogan [5]. La respuesta espectral de la LPG es calculada usando esos dos conjuntos de valores y el formalismo de la matriz de transferencia.

La cavidad diseñada encierra la red de período largo entre dos espejos de Bragg (redes de período corto FBG) con  $\Lambda_b$  del orden de media micra y largura de algunos milímetros (Figuras (4.59 – 4.60)), constituyendo una cavidad resonante cuya transmitancia está dada por la expresión:

$$T = \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-\sqrt{R_1R_2})^2 + 4\sqrt{R_1R_2} \sin^2(\beta L_0 + \frac{\phi_1+\phi_2}{2})} \quad (4.34)$$

Donde:

$R_{1,2}$  son los coeficientes de reflexión de las FBGs,  $L_0$  es la longitud de la fibra entre las FBGs,  $\beta$  es la constante de propagación del modo fundamental  $LP_{01}$  y  $\phi_{1,2}$  son las fases de los coeficientes de reflexión de las FBGs.

La luz transmitida por el núcleo y la transmitida por el cladding de la fibra interfieren además en la cavidad de Michelson conformada por la LPG y las FBGs, siendo la reflectancia de esta cavidad:

$$R(\lambda) = 1 - 4T_{co}(\lambda)T_{cl}(\lambda)\text{Sin}^2\left(\frac{2\pi\Delta nL_{cav}}{\lambda} + \theta\right) \quad (4.35)$$

Donde:

$$T_{co}(\lambda) = \text{Cos}^2(\gamma L) + \frac{\delta^2}{\gamma^2} \text{Sin}^2(\gamma L) \quad (4.36)$$

$$T_{cl}(\lambda) = \frac{k^2 \text{Sin}^2(\gamma L)}{\gamma^2} \quad (4.37)$$

$$\delta = \frac{\pi}{\Lambda} \left( \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda} \right) \quad (4.38)$$

$$\gamma = (k^2 + \delta^2)^{1/2}$$

$$\lambda_0 = \Delta n_{\text{eff}} \Lambda$$

Donde:  $L$  es la longitud y  $\Lambda$  el período de la LPG,  $k$  es el coeficiente de acoplamiento,  $\Delta n$  es la variación en el índice refractivo del medio en contacto con el cladding.



#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

Se fabricaron y caracterizaron dos sensores, cuyas características son mostradas en las figuras del 4.61 al 4.65.

Las redes de Bragg de los sensores fueron sintonizadas estirando una de ellas.

#### CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES

##### SENSOR DE FIBRA 1

Red tratada en agua

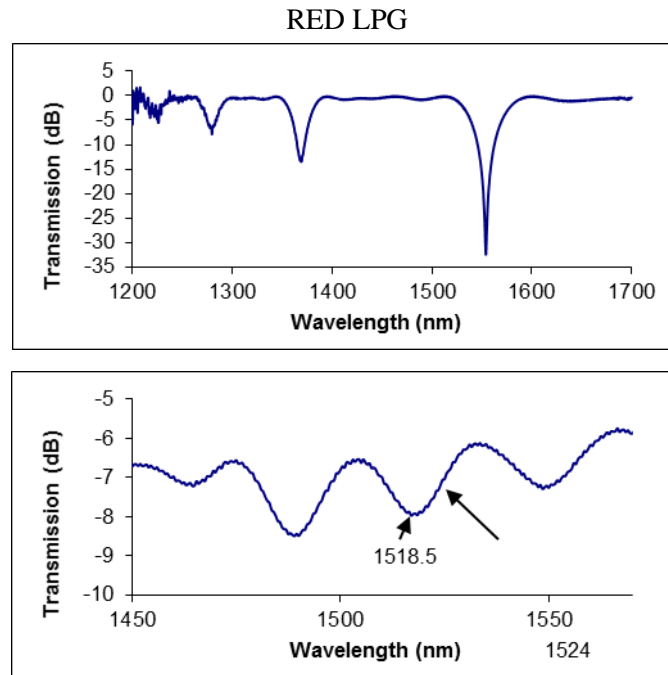


Figura 4.59 Red de periodo largo  $\Lambda_{LPG} = 374 \mu\text{m}$  mostrando su respuesta espectral en transmisión, al ser grabada sobre la fibra y luego de que esta es sumergida en agua y calentada en aire para fijar su respuesta espectral. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

##### REDES FBG

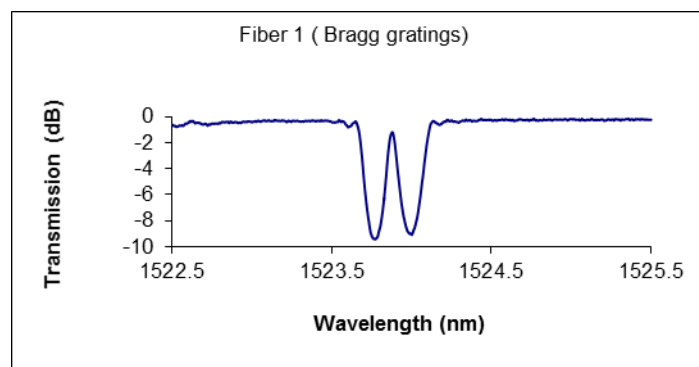


Figura 4.60 Transmitancia de las redes FBG, mostrando la separación inicial de sus picos de resonancia. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

