

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS**

**“FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE  
SENSORES DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG: APLICACIÓN AL  
ESTUDIO DE MATERIALES Y MEDICIÓN DE FLUJO”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR:  
LEIDY CORAL YANA MAMANI**

**ASESOR:  
Dr. LUIS ALBERTO MOSQUERA LEIVA**

**Lima – Perú**

**2023**

© 2023, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados  
**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte,  
con fines estrictamente académicos.”**

Yana Mamani, Leidy Coral

lyanam@uni.pe

974571725

*Dedico la presente tesis a mis  
padres Dominga y Wilson quienes  
siempre me dieron su apoyo  
incondicional y me motivaron a  
esforzarme por lograr mis metas.  
A mi hermano, a mi gatita Sombra y  
a aquellas personas que me  
acompañaron a lo largo de mi vida  
universitaria.*

## AGRADECIMIENTOS

La oportunidad que nos brinda la vida de expresar nuestro agradecimiento, a cada una de aquellas personas que hacen posible la culminación y el alcance de las metas propuestas, es la mejor recompensa al trabajo realizado (Bonett, 2003).

Quiero comenzar agradeciendo a mis padres Dominga Mamani Maquera y Wilson Isaías Yana Churata quienes son la principal inspiración en lograr mis objetivos, les agradezco todo el amor, la comprensión, y el apoyo infaltable en cada una de las etapas de mi vida, gracias por enseñarme a crecer y afrontar de la mejor manera los retos que la vida depara. Sé que escribirles este agradecimiento es poco comparado con todo el esfuerzo que realizan día a día, y por eso solo puedo decirles que los amo y que espero me acompañen en todos mis logros venideros.

A mi hermano Brayhan por su compañía durante mi etapa universitaria y su buena energía con la que en momentos complicados supo animarme.

Agradezco, también de forma muy especial al asesor de esta tesis, el Doctor Luis Alberto Mosquera Leiva, investigador principal de la FIC - UNI, por su paciencia, sus consejos y la confianza brindada hacia mi persona. El desarrollo de esta investigación ha sido gracias a su apoyo y a la orientación recibida. Gracias por esas palabras que, aunque hayan sido duras, fueron las correctas.

Al Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil, al Instituto General de Investigación de la FIC y al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional de Ingeniería, lugar donde se pudo llevar a cabo la investigación y experimentación de lo comprendido en la presente tesis.

Un agradecimiento al Ing. Marck Steewar Regalado Espinoza por su tiempo y por brindarme su apoyo en la revisión de la digitación de esta tesis.

Unas palabras al Bach. Pedro Christopher Ampuero Inga, quien me acompañó de inicio a fin en la travesía que fue la redacción de la presente tesis, gracias por hacer lo posible para que yo pudiera avanzar sin distracciones.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, que me formó y moldeó a lo largo de 5 años en esta bonita especialidad como lo es la ingeniería civil, y por la cual me siento orgullosa de formar parte de esta casa de estudios.

A Dios, por guiarme y permitirme terminar con mucho éxito esta etapa de mi vida y formación profesional.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	X
PRÓLOGO .....	XII
LISTA DE TABLAS .....	XIV
LISTA DE FIGURAS .....	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS.....	XXI
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1    GENERALIDADES.....	1
1.2    DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	3
1.3    OBJETIVOS DEL ESTUDIO .....	4
1.3.1    Objetivo General .....	4
1.3.2    Objetivos Específicos.....	4
1.4    HIPÓTESIS DEL ESTUDIO .....	4
1.4.1    Hipótesis General.....	4
1.4.2    Hipótesis Específicas.....	4
1.5    METODOLOGÍA.....	5
CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....	7
2.1    LA FIBRA ÓPTICA .....	7
2.1.1    Índice de Refracción ( $n$ ).....	7
2.1.2    Reflexión Total Interna (RTI) .....	8
2.2    TIPOS DE FIBRA ÓPTICA .....	9
2.2.1    Según el Material de Fabricación .....	9
2.2.2    Según el Modo de Propagación .....	9
2.2.3    Según la Estructura del Núcleo .....	11
2.3    GUIADO DE LUZ EN FIBRA ÓPTICA.....	12
2.3.1    Degeneración, Polarización y Birrefringencia .....	12
2.3.2    Guiado Débil.....	13

2.3.3	Conteo de modos.....	13
2.3.4	Apertura numérica (NA).....	14
2.3.5	Ancho de Banda y Dispersión .....	15
2.3.6	Dispersión Modal ( $\tau_m$ ).....	16
2.3.7	Dispersión Cromática.....	16
2.3.8	Dispersión de modo de polarización (PMD).....	18
2.3.9	Dispersión Total ( $\tau$ ).....	19
2.3.10	Ancho de banda de transmisión ( $w$ ).....	19
2.4	TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN FIBRAS MULTIMODO .....	19
2.4.1	Condiciones de Inserción.....	20
2.5	MECANISMOS DE ATENUACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS .....	21
2.5.1	Atenuación Intrínseca .....	21
2.5.2	Atenuación Extrínseca.....	23
2.6	FABRICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS.....	24
2.6.1	Metodologías de fabricación.....	25
2.7	SENSORES DE FIBRA ÓPTICA .....	30
2.7.1	Ventajas y Desventajas de los Sensores de FO.....	30
2.7.2	Tipos de Sensores de Fibra Óptica .....	31
2.7.3	Aplicaciones de los Sensores de Fibra Óptica.....	32
2.8	SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES LPG .....	33
2.8.1	Transmitancia en Redes LPG.....	34
2.8.3	Redes LPG Inducidas Mecánicamente .....	35
2.8.4	Redes LPG grabadas con láser de CO <sub>2</sub> .....	36
2.8.5	Red LPG Gravada en Fibra Afinada (Tápers).....	38
2.9	MODELO TEÓRICO DE LA APLICACIÓN LPG .....	41
2.9.1	Sensibilidad a la curvatura.....	42
2.9.2	Barra resonante para vibraciones.....	43
2.9.3	Viga en Voladizo para Caudal .....	44