SENSOR DE FIBRA 2  
RED LPG

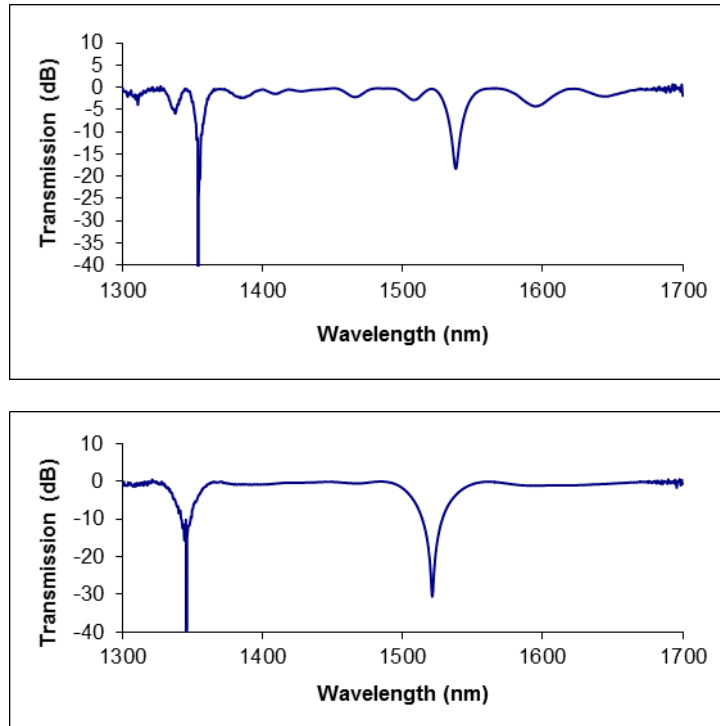


Figura 4.61 Red de periodo largo  $\Lambda_{LPG} = 374 \mu\text{m}$  mostrando su respuesta espectral en transmisión, al ser grabada sobre la fibra y luego de que esta es sumergida en agua y calentada en aire para fijar su respuesta espectral. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

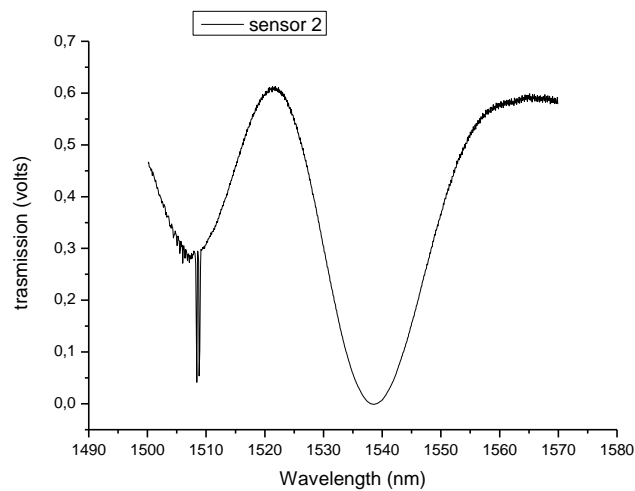


Figura 4.62 Espectro de trasmisión en aire de las redes de periodo largo LPG y de periodo corto FBGs del sensor. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

REDES FBG

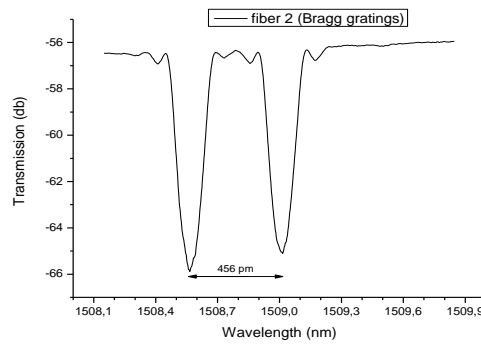


Figura 4.63 Transmitancia en aire de las redes FBG mostrando la separación inicial de sus dips de resonancia. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

ARREGLO EXPERIMENTAL

FIBRA 1

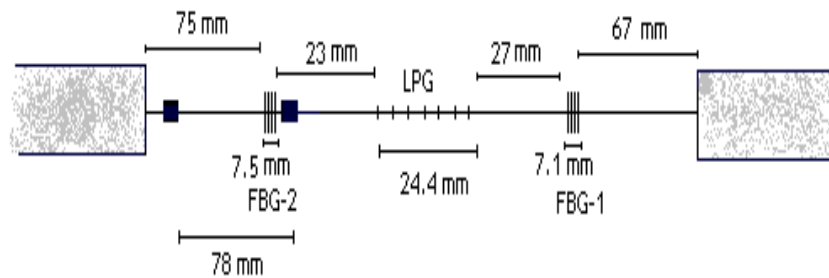


Figura 4.64 Longitud de fibra usada para sintonizar las redes de Bragg = 78 mm. La figura muestra las redes de período corto FBGs y la red de período largo LPG grabadas en la fibra. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

FIBRA 2

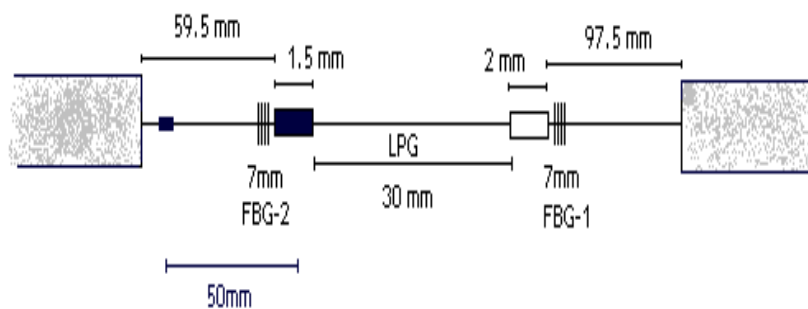


Figura 4.65 Sensor 2: Longitud de fibra usada para sintonizar las redes de Bragg = 50 mm. La figura muestra las redes de período corto FBGs y la red de período largo LPG, de mayor longitud, grabadas en la fibra. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

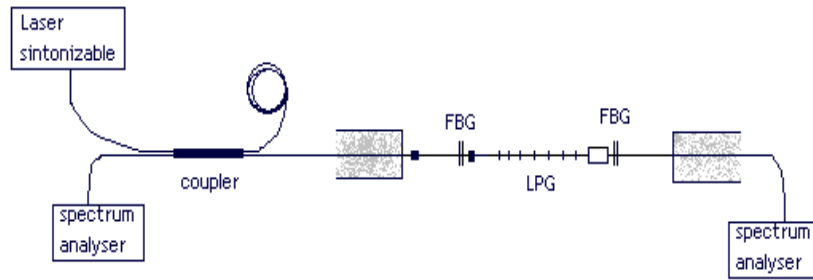


Figura 4.66 Diagrama esquemático del arreglo experimental y sensor de fibra usada, mostrando las redes FBG y LPG. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### FIBRA1

#### SINTONIZACIÓN DE LAS REDES DE BRAGG

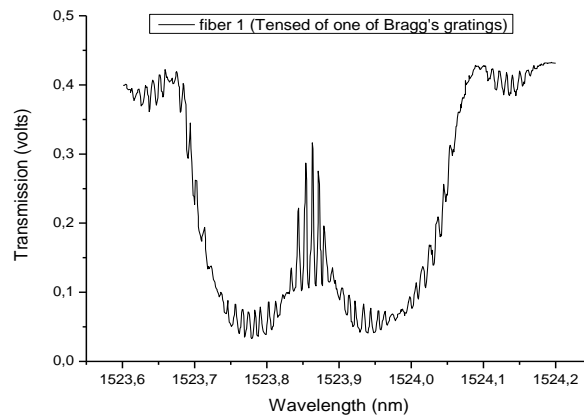


Figura 4.67 Espectro de transmisión. Tensado de una de las redes de Bragg mostrando el inicio de la sintonización de las redes. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

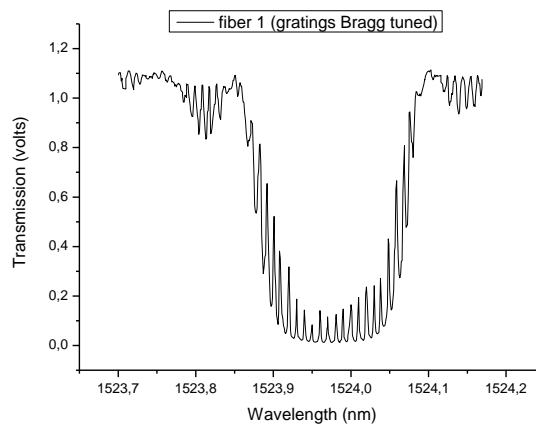


Figura 4.68 Espectro de transmisión. Tensado de una de las redes de Bragg mostrando la respuesta de la cavidad con las redes ya sintonizadas. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

RESPUESTA ESPECTRAL DE TRANSMISIÓN Y REFLEXIÓN DEL SENSOR

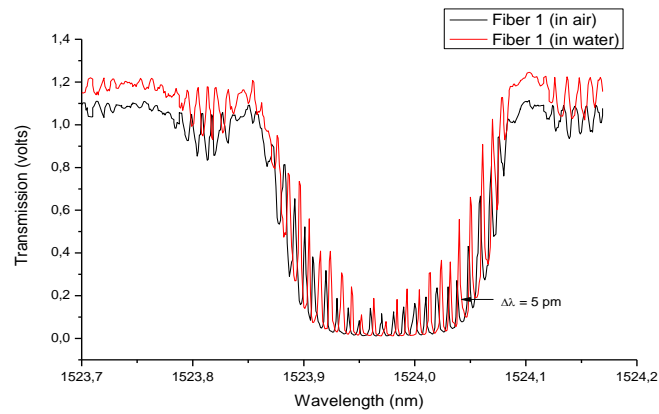


Figura 4.69 Espectro de trasmisión del sensor sintonizado con la red LPG en contacto con aire y con agua. Se muestra la separación entre los picos de resonancia  $\Delta\lambda = 5 \text{ pm}$ . Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

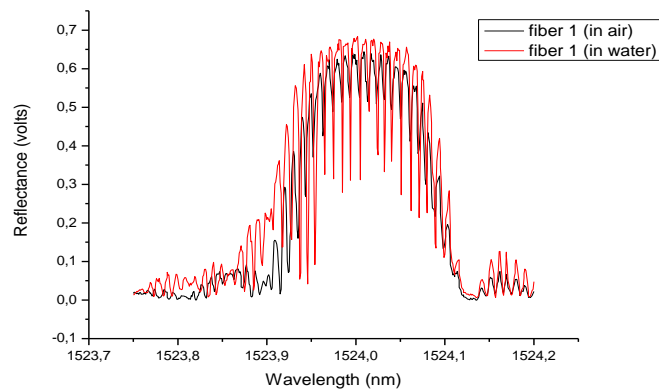


Figura 4.70 Espectro de reflexión del sensor con la red LPG en contacto con aire y con agua. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

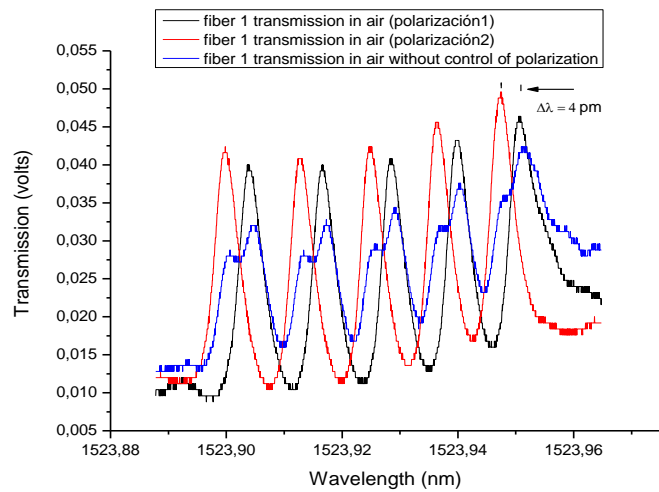


Figura 4.71 Espectro de trasmisión del sensor con la red LPG en contacto con el aire, mostrando la separación entre los picos de resonancia con distinta polarización. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