CAPÍTULO III: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG .....	45
3.1    SISTEMA DE FABRICACIÓN DE REDES LPG.....	45
3.1.1    Diagrama de Bloques .....	45
3.1.2    Diseño Mecánico.....	45
3.1.3    Diseño Eléctrico .....	47
3.2    DISPOSITIVOS Y SOFTWARE EMPLEADOS .....	47
3.2.1    Dispositivos empleados en la fabricación .....	48
3.2.2    Dispositivos empleados en la caracterización y aplicaciones .....	51
3.2.3    Herramientas de Software .....	53
3.3    AUTOMATIZACIÓN DE GRABADO DE REDES LPG.....	53
3.3.1    Programa Principal LabView .....	53
3.3.2    Manejo de Láser CO <sub>2</sub> .....	54
3.3.3    Control de Base Móvil para Movimiento Horizontal .....	55
3.3.4    Control de Motor a Pasos para Movimiento Vertical.....	55
3.4    FABRICACIÓN DE SENSORES TIPO LPG.....	56
3.4.1    Síntesis del Procedimiento .....	56
3.4.2    Sensores LPG Fabricados.....	57
3.5    CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES LPG FABRICADOS.....	57
3.5.1    Espectro de Transmitancia de una Red LPG:.....	58
3.5.2    Respuesta Dinámica del Sensor LPG .....	59
CAPÍTULO IV. APLICACIONES DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA .....	61
4.1    MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS CON TÁPERS.....	61
4.1.1    Teoría de Tápers y Antecedentes .....	61
4.1.2    Arreglo Experimental .....	67
4.1.3    Fibras con Red LPG Fabricadas y Empleadas .....	68
4.1.4    Resultados Experimentales .....	69
4.1.5    Análisis y Conclusiones .....	76

4.2	MEDICIÓN DEL MOE FLEXURAL EN MADERAS CON SENSOR LPG	
	77	
4.2.1	Artículo publicado.....	77
4.2.2	Teoría del MOE a través de vibraciones .....	77
4.2.3	Arreglo Experimental .....	78
4.2.4	Resultados y análisis del método de la “Barra Resonante” .....	79
4.2.5	Análisis y Conclusiones .....	84
4.3	MEDICIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN UNA TUBERÍA CON SENSOR LPG	
	86	
4.3.1	Artículo publicado.....	86
4.3.2	Teoría de sensores LPG en flujos .....	86
4.3.3	Arreglo Experimental .....	88
4.3.4	Resultados experimentales.....	90
4.3.5	Análisis y Conclusiones .....	93
	CONCLUSIONES .....	94
	RECOMENDACIONES.....	95
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	96
	ANEXOS .....	105
	ANEXO A. ARTÍCULOS PUBLICADOS .....	105
A.1.	Primer artículo publicado e indexado .....	105
A.2.	Segundo artículo publicado .....	110

## RESUMEN

Desde las primeras redes escritas en fibras de vidrio convencional; tales como, las de periodo corto o redes de Bragg, FBG (Hill, 1978), y las de periodo largo, Long-Period fiber Grating, LPG (Vengsarkar, 1996), las técnicas de fabricación de redes y sus aplicaciones han logrado un gran y rápido desarrollo. En los últimos años, el desarrollo de la tecnología de fibras ópticas (FO) y su aplicación en el monitoreo de diversos parámetros físicos, químicos y biológicos, las han convertido en una herramienta de gran importancia. Dentro de las cuales los más estudiados son los sensores de FO de periodo corto (FBG) y pocos se han basado en redes de periodo largo (LPG). Actualmente, en el Perú existe la necesidad de implementar nuevas metodologías para la obtención de parámetros de materiales a bajo costo, siendo la tecnología de sensores de FO una buena opción debido a sus principales ventajas: tamaño pequeño y de bajo costo, utilizan materiales abundantes en la naturaleza (silicio) y la propiedad de ser básicamente inmunes a la radiación electromagnética. Sin embargo, el estudio relacionado a la tecnología de FO es limitado, lo que hace que sea una prioridad poder difundir su confiabilidad y definir una estrategia que permita analizar los datos; de manera que, la transmisión de información aportada por los sensores LPG ocurra en el momento y tiempo precisos, además de propiciar las condiciones necesarias para lograr una lectura adecuada.

Con el objetivo de mostrar su viabilidad, en la presente tesis se busca validar la confiabilidad de la tecnología de los sensores LPG y su aplicación en el monitoreo de desplazamientos, vibraciones para el cálculo del MOE y curvaturas para la medición de caudales, mediante la comparación entre parámetros físicos conocidos por la literatura o algún método comercial y aquellos obtenidos con la metodología propuesta.

Para la medición de desplazamientos se emplea un sensor de desplazamiento basado en fibra óptica afinada con estructura en forma de S (táper). Donde la fibra es colocada sobre dos motores de paso que la tensionan, de manera que esta pueda mostrar su señal a diferentes desplazamientos. La misma metodología se realizó con sensores LPG, mostrándose su sensibilidad al desplazamiento.

Para el análisis del monitoreo de vibraciones se ha elegido la madera, la cual posee propiedades físicas ampliamente conocidas como el módulo de elasticidad (MOE), debido a su importancia en el diseño y cálculo de componentes

estructurales de elementos que trabajan a flexión en sistemas estructurales de edificaciones. Por lo cual, se determinaron los MOE flexural de 5 tipos de madera: Cachimbo, Caoba, Cedro, Pino y Tornillo. Para desarrollar esta tecnología, se implementó un equipo de fabricación de sensores de FO basados en redes LPG en el laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, donde se realizaron los ensayos. Para ello se caracterizó la respuesta dinámica de las barras de madera puestas en oscilación en donde se hizo un extremo fijo y el otro libre, para permitir la perturbación. Para tomar las medidas, se colocó el sensor LPG en la barra de madera y un fotodetector acoplado a un osciloscopio, el cual almacena la desviación de la barra de madera contado como un desplazamiento vertical del extremo de la barra libre. Se supervisaron las respuestas mediante la curvatura provocada por el movimiento del sensor LPG. Las frecuencias de vibración del movimiento se obtuvieron de la transformada de Fourier (FFT) del registro tiempo historia de oscilaciones flexurales. Posteriormente, el valor de los MOE flexural se determinaron a partir del ajuste de la frecuencia de datos experimentales del primer modo frente a la longitud del voladizo.

Finalmente, los valores de los módulos de elasticidad (MOE) flexural determinados experimentalmente para los 5 tipos de madera analizados en el presente estudio, presentan una desviación promedio de 1.6 – 1.9 % con respecto al promedio de los valores reportados en la literatura, los cuales fueron obtenidos utilizando otras técnicas.

Para la medición de velocidades de flujo en tuberías, el método utilizado también es el de la barra resonante; sin embargo, en este caso el sensor LPG es colocado en voladizo de manera perpendicular a la dirección de flujo. Para realizar las mediciones, se emplea un depósito vertical, con salida a la tubería a partir de la cual se toman las mediciones en por lo menos tres ciclos, los resultados son comparados con los datos de un medidor comercial de caudal como el sensor de flujo Arduino y se obtiene como resultado una tendencia semejante en ambos casos, además de un Índice de Desviación Estándar en un rango aceptable.

Por lo tanto, la presente tesis tiene la intención de mostrar el uso de sensores LPG en la caracterización dinámica de las propiedades elásticas de un material y la caracterización de flujo de un fluido, a través del desarrollo de su aplicación e implementación en cada caso.

## ABSTRACT

Since the first gratings written on conventional glass fibers, such as short-period or Bragg gratings, FBG (Hill, 1978), and long-period fiber gratings, LPG (Vengsarkar, 1996), grating fabrication techniques and their applications have achieved a great and rapid development. In recent years, the development of fiber optic (FO) technology and its application in the monitoring of various physical, chemical and biological parameters have made it a vitally important tool. Among which the most studied are the short period FO sensors (FBG) and few have been based on long period networks (LPG). Currently, in Peru there is a need to implement new methodologies for obtaining material parameters at low cost, being the FO sensor technology a good option due to its main advantages: small size and low cost, using abundant materials in nature (silicon) and the property of being basically immune to electromagnetic radiation. However, the study related to FO technology is limited, which makes it a priority to disseminate its reliability and define a strategy to analyze the data, so that the transmission of information provided by LPG sensors occurs at the right time and time, in addition to providing the necessary conditions to achieve an adequate reading.

In order to show its feasibility, this thesis seeks to validate the reliability of LPG sensor technology and its application in the monitoring of displacements, vibrations for the calculation of MOE and curvatures for the measurement of flow rates, through the comparison between physical parameters known in the literature or a commercial method and those obtained with the proposed methodology.

For the measurement of displacements, a displacement sensor based on tuned optical fiber with an S-shaped structure (táper) is used. Where the fiber is placed on two stepper motors that tension it, so that it can show its signal at different displacements. The same methodology was performed with LPG sensors, showing their sensitivity to displacement.

For the analysis of vibration monitoring, wood has been chosen, which has widely known physical properties such as the modulus of elasticity (MOE), due to its importance in the design and calculation of structural components of flexural elements in structural systems of buildings. Therefore, the flexural MOE of 5 types of wood were determined: Cachimbo, Mahogany, Cedar, Pine and Tornillo. To develop this technology, an equipment for the fabrication of FO sensors based on LPG networks was implemented in the Physics Laboratory of the Faculty of Civil

Engineering of UNI, where the tests were carried out. For this purpose, the dynamic response of the wooden bars placed in oscillation was characterized, where one end was fixed and the other free, to allow the perturbation. To take the measurements, the LPG sensor was placed on the wooden bar and a photodetector coupled to an oscilloscope, which stores the deflection of the wooden bar counted as a vertical displacement of the free bar end. The responses were monitored using the curvature caused by the movement of the LPG sensor. The vibration frequencies of the motion were obtained from the Fourier transform (FFT) of the time history record of flexural oscillations. Subsequently, the value of the flexural MOEs were determined from the fit of the first mode experimental data frequency versus cantilever length.

Finally, the values of the flexural moduli of elasticity (MOE) determined experimentally for the 5 types of wood analyzed in the present study, present an average deviation of 1.6 - 1.9 % with respect to the average values reported in the literature, which were obtained using other techniques.

For the measurement of flow velocities in pipes, the method used is also the resonant bar method; however, in this case the LPG sensor is cantilevered perpendicular to the flow direction. To perform the measurements, a vertical tank is used, with an outlet to the pipe from which the measurements are taken in at least three cycles, the results are compared with the data from a commercial flow meter such as the Arduino flow sensor and a similar trend is obtained as a result in both cases, also the SDI in an acceptable range.

Therefore, this thesis intends to show the use of LPG sensors in the dynamic characterization of the elastic properties of a material and the flow characterization of a fluid, through the development of its application and implementation in each case.

## PRÓLOGO

El presente trabajo de Tesis de titulación “FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG: APLICACIÓN AL ESTUDIO DE MATERIALES Y MEDICIÓN DE FLUJO”, consta de cuatro capítulos. En el capítulo I se presentan los objetivos de la tesis, las hipótesis planteadas, la metodología empleada. En el capítulo II se describen los diferentes tipos de fibras ópticas, los parámetros que las caracterizan, las técnicas de fabricación, su caracterización óptica, así como, sus aplicaciones para el sensado de diferentes parámetros físicos de estructuras diversas. En el capítulo III se describen los sensores de fibra óptica basados en redes de período largo (LPG). Se describen los métodos de fabricación de este tipo de red y el sistema automatizado, (implementado en el laboratorio de física de la FIC), para grabar estas redes en la fibra. En el capítulo IV se describen tres aplicaciones desarrolladas en esta tesis: la medición de desplazamientos, medición de vibraciones y medición de flujo de agua en tuberías. En cada uno de los casos, se describe la fabricación de los sensores, su caracterización óptica, y se muestra el modelo matemático desarrollado para relacionar los cambios en la transmitancia de la luz con la variación de los parámetros físicos.

La calibración de los sensores fue realizada comparando las mediciones obtenidas con el sensor LPG con las obtenidas por instrumentos basados en otras técnicas y con calibración certificada. De las curvas experimentales se determinaron, el rango, resolución y sensibilidad de los sensores fabricados.

La tesis contiene en la parte final una lista bibliográfica de los libros y artículos publicados y/o utilizados. Esperamos que la tesis provea de una visión amplia acerca de las técnicas basadas en sensores de fibra óptica tipo LPG y sus aplicaciones para la determinación y/o medición de diferentes parámetros físicos (desplazamientos, curvaturas, vibraciones, flujos, carga, temperatura, etc.).

Dos artículos fueron expuestos en congresos de la OSA y publicados en los Proceedings de la revista OSA Technical Digest indexada en SCOPUS:

Optical Sensors and Sensing Congress OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2020), paper SW1F.3 • <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2020.SW1F.3>



### LPG fiber optic sensor applied to the flexural vibration monitoring and determination of dynamic Young's modulus of woods

L Mosquera, L. Yana, J. Basurto, and Ana Torre

[Author Information](#) • [Q. Find other works by these authors](#)

Optical Sensors 2020  
Washington, DC United States  
22–26 June 2020  
ISBN: 978-1-943580-78-1

From the session  
Force, Pressure and Vibration Sensing (SW1F)

OSA Optical Sensors and Sensing Congress 2021 (AIS, FTS, HISE, SENSORS, ES) OSA Technical Digest (Optica Publishing Group, 2021), paper STu1A.6 • <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2021.STu1A.6>



### Fluid flow measurement using LPG fiber optic sensor

L Yana, L Mosquera, and F Loayza

[Author Information](#) • [Q. Find other works by these authors](#)

Optical Sensors 2021  
Washington, DC United States  
19–23 July 2021  
ISBN: 978-1-943580-90-3

From the session  
Optical Fiber Sensors IV (STu1A)

Concluimos dejando en conocimiento de la comunidad FIC de que disponemos de un laboratorio implementado para fabricar sensores de fibra óptica tipo LPG, pudiendo aplicarlos a ensayos de tipo no destructivo a fin de determinar valores de módulos de elasticidad de materiales, caudales de fluidos, evolución de grietas, etc.