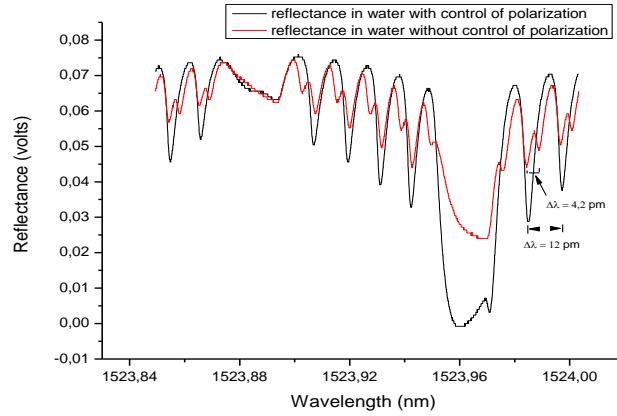


Figura 4.72 Espectro de reflexión del sensor con la red LPG en contacto con el aire, mostrando la separación entre los picos de resonancia con distinta polarización. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

CURVAS DE SENSADO

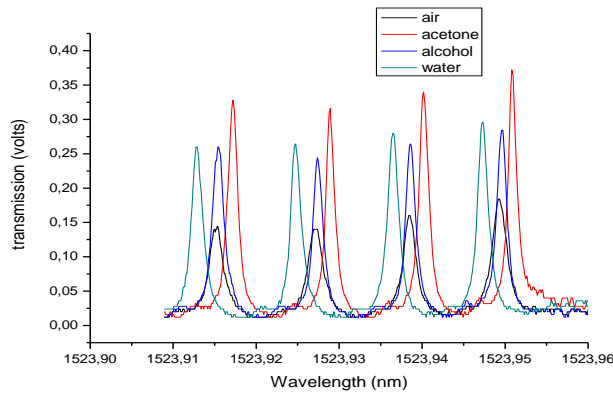


Figura 4.73 Corrimiento de los picos de resonancia de transmisión al poner el sensor en contacto con diferentes líquidos. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

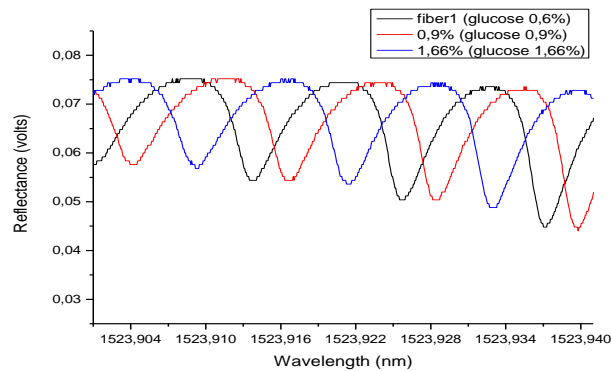


Figura 4.74 Corrimiento de los picos de resonancia de reflexión del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

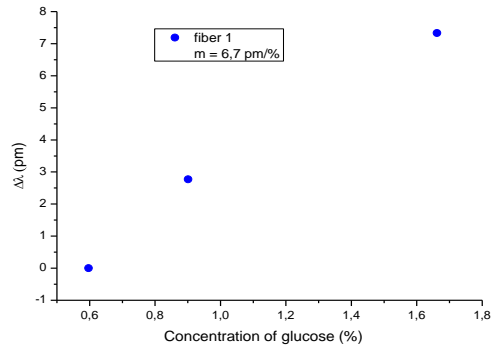


Figura 4.75 Corrimiento de los picos de resonancia de reflexión ( $\Delta\lambda$ ) del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua. La sensibilidad del sensor es de 6.7 pm por 1% de concentración de glucosa disuelta en agua destilada. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

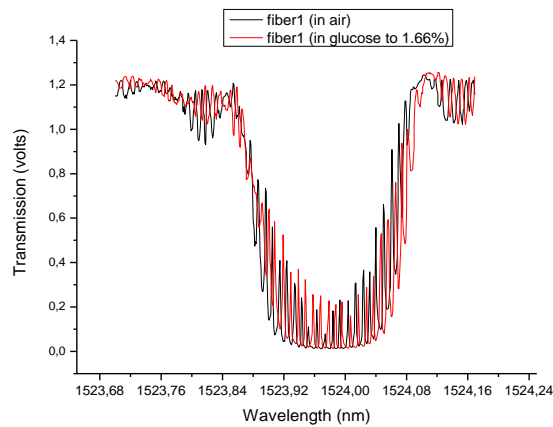


Figura 4.76 variación de  $\lambda$  de resonancia de trasmisión del sensor en contacto con glucosa disuelta en agua destilada al 1.66%. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

#### FIBRA 2

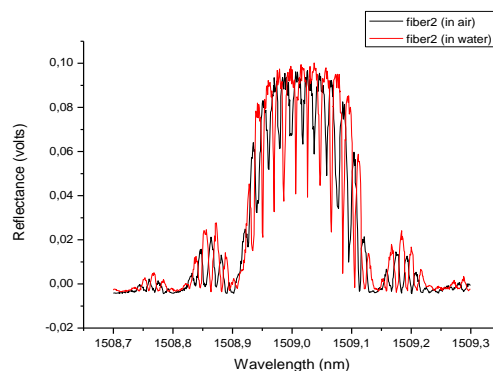


Figura 4.77 Espectro de reflexión del sensor con la red LPG en contacto con aire y con agua. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

CURVAS DE SENSADO DE GLUCOSA

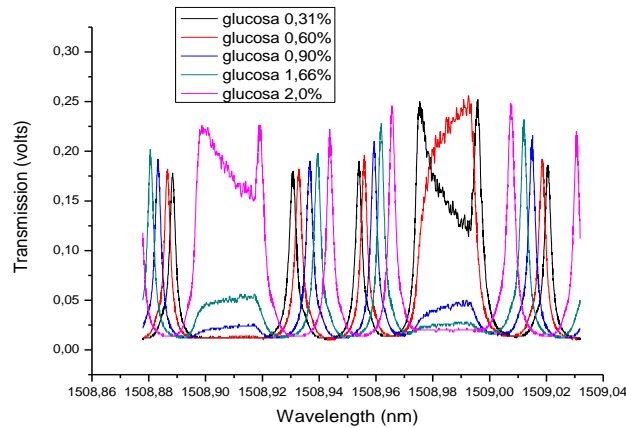


Figura 4.78 Corrimiento de los picos de resonancia de trasmisión del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