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla N°</b>	<b>Título</b>	<b>Página N°</b>
2.1	Pérdidas intrínsecas típicas. Adaptado de Román (2010).	23
3.1	Potencias máximas consumidas.	46
4.1	Resultado para el táper SMF "B" con curvatura S. Fuente propia.	69
4.2	Resultado para el táper SMF "C" con curvatura S. Fuente propia.	70
4.3	Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "B" con curvatura S.	71
4.4	Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "C" con curvatura S.	71
4.5	Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "A" con curvatura S con disposición ( $\alpha = -0.2$ ).	72
4.6	Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "D" y "E" con curvatura congelada.	74
4.7	Variaciones entre los dips de transmitancia de los sensores LPG de 3 y 6 periodos.	75
4.8	Características de las maderas estudiadas.	79
4.9	Resultados de frecuencia para la madera <i>Caoba</i> .	80
4.10	Resultados de frecuencia para la madera <i>Cachimbo</i> .	81
4.11	Resultados de frecuencia para la madera <i>Cedro</i> .	81
4.12	Resultados de frecuencia para la madera <i>Pino</i> .	81
4.13	Resultados de frecuencia para la madera <i>Tornillo</i> .	82
4.14	Módulo de elasticidad flexural de las maderas.	84
4.15	Índice de Desviación Estándar (SDI) del Y obtenido.	84
4.16	Caudales obtenidos por el caudalímetro Arduino.	90

4.17	Caudales obtenidos por el sensor LPG.	91
4.18	Módulo de elasticidad flexural de las maderas.	92
4.19	Índice de Desviación Estándar (SDI) del Q obtenido.	92

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
<b>N°</b>		<b>N°</b>
2.1	Estructura de una fibra óptica estándar	7
2.2	Reflexión total interna	8
2.3	Fibra multimodo de índice escalonado	10
2.4	Fibra multimodo de índice gradual	11
2.5	Fibra Monomodo (SMF)	11
2.6	Fibras de núcleo estructurado	12
2.7	Apertura Numérica (NA) y Ángulo de aceptación	15
2.8	Ensanchamiento y Atenuación de dos pulsos adyacentes	16
2.9	Variación de Índice de Refracción	17
2.10	Propagación de dos modos de polarización en una FO birrefringente	19
2.11	Ensanchamiento del pulso	20
2.12	Curva de pérdidas por Absorción	22
2.13	Pérdidas por macro-curvatura	24
2.14	Pérdidas por micro-curvatura	24
2.15	Preparación de una Preforma para el Proceso OVPO	26
2.16	Máquina para el proceso de VAD	26
2.17	Diagrama del proceso de MCVD	27
2.18	Método del Doble Crisol	27
2.19	Capilares apilados con núcleo de sílice	28
2.20	Torre de estiramiento de preformas mPOF	29

2.21	Componentes de un sensor de fibra óptica	30
2.22	Esquema de un sensor bajo interferómetro Fabry Perot	32
2.23	Principio de funcionamiento de una LPG	33
2.24	Arreglo típico para el grabado mecánico de una LPG	35
2.25	Arreglo experimental para el grabado de una LPG	36
2.26	Equipo experimental para el grabado de una LPG	36
2.27	Perfiles de las redes grabadas con láser CO <sub>2</sub>	37
2.28	Arreglo experimental para el grabado punto por punto	37
2.29	Evolución de una red LPG respecto al número de periodos	37
2.30	Espectro de transmisión de una red LPG	38
2.31	Fibra afinada con perfil bicónico	39
2.32	Oscilaciones en la transmitancia de un táper	40
2.33	Geometría para cálculo de los efectos de curvatura del Táper	40
2.34	Sensibilidad a la flexión	42
2.35	Deflexión de una viga en voladizo horizontal	43
2.36	Representación experimental de una viga en voladizo.	44
3.1	Diagrama de bloques del sistema	45
3.2	Diseño mecánico general	46
3.3	Diseño mecánico de base horizontal	46
3.4	Esquema eléctrico de la protección implementada	47
3.5	Fibra Óptica empleada marca Drartel	47
3.6	Láser de CO <sub>2</sub>	48
3.7	Controlador de láser UC-2000	48

3.8	Base Móvil Horizontal	49
3.9	Controlador de pasos ThorLabs BSC201	49
3.10	Motor a pasos para movimiento horizontal	49
3.11	Circuitos para control de movimiento horizontal	50
3.12	Microcontrolador de movimiento vertical	50
3.13	Cooler para ventilación forzada de láser	50
3.14	Ubicación del lente de Selenuro de Cadmio	51
3.15	Empalmadora Sumitomo Type-82C	51
3.16	Fuente de Luz LED Safibra modelo OFLS-6	52
3.17	Fotodetector Newport modelo 2033	52
3.18	Osciloscopio Ocean Optics Newport modelo 2033	52
3.19	Esquema de grabado de redes LPG en fibras ópticas	53
3.20	Pantalla principal LabView	54
3.21	Interfaz para el control de láser CO <sub>2</sub>	55
3.22	Interfaz para configuración del Motor Horizontal	55
3.23	Interfaz para configuración del Motor Vertical	56
3.24	Equipamiento para la grabación de redes LPG	56
3.25	Red LPG grabada	57
3.26	Luz guiada en una red LPG de 5 periodos de 500µm	57
3.27	Configuración en voladizo para la caracterización del sensor LPG	58
3.28	Espectro de transmitancia de una LPG	58
3.29	Respuesta dinámica del sensor de fibra óptica tipo LPG	59
3.30	Trasformada de Fourier con sensor Pasco	60