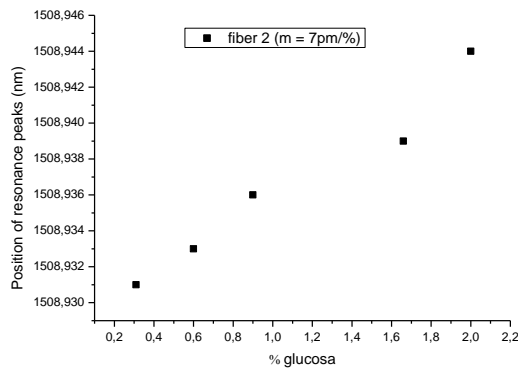


Figura 4.79 Posición de los picos de resonancia del sensor para diferentes concentraciones de glucosa en agua. Estancia Posdoctoral Universidad de Valencia/España 2009.

CONCLUSIONES

Dos sensores con el mismo tipo de cavidad, pero con diferentes valores de longitudes de las redes de período corto FBGs y largo LPG fueron fabricados y caracterizados, obteniéndose diferentes rangos de sensado, determinados por los espaciamentos entre picos de resonancia sucesivos de la cavidad: 12 picómetros y 23.7 picómetros respectivamente, pero con respuestas similares a las diferentes concentraciones del elemento químico detectado (7 pm de corrimiento en los picos de resonancia de la cavidad para una solución de 1% de glucosa en agua destilada). La respuesta encontrada para los corrimientos en la longitud de onda de los picos de resonancia de la cavidad, para las señales de reflectancia y de trasmisión del sensor fue lineal con respecto a las variaciones de concentración de la sustancia química en contacto con el cladding de la fibra óptica.

Se ha logrado construir un sensor reproducible de alta sensibilidad a pequeñas variaciones de la concentración de sustancias en contacto con él. Corrimientos de longitudes de onda de resonancia de la cavidad de hasta 1pm pueden ser detectados con esta técnica.



Queda por fabricar la cavidad sensora en fibra activa para observar el laseo del dispositivo en las longitudes de onda de mayor ganancia del espectro de resonancia del sensor.

#### PUBLICACIONES

[1] **L. Mosquera**, D. Sáez-Rodríguez, J. L. Cruz and M. V. Andrés. In-fiber Fabry–Perot refractometer assisted by a long-period grating. OPTICS LETTERS. February 15, (2010) / Vol. 35, No. 4.

#### REFERENCIAS

- [1] Samer K. Abi Kaed Bey, Cathy Chung Chun Lam, Tong Sun, Kenneth T.V. Grattan, Chloride ion optical sensing using a long period grating pair. Sensors and Actuators A 141 (2008) 390-395.
- [2] Jaw-Luen Tang, Shu-Fang Cheng, Wei-Ting Hsu, Tsung-Yu Chiang, Lai-Kwan Chau, Fiber-optic biochemical sensing with a colloidal gold-modified long period fiber grating. Sensors and Actuators B 119 (2006) 105-109.
- [3] Igor Peshko, Owen Cherry, Tim Rutkevich, Bernard Hockley and Vladimir Rubtsov. Long-period gratings in optical fibres for chemical sensor applications. Meas.Sci. Technol. 16 (2005) 2221-2228.
- [4] Pieter L Swart, Long- period grating Michelson refractometric sensor, Measurement science and Technology. Vol 15 (2004) 1576-1580.
- [5] Turan Erdogan, Fiber Grating Spectra. Journal of Lightwave Technology, Vol 15, N° 8, August 1997.
- [6] Vikram Bhatia. Optical fiber long-period grating sensors. Optics Letters. Vol 21, N° 9, May 1, 1996.
- [7] A.Asseh, S. Sandgren, H. Ahlfeldt, B. Sahlgren, R. Stubbe, G. Edwall. Fiber Optical Bragg Grating Refractometer. Fiber and Integrated Optics, 17:51-62, 1998.
- [8] G. Laffont and P. Ferdinand, "Tilted short-period fiber-Bragg-grating-induced coupling to cladding modes for accurate refractometry," Meas. Sci. Technol. 12, 765-770 (July 2001).
- [9] G. Laffont, N. Roussel, L. Maurin, J. Boussoir, B. Clogenson, L. Auger, S. Magne and P. Ferdinand, "Wavelength tunable fiber ring laser for high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors," Proc. 17th Int. Conf.on Optical Fibre Sensors OFS17 (Bruges, May 2005).
- [10] Z.L. Ran, Y.J. Rao, Long-distance fiber Bragg grating sensor system based on hybrid Raman/Erbium-doped fiber amplifier, in: Proceedings of the 17th International Conference on Optical Fiber Sensors, Belgium, Proc. SPIE 5855 (2005) 583.
- [11] Liu, T., Fernando, G.E, Rao, YJ., Jackson, D.A., Zhang, L., and Ben-nion, I., "Simultaneous Strain and Temperature Measurements in Composites Using a Multiplexed Fibre Bragg Grating Sensor and Extrinsic Fabry-Perot Sensor," Smart Structures and Materials 1997: Smart Sensing, Pro-cessing, and Instrumentation, SPIE 3042, 203-212 (1997).

### 4.3.5 REDES DE BRAGG Y DE PERÍODO LARGO LPG GRAVADAS EN FIBRA ÓPTICA SIDE CORE

#### RESUMEN

Este trabajo muestra, por primera vez, la grabación de redes de Bragg y redes LPG en fibra óptica de núcleo extrínseco (SIDE CORE). Las fibras se fabricaron a partir de tubos de sílice comerciales y varillas de sílice dopadas con Germanio empleando un procedimiento muy simple. El núcleo en la superficie de la fibra, presenta gran sensibilidad a las variaciones del índice de refracción en el entorno en el que se encuentra inmersa la fibra. Además, los datos de simulación son presentados para comparación con el comportamiento experimental del dispositivo.