3.31	Trasformada de Fourier con sensor LPG	60
4.1	Curvatura de la fibra en la zona afinada	61
4.2	Espectro de transmitancia del táper de la Figura N� 4.1	62
4.3	Dependencia entre los dips de transmitancia y longitudes de onda	63
4.4	Dependencia del desplazamiento al aumentar la curvatura del táper	63
4.5	Dependencia lineal de la fase del dip de transmitancia	64
4.6	Curvatura del táper	64
4.7	Método sencillo de obtener curvatura en forma de S	65
4.8	Transmitancia del táper curvado en S con sensibilidad 66 pm/ $\mu$ m	65
4.9	Fibra afinada con "curvatura congelada" en SMF28 comercial	66
4.10	Transmitancia del táper con "curvatura congelada"	66
4.11	Sensibilidad del táper con "curvatura congelada" a variaciones de curvatura originados por desplazamiento	67
4.12	Arreglo experimental del sensor LPG para registrar la sensibilidad al desplazamiento	67
4.13	Arreglo experimental del táper con curvatura S	68
4.14	Sensor LPG fabricado con 3 periodos en una fibra SMF comercial	68
4.15	Sensor LPG fabricado con 6 periodos en una fibra SMF comercial	69
4.16	Resultado de los dips de Intensidad de Transmitancia para los tápers SMF "B" y "C" con curvatura en S	70
4.17	Dependencia lineal de la variación de los dips de intensidad de transmitancia de los tápers SMF "B" y "C", con curvatura S ( $\alpha=0$ ) frente al desplazamiento	72

4.18	Dependencia lineal de la variación de los dips de intensidad de transmitancia del táper SMF "A" con curvatura S ( $\alpha = -0.2$ ) frente al desplazamiento	73
4.19	Dependencia entre los dips de intensidad de transmitancia y el desplazamiento para un táper con "curvatura congelada"	75
4.20	Dependencia lineal de la intensidad de transmitancia del sensor LPG frente al desplazamiento	76
4.21	Arreglo experimental para la medición de MOE con sensor LPG	78
4.22	Movimiento Oscilatorio percibido por el sensor LPG	79
4.23	Trasformada de Fourier con sensor LPG	80
4.24	Trasformada de Fourier con sensor LPG para Cachimbo	82
4.25	Trasformada de Fourier con sensor LPG para Caoba	82
4.26	Trasformada de Fourier con sensor LPG para Cedro	83
4.27	Trasformada de Fourier con sensor LPG para Pino	83
4.28	Trasformada de Fourier con sensor LPG para Tornillo	83
4.29	Diagrama esquemático de la deformación del apoyo en voladizo de la fibra óptica debido al flujo de fluido	86
4.30	Esquema del arreglo experimental para la medición de flujo	88
4.31	Arreglo experimental para la medición de flujo en una tubería con sensor LPG	89
4.32	Esquema del arreglo experimental en voladizo para tubería	89
4.33	Caudal de salida frente a la altura del agua en el tanque medido con el sensor de efecto Hall del arduino YF-S201	90
4.34	Caudal de salida frente a la altura del agua en el tanque medido con el sensor de fibra óptica tipo LPG	91

## LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

### SÍMBOLOS

$A$	: Área de impacto con la varilla
AB	: Ancho de Banda
$c$	: Velocidad de la luz en el vacío
$c$	: Coeficiente de dispersión
Cl	: Cladding
Co	: Core
dB	: Decibel
$D_{\lambda}$	: Dispersión en la fibra a una longitud de onda $\lambda$
$E$	: Campo Eléctrico
$E$	: Módulo de elasticidad flexural de la varilla
$F$	: Fuerza uniforme actuando sobre la superficie de la varilla
$g$	: Gravedad
Gbit	: Gigabit
GHz	: Gigahertz
$H$	: Campo Magnético
Hz	: Hertz
$I$	: Transmitancia
$I$	: Momento de inercia de la sección transversal
km	: Kilómetro
$K$	: Intensidad a la sensibilidad de la transmitancia
$L$	: Longitud que recorre la luz
$L$	: Longitud de la varilla en voladizo
$LP_{nm}$	: Modo de acoplamiento
MHz	: Megahertz
nm	: Nanómetro

NA	: Apertura Numérica
$N_{\text{modos}}$	: Número de modos
$P_{\text{entrada}}$	: Potencia de entrada
$P_{cl}^{(n)}(L)$	: Potencia de salida después de recorrer una longitud L
$P_{01}(0)$	: Potencia de entrada
$P_{\text{sal}}$	: Potencia de salida
Q	: Caudal de salida
$T^{(m)}$	: Profundidad de la inmersión de transmitancia
v	: Velocidad de la luz en el medio
$v_{\text{ph}}$	: Velocidad de fase
$v_g$	: Velocidad de grupo
V	: Parámetro relacionado con la condición de corte de la fibra
w	: Ancho de banda de transmisión
W	: Watts
Y	: Módulo de Young
$\alpha$	: Coeficiente de atenuación
$\beta$	: Constante de propagación
$\beta_{nm}^{(i)}$	: Constante de propagación del modo nm.
$\delta$	: Parámetro de desfasaje
$\delta\tau_{\text{intra}}$	: Ensanchamiento del pulso (dispersión intramodal)
$\delta\tau_{\text{inter}}$	: Ensanchamiento del pulso (dispersión intermodal)
$\varepsilon$	: Perturbación
$\varepsilon_{nm}$	: Función propia normalizada del modo LPnm
$n_{cl}$	: Índice del revestimiento
$n_{\text{eff}}$	: Índice de refracción efectivo de la fibra óptica
$n_g$	: Índice de grupo

$n_{\text{máx}}$	:	Mayor índice en la fibra
$n_1$	:	Índice de refracción del núcleo
$n_2$	:	Índice de refracción del revestimiento
$\theta_1$	:	Ángulo de incidencia
$\theta_2$	:	Ángulo de luz refractada
$\theta_c$	:	Ángulo crítico
$\theta_a$	:	Ángulo de aceptación
$\kappa^{(m)}$	:	Modo de revestimiento
$\kappa_g$	:	Constante de acoplamiento
$\kappa_v$	:	Constante de amortiguación viscosa
$\lambda$	:	Longitud de onda
$\Lambda$	:	Período de perturbación del índice de refracción
$\pi$	:	pi
$\rho$	:	Densidad del material
$\rho$	:	Densidad del fluido
$\tau$	:	Dispersión total
$\tau_m$	:	Dispersión modal
$\tau_e$	:	Dispersión cromática del material
$\tau_g$	:	Dispersión cromática de guía de onda
$v$	:	Velocidad del flujo
$\psi$	:	Ángulo entre microcurvaturas

**SIGLAS**

BER	: Bit Erróneo
FBG	: Red de Periodo Corto
FFT	: Transformada de Fourier
FO	: Fibra Óptica
LED	: Light Emitting Diode
LPG	: red de Periodo Largo
MCVD	: Deposición Modificada de Vapores Químicos
MLPG	: Red LPG Inducida Mecánicamente
MMF	: Fibras Multimodo
MOE	: Módulo de Elasticidad Flexural
Mpof	: Fibras Ópticas Microestructuradas
NRZ	: No Retorno a Cero
OSA	: Analizador Espectral Óptico
OSC	: Osciloscopio
OVDP	: Deposición Externa de Vapores
PCF	: Cable de Fibra Óptica
PCS	: Plastic Clad Sílica
PDT	: Fotodetector
PMD	: Dispersión de Modo de Polarización
PMMA	: Fibras Hechas de Capilares Apilados
RFI	: Radiofrecuencia
RTI	: Reflexión Total Interna
RZ	: Retorno a Cero
SCS	: Sílica Clad Sílica
SDI	: Índice de Desviación Estándar
SLED	: LED Superluminiscente

SM	:	Sensores modulados
SMF	:	Fibras monomodo
TE	:	Transversal eléctrico
TM	:	Transversal mecánico
TVHD	:	Televisión de alta definición
UNICAMP	:	Universidad Estatal de Campinas
VAS	:	Deposición Axial de Vapores

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 GENERALIDADES

Han pasado casi cinco décadas desde que la investigación sobre la fibra óptica y sus aplicaciones se dio a conocer (Kapany 1967), pero no es hasta 1977 donde se observan los primeros trabajos sobre sensores de fibra óptica (Giallorenzi et al., 1982). Posteriormente se desarrollaron los primeros componentes de fibra óptica basados en redes, en los que se aplica modulación periódica del índice de refracción al núcleo y recubrimiento de una fibra monomodo, los cuales se dividieron en dos tipos: redes de período corto o redes de Bragg (FBG), (Hill et al., 1978) y redes de período largo (LPG), (Vengsarkar, 1996). A partir de los cuales las técnicas de fabricación de redes y sus aplicaciones han logrado un gran y rápido desarrollo.

La reducción de la pérdida de transmisión en fibras ópticas, junto con importantes desarrollos en las fuentes de luz, detectores y tipos de fibra, han originado el gran crecimiento de esta industria. El progreso científico y tecnológico en este campo ha sido tan acelerado que ya se encuentra en la quinta generación de fibra óptica para sistemas de comunicación, alcanzando una pérdida de casi "cero" dB y ancho de banda "infinito" (Agrell et al., 2016; Kaminow et al., 2013; Winzer, 2018). Asimismo, redes de difracción gravadas sobre estas fibras ópticas, han permitido controlar las propiedades de propagación de la luz en su interior, posibilitando su uso como filtros espectrales, componentes de compensación de dispersión y en sistemas de sensoramiento.

Las ventajas de la fibra óptica son: su mayor ancho de banda, pequeña dimensión, bajo costo, estar compuesto de materiales abundantes en la naturaleza (el silicio, que es eléctricamente aislante) y con la propiedad de ser básicamente inmune a la radiación electromagnética externa. Los sensores de fibra óptica a su vez exhiben múltiples ventajas por sí mismos como su compactibilidad, inmunidad a la interferencia electromagnética, alta sensibilidad y peso mínimo. Estas propiedades hacen que 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 (Mosquera, 2018). Por ello se han mostrado diversos enfoques y tecnologías para medir diferentes parámetros físicos con el uso de sensores de fibra óptica.

Las aplicaciones de los sensores de fibra óptica en la ingeniería civil se han extendido a diversos campos: en monitoreo geodinámico (Ferraro, 2001), medidas de deformación (Liu, 2002), corrosión del acero (Leung, 2008), monitoreo de estructuras de concreto (Kesavan, 2010), monitoreo de temperatura, desplazamientos y vibraciones con fibra óptica distribuida (Bao, 2012), técnicas no destructivas (Moropoulou, 2013), sensores de humedad (Kolpakov, 2014), sensor de flujo (Yuhuan Du, 2016) y sensor de deformación del suelo (Mosquera, 2018). En la mayoría de estas aplicaciones se emplearon redes de periodo corto (redes de Bragg o FBG, por sus siglas en inglés) y unas pocas con redes de periodo largo (LPG, por sus siglas en inglés); basándose principalmente en medidas de intensidad, fase y polarización; estos sensores pueden ser embebidos e interrogados remotamente, e incluso muchos de ellos se pueden implementar sobre una misma fibra óptica.

En el Perú, se aplicaron por primera vez sensores de fibra óptica tipo LPG en el 2015, para el monitoreo de vibraciones y la determinación del módulo de Young de algunos metales como: acero, aluminio, cobre y poliestireno, mediante la técnica de "viga en voladizo". Debido a los resultados obtenidos se señala que los sensores LPG pueden emplearse directamente en la caracterización dinámica de las propiedades elásticas de un material (Mosquera et al., 2015).

Salgado (2013) desarrolló un método de medición no intrusiva de la presión interna en tuberías usando redes de Bragg colocadas exteriormente, siendo esta una nueva técnica de medida del flujo en tuberías. El estudio de propagación de vibraciones en ductos y el uso de FBG como sensores, demostraron la viabilidad de estos para la medición de flujo.

Sensores de fibra óptica tipo LPG grabadas con láser de CO<sub>2</sub> fueron usados para medir la transmisión de carga y la curvatura del suelo causada por cargas superficiales. El módulo de Young determinado con esta técnica se mostró en el rango de valores correspondientes al tipo de suelo analizado (Mosquera & Basurto, 2018).

Mesa (2018) realizó el diseño, desarrollo, caracterización y análisis de sensores de fibras ópticas basados en redes FBG y en medidas interferométricas, con vistas a su aplicación en el estudio de materiales, principalmente en lo referido a cambios dimensionales, aparición de fisuras, entre otras.

Con base en las investigaciones mencionadas, el aporte del presente trabajo se centra en mostrar el empleo de sensores de fibra óptica de periodo largo (sensores LPG) en todas sus etapas, desde la fabricación de los sensores, su caracterización y optimización, hasta su aplicación en diferentes técnicas de medición como: desplazamientos, vibraciones mecánicas y medición de flujo.

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las diferentes aplicaciones que se le ha dado a la fibra óptica redundan en su mayoría a los sistemas de comunicación, reduciendo la atención de sus aplicaciones como sensores de medición. Sin embargo, la sensibilidad a la perturbación que poseen los sensores de fibra óptica ha dado origen a una amplia gama de aplicaciones en la ingeniería civil, dentro de los cuales los más estudiados son los sensores de fibra óptica de periodo corto (FBG) y enfocándose poco en los sensores de periodo largo (LPG). Debido a la complejidad para fabricar redes de Bragg, y frente a la necesidad de implementar nuevas metodologías para la obtención de parámetros de materiales en el Perú, resulta importante desarrollar de manera íntegra la aplicación de sensores LPG como alternativa de medición de diferentes parámetros físicos.