#### INTRODUCCIÓN

La construcción de sensores de fibra óptica basados en redes de período largo (LPG) y de período corto (FBG) son importantes ya que estos sensores pueden proporcionar medios para sondear una gran variedad de parámetros físicos de interés. Tanto las redes de periodo largo como las redes de Bragg consisten en una modulación periódica longitudinal del índice de refracción óptico de la fibra, que se puede lograr, por ejemplo, mediante la irradiación con láser UV o láser de CO<sub>2</sub>, o mediante la aplicación de arco eléctrico. Esta modulación del índice, que tiene un período de cientos de micrones en redes de largo período y de cientos de nanómetros en las rejillas de Bragg, permiten la existencia de acoplamiento, en determinadas longitudes de onda, entre el modo fundamental del núcleo y los modos de co-propagación del revestimiento del núcleo en redes LPG y con los modos de contra propagación en redes FBG.

Para obtener sensores basados en redes, hay que evaluar parámetros físicos cuya variación altera los valores efectivos del índice de refracción de los modos considerados o el período de rejilla. Estos cambios implican variaciones variaciones en la transmitancia de las redes LPG y FBG. En las siguientes secciones, se presentan los resultados de fabricación de la fibra side core, de la grabación de la red LPG en este tipo de fibra. A nuestro entender, esta es la primera demostración de grabado de redes LPG y redes de Bragg en fibras side core.

#### FABRICACIÓN DE LA FIBRA Y GRAVADO DE LAS REDES

Las fibras producidas fueron fabricadas a partir de tubos de silica con 12mm de diámetro interno y diámetro externo de 18mm y de una barra de silica dopada con Germanio de 21mm de diámetro. Inicialmente la barra de silica dopada fue reducida en la torre de calentamiento a un diámetro de 0.8mm, seguidamente la barra fue pegada sobre el tubo calentándola. La preforma fue estirada hasta llegar a tener 150  $\mu\text{m}$  de diámetro, como se observa en la figura (4.80).

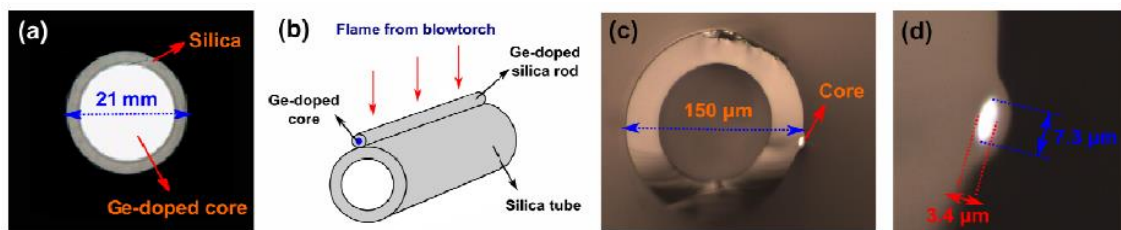


Figura 4.80 Fibra Side Core. a) Preforma de silica dopada con Germanio usada para obtener el núcleo de la fibra. b) Preforma final. c) Sección transversal final de la fibra side core. d) vista ampliada del núcleo de la fibra side core. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### TRANSMITANCIA ÓPTICA del SIDE-CORE

Una red LPG de 1000  $\mu\text{m}$  de período fue gravada sobre la fibra side core usando un láser de CO<sub>2</sub>. Una red de Bragg de 1  $\mu\text{m}$  de período fue gravada usando la técnica de máscara de fase y un láser KrF de 248 nm de longitud de onda.

#### 4. Aplicaciones de sensores de fibra óptica basados en redes LPG

La figura (4.81) muestra el arreglo experimental para observar la transmitancia de la fibra PMMA side core.

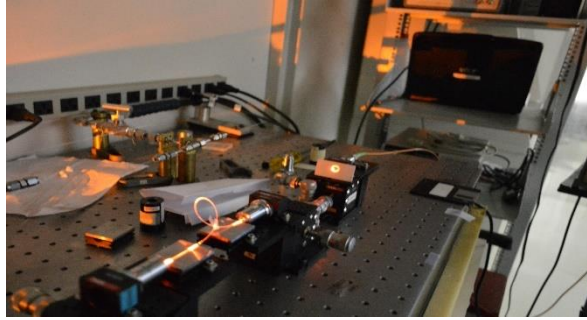


Figura 4.81 Luz transmitida por la pared y núcleo del capilar side-core de PMMA. Post Doctorado UNICAMP 2014.

La figura 4.82 muestra los espectros de las redes LPG y de Bragg gravadas sobre la fibra side core.

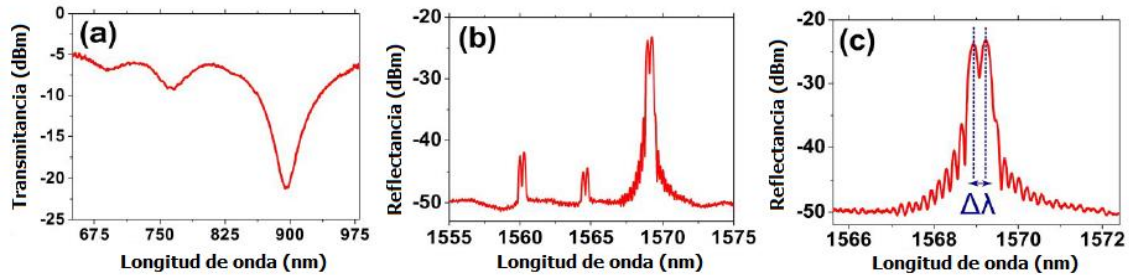


Figura 4.82 a) Espectro de transmisión de la red LPG; b) Espectro de reflexión de la red de Bragg; c) Pico de Bragg a 1569 nm,  $\Delta\lambda = 0,29$  nm. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### RED LPG EN SIDE-CORE LAFE