Es necesario contribuir con las aplicaciones basadas en la tecnología de fibra óptica en todas sus fases, comenzando por su fabricación, caracterización y optimización, a fin de garantizar el éxito en las mediciones que se realicen. Para ello, se requiere de una estrategia que permita analizar los datos, de manera que se logre transmitir la información aportada por los sensores en el momento y tiempo específico, y con las condiciones necesarias para obtener una buena lectura.

La importancia de esta investigación se centra en la aplicación de la tecnología de los sensores LPG debido a sus principales ventajas: tamaño pequeño, bajo costo, facilidad de gravado. La medición basada en sensores LPG constituyen métodos no invasivos y no destructivos.

El principal problema en este campo de investigación aplicada es la escasez de trabajos y publicaciones (artículos, tesis, textos) referidas a la aplicación de tecnología basada en sensores de fibra óptica en nuestro país, principalmente en cuanto a sus aplicaciones en el monitoreo de diferentes parámetros físicos.

### 1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

#### 1.3.1 Objetivo General

Validar la confiabilidad de la tecnología de los sensores de fibra óptica tipo LPG, mediante la comparación entre los valores medidos para parámetros físicos conocidos por la literatura o por otros métodos, con los obtenidos por la metodología propuesta en esta investigación.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Fabricación y caracterización de los sensores de fibra óptica tipo LPG.
- Medición de desplazamientos.
- Medición de vibraciones mecánicas para la determinación de los módulos de elasticidad flexural (MOE) de maderas peruanas.
- Determinación del flujo de agua en una tubería.

### 1.4 HIPÓTESIS DEL ESTUDIO

#### 1.4.1 Hipótesis General

Los resultados obtenidos en la medición de parámetros físicos empleando tecnología de los sensores de fibra óptica tipo LPG, están en buen acuerdo con aquellos obtenidos por otras técnicas convencionales.

#### 1.4.2 Hipótesis Específicas

- Es posible fabricar y caracterizar detalladamente los sensores LPG.
- Mediante la técnica de viga en voladizo y empleando sensores LPG, se puede determinar el módulo de elasticidad de diferentes sólidos: metales, maderas, acrílico, etc.
- Sensores LPG permiten medir desplazamientos.
- Se puede determinar el flujo de líquidos en una tubería mediante un sensor de fibra óptica tipo LPG.

## 1.5 METODOLOGÍA

En el desarrollo de la presente tesis, la metodología seguida es la siguiente:

- Recopilación de la información relacionada al tema de sensores LPG, enfocándose en su fabricación, caracterización y aplicaciones en el marco de esta tesis. Para ello se ha realizado una profunda revisión de tesis de pregrado y posgrado, libros y artículos de revistas académicas.
- Fabricación de fibras ópticas basadas en redes LPG, mediante la grabación de una red de periodo largo permanente en el cuerpo de una fibra óptica monomodo. La grabación de las redes fue realizada empleando un láser de CO<sub>2</sub> de 10 watts de potencia y 10,6  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. Para ello la fibra óptica es tensada, y sujeta a un soporte que se desplaza en forma controlada definiendo la periodicidad de la red LPG grabada, así como también, su longitud total. Las características de transmisión de la fibra óptica con la LPG grabada son observadas a fin de conocer su respuesta a cambios de curvatura y tracción.
- Aplicación de los sensores LPG. Para lograr este objetivo se aplicaron los sensores fabricados en las configuraciones correspondientes para medir cada parámetro de interés, siendo todos los ensayos no destructivos. Primeramente, se preparó el montaje de cada ensayo y se obtuvieron los registros con ayuda de un analizador de espectros ópticos (osciloscopio) en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil.
- Obtención de mediciones de acuerdo con los objetivos planteados. En la medición de desplazamientos se emplearon dos motores de paso que tensionaron la fibra óptica con la red LPG gravada, de manera que esta mostraba cambios en su transmitancia a diferentes desplazamientos. La medición de vibraciones se realizó con el fin de encontrar un parámetro característico como el Módulo de Elasticidad (MOE) en cinco tipos de madera. Para ello, se colocaron los especímenes a diferentes longitudes de voladizo. Finalmente, para la medición de velocidades de flujo en tuberías, el método utilizado fue el del estiramiento de la fibra óptica debido a la curvatura del soporte al que fue adherida. En este caso el soporte con el sensor LPG es colocado en voladizo de manera perpendicular a la dirección de flujo. El flujo es obtenido empleando un depósito vertical con salida a la

tubería, a partir de la cual se toman mediciones correspondientes a diferentes caudales.

- Los resultados obtenidos empleando sensores LPG en cada sistema, fueron comparados con los obtenidos por instrumentos alternativos. Para el caso de los desplazamientos, se comparó los resultados con los medidos usando un vernier. Los módulos de elasticidad flexural de diferentes maderas medidos con los sensores LPG fueron comparados con los obtenidos empleando un sensor de vibraciones comercial de la marca PASCO Instruments. Los valores de MOE obtenidos estuvieron de acuerdo con los reportados en la literatura. Por último, la medición de velocidad de flujo por el sensor LPG se comparó con el medido por un sensor comercial de Flujo tipo Arduino.
- Finalmente se muestran tablas comparativas acerca de los resultados obtenidos y los datos de referencia para cada caso en estudio.

## CAPÍTULO II: MARCOS TEÓRICO Y CONCEPTUAL

### 2.1 LA FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica (FO) es un hilo muy fino cuyo material puede ser vidrio o materiales plásticos, con la capacidad de guiar la luz a lo largo de su eje. El concepto de conducir la luz dentro de un dieléctrico viene desde que Lord Rayleigh comprobó matemáticamente la propagación de ondas y notó que los modos tipo TE (Transversal Eléctrico) y TM (Transversal Magnético) podían propagarse por las guías de onda, las cuales demostraron tener grandes ventajas como la alta capacidad de manejo de potencia y las bajas pérdidas (Lafuente, 2014).