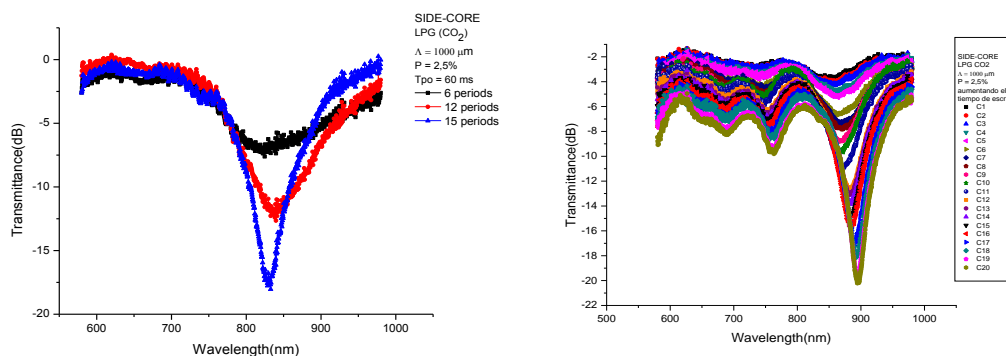


Figura 4.83 a) Espectro de transmisión de la red LPG versus número de periodos; b) Espectro de transmisión de la LPG versus el tiempo de escrita. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### FIBRA SIDE CORE COMO SENSOR DE ÍNDICE DE REFRACCIÓN

Las fibras side-core con las redes LPG y FBG grabadas sobre ellas fueron sumergidas en soluciones Cargille con rangos de índice de refracción comprendidos entre 1,33 y 1,45. La figura (4.84) muestra los resultados obtenidos. La sensibilidad alcanzada fue de 95nm/RIU en el

Intervalo de valores del índice de refracción de 1,33 a 1,40 y de 210nm/RIU en el intervalo de valores del índice de refracción de 1,38 a 1,45 RIU.

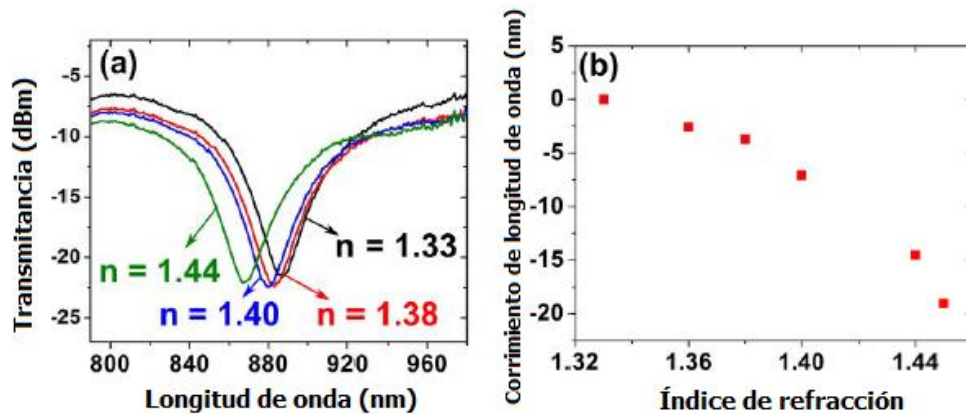


Figura 4.84 a) Espectro de transmisión de la LPG para distintos valores del índice de refracción externo; b) Corrimiento de la longitud de onda de la resonancia ( $\Delta\lambda_{res}$ ) como función del índice de refracción. Post Doctorado UNICAMP 2014.

Resultados análogos son mostrados en la figura (4.85) para el caso de la red de Bragg gravada en fibra side-core y su respuesta como sensor de variaciones del índice de refracción externo. La sensibilidad alcanzada fue de 0.5nm/RIU en el intervalo de valores del índice de refracción de 1,33 a 1,40 y de 2.7 nm/RIU en el intervalo de valores del índice de refracción de 1,38 a 1,45 RIU.

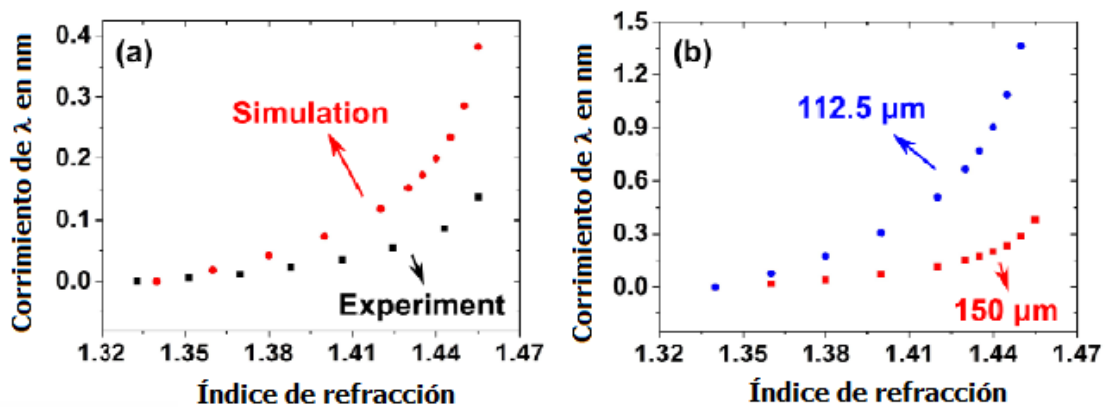


Figura 4.85  $\Delta\lambda$  versus la variación del índice de refracción externo; b) Simulación de la respuesta del sensor para dos diámetros de diseño de la fibra side-core. Post Doctorado UNICAMP 2014.

#### PUBLICACIONES

[1] Jonas H. Osório, Ricardo Oliveira, **L. Mosquera**, et all. Surface-core fiber gratings. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 9634, art. no.96340V (2015)

REFERENCIAS

- [1] Chunying Guan, Xiaozhong Tian, Shuqiang Li, Xing Zhong, Jinhui Shi, Libo Yuan. “Long period fiber grating and high sensitivity refractive index sensor based on hollow eccentric optical fiber”. *Sensors and Actuators B* 188 (2013) 768– 771.
- [2] T. Zhang, L.J. Ma, H.B. Bai, Ch.G. Tong, Q. Dai, J. Yang and L.B. Yuan. “Design and fabrication of a novel core-suspended optic fiber for distributed gas sensor”. *Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference*, edited by Minghong Yang, Dongning Wang, Yunjiang Rao, *Proc. of SPIE Vol. 8924*, 892402 · © 2013. doi: 10.1117/12.2030491
- [3] Fengjun Tian, Libo Yuan, Qiang Dai, and Zhihai Liu. “Embedded multicore hollow fiber with high birefringence”. *APPLIED OPTICS / Vol. 50, No. 33 / 20 November 2011*.
- [4] Jianxia Liu and Libo Yuan. “Evanescent field characteristics of eccentric core optical fiber for distributed sensing”. *Vol. 31, No. 3 / March 2014 / J. Opt. Soc. Am. A*.
- [5] Ya Han, Li Xia, and Deming Liu. “Side-core holey fiber based plasmonic sensor”. *Fourth Asia Pacific Optical Sensors Conference*, *Proc. of SPIE Vol. 8924*, 89240H · © 2013 SPIE. doi: 10.1117/12.2030994.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

Se ha realizado investigación teórica y experimental acerca de la tecnología de sensores basados en fibras ópticas monomodo comerciales, en fibras de núcleo estructurado y en fibras afinadas. Se han diseñado, producido y aplicado diversos sensores para medir índices de refracción externos a la fibra óptica, vibraciones, desplazamientos, presiones, curvaturas, tensiones y módulos de elasticidad de metales, suelo y maderas. Se ha implementado en el laboratorio de física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI un equipo para fabricar sensores de fibra óptica basados en redes de período largo. Tres artículos han sido publicados en revistas indexadas y 04 artículos han sido presentados en Congresos Internacionales. Dos tesis de Maestría vienen siendo desarrollados a la fecha con el equipo implementado en el laboratorio de Física de la FIC.

### Artículos Publicados

- [ ] **Mosquera L.**, Basurto Pinao, J. Monitoring of stresses and deformations in soils by fiber optic sensors. Proceedings of the LACCEI international Multi-conference for Engineering, Education and Technology (2018).
- [ ] **L. Mosquera** and J. Basurto Pinao. Fiber optic sensors type LPG applied to the determination of stresses and deformations in soils. Integrated Photonics Research, Silicon and Nanophotonics. OSA Technical Digest (online) paper JTU2A.45. Zurich (2018). <https://doi.org/10.1364/BGPPM> (2018). JTU2A.45
- [ ] **L Mosquera**, Jonas H Osório and Cristiano M B Cordeiro. Determination of Young's modulus using optical fiber long-period gratings. **Meas. Sci. Technol.** **27** (2016) 015102.
- [ ] Jonas H. Osório, Ricardo Oliveira, **L. Mosquera**, et all. Surface-core fiber gratings. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 9634, art. no.96340V (2015)
- [ ] Jonas H Osório, **L Mosquera**, et all. High sensitivity LPG Mach-Zehnder sensor for real-time fuel conformity analysis. **Meas. Sci. Technol.** **24** (2013) 015102 (8pp)
- [ ] **L. Mosquera**, Jonas H. Osório, Juliano G. Hayashi, Cristiano M.B. Cordeiro. Refractometric sensor based on all-fiber coaxial Michelson and Mach-Zehnder interferometers for ethanol detection in fuel. Journal of Physics: Conference Series 274 (2011) 012020
- [ ] **L. Mosquera**, D. Sáez-Rodríguez, J. L. Cruz and M. V. Andrés. In-fiber Fabry-Perot refractometer assisted by a long-period grating. **OPTICS LETTERS**. February 15, (2010) / Vol. 35, No. 4.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1.1] Jeff Hecht. *Understanding Fiber Optics*. Fifth Edition. Pearson Prentice Hall. New Jersey (2006).
- [1.2] Marianne Large. *Microstructured polymer optical fibres*. Springer Science + Business Media. New York. (2008).
- [2.1] Y. Gao, N. Guo, B. Gauvreau, M. Rajabian, O. Skorobogata, E. Pone, O. Zabeida, L. Martinu, C. Dubois, and M. Skorobogatiy, “Consecutive solvent evaporation and co-rolling techniques for polymer multilayer hollow fiber preform fabrication”, *J. Mat. Research* 21, 2246 (2006).
- [2.2] Guangming Tao and Ayman F. Abouraddy. *Multimaterial Fibers*. *International Journal of Applied Glass Science* 3 [4] 349–368 (2012)
- [2.3] D. PYSZ et all. Stack and draw fabrication of soft glass microstructured fiber optics. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, Vol. 62, No. 4, (2014).
- [3.1] Vincenza Portosi et all. *Advances on Photonic Crystal Fiber Sensors and Applications*. *Sensors* (2019), 19; doi:10.3390/s19081892.
- [3.2] Stephen W James and Ralph P Tatam. Optical fibre long-period grating sensors: characteristics and application. *Meas. Sci. Technol.* 14 (2003) R49–R61.
- [3.3] Chitaree, Ratchapak. The period sensitivity and modal sensitivity of optical fiber force sensor based on mechanical induced ultra-long period fiber grating. *15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) Optical Communications and Networks (ICOON)*, (2016).
- [3.4] Frederick Zolla. *Foundations of Photonic Crystal Fibres*. Imperial College Press. London (2005)
- [3.5] Rasha A. Hussein, et all. Analysis of ultra-high birefringent fully-anisotropic photonic crystal fiber. *Opt Quant Electron* (2015) 47:2993–3007.