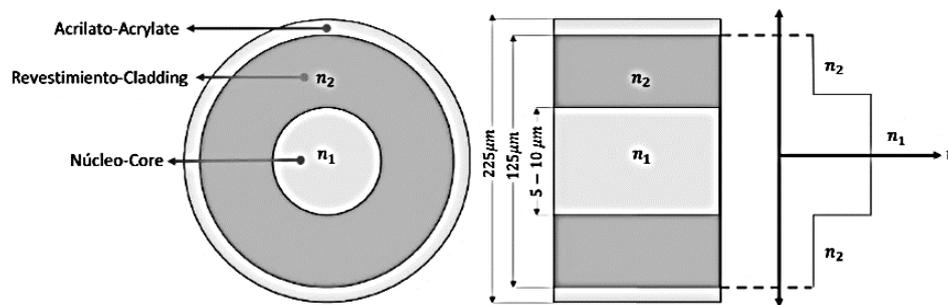


Figura N° 2.1 Estructura de una fibra óptica estándar. Tomado de Rojas (2019)

En la Figura N° 2.1 se muestra los tres interfaces que componen una fibra óptica estándar: núcleo, revestimiento y acrilato. En las FO 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 su diámetro varía según el tipo de propagación. La cubierta tiene un diámetro de 125 μm, posee un material similar y presenta un índice de refracción algo menor para satisfacer la ley de Snell. La última capa exterior, llamada también recubrimiento o buffer, está hecha a base de acrilato para dar a la fibra resistencia mecánica, protegiéndola frente a posibles daños y humedad; tiene un diámetro de 225 μm.

#### 2.1.1 Índice de Refracción ( $n$ )

Describe el cambio de velocidad de propagación de la luz que varía según el medio por el cual viaja y sigue la relación establecida en la ecuación (2.1):

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.1)$$

Donde:

$c$  : Velocidad de la luz en el vacío

$v$  : Velocidad de la luz en el medio

En general, el índice de refracción del núcleo  $n_1$  es superior al del revestimiento  $n_2$ . Esta diferencia hace que se mantenga y propague la luz transmitida en el núcleo, satisfaciéndose el principio de reflexión total interna.

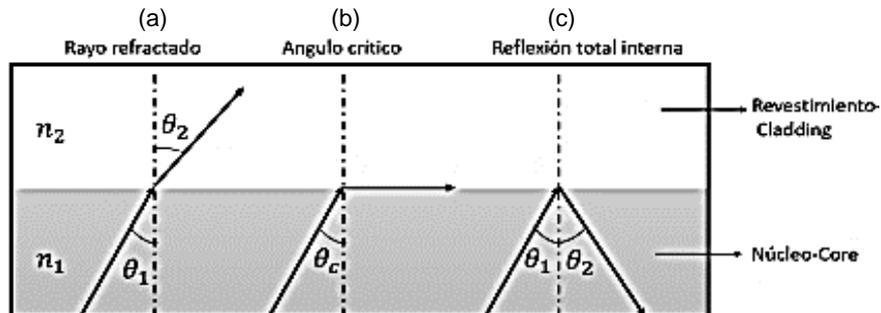


Figura N° 2.2 Reflexión total interna. Tomado de Rojas (2019)

En la Figura N° 2.2 (a), (b) y (c) se observan los tres casos específicos según la ley de Snell, que permiten explicar el fenómeno de reflexión interna. El primer caso (Figura 2.2(a)) considera que una onda electromagnética se propaga a través de un material con un índice de refracción ( $n_1$ ) y pasa a otro con un índice diferente ( $n_2$ ). La relación existente entre los índices de refracción se establece con la expresión matemática de la ley de Snell presentada en la ecuación (2.2) (Hecht, 2000):

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (2.2)$$

Donde:

- $n_1$  : Índice de refracción del núcleo
- $n_2$  : Índice de refracción del revestimiento
- $\theta_1$  : Ángulo de incidencia
- $\theta_2$  : Ángulo de luz refractada

### 2.1.2 Reflexión Total Interna (RTI)

Existe un fenómeno por el cual la luz no es capaz de viajar de un medio a otro y se le conoce como reflexión total interna. Como es el caso de las figuras 2.2(b) y 2.2(c) donde la luz viaja por el interfaz o se refleja por completo, respectivamente.

En el segundo caso (Figura N° 2.2(b)) se observa que el haz de luz viaja paralelamente al interfaz entre ambos medios, formando un ángulo  $\theta_2$  de  $90^\circ$ . Mientras que el ángulo  $\theta_1$  para este caso, cumple la condición mostrada en la ecuación (2.3) y se le denomina ángulo crítico  $\theta_c$ :

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

## 2.2 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

En general, las fibras ópticas se pueden clasificar según el material con el que se fabrican, el modo de propagación y por la estructura de su núcleo.

### 2.2.1 Según el Material de Fabricación

Según el material de fabricación, existen tres tipos:

- Plástico: Núcleo y Revestimiento
- Vidrio: Núcleo y Revestimiento (SCS = Silica Clad Silica)
- Vidrio: Núcleo y Plástico: Revestimiento (PCS = Plastic Clad Silica)

Las del primer tipo son flexibles y menos costosas, con una facilidad de instalación y resistencia, comparadas con las del segundo tipo; sin embargo, el vidrio propaga la luz más eficientemente que el de plástico. Motivo por el cual las fibras de plástico se suelen instalar a distancias menores que las de vidrio. Su selección dependerá de la aplicación que se le dé.

### 2.2.2 Según el Modo de Propagación

Se dividen en fibras monomodo (SMF, por sus siglas en inglés) y multimodo (MMF, por sus siglas en inglés). Modo significa trayectoria de propagación, por lo que si existe una sola trayectoria se le llamará "monomodo" y si tuviera más de una "multimodo".

#### 2.2.2.1 Fibra Óptica Multimodo (MMF)

La fibra multimodo fue la primera en fabricarse y comercializarse, que permite transportar haces de luz simultáneamente por diferentes modos. Para satisfacer la reflexión total interna (RTI), es decir, que las ondas que ingresen se propaguen en el interior del núcleo de la FO, las ondas deben ingresar con un ángulo máximo llamado también ángulo de aceptación ( $\theta_a$ ).

Al seno de este ángulo se le denomina apertura numérica (NA) de la fibra óptica, más adelante se detalla más sobre este tema.

La fibra multimodo posee un diámetro de núcleo más grande que el de una fibra monomodo. Esto permite que ocurra una gran cantidad de modos o trayectorias. La fuente de luz que se suele utilizar para estas fibras es un LED (Light Emitting Diode) y se suelen utilizar en aplicaciones a corta distancia.

Las fibras multimodo se clasifican en función al índice de refracción del núcleo en:

Fibra Multimodo de Índice Escalonado (Multimode Step Index):

Están fabricadas a base de vidrio, con una atenuación de 30 dB/km; o plástico, con una atenuación de 100 dB/km. Tienen una banda de paso que llega hasta los 40 MHz por kilómetro. El valor del índice de refracción del núcleo es mayor que el del revestimiento y ambos se mantienen constantes, por lo que se puede observar en la Figura 2.3 el cambio abrupto en el índice de refracción al pasar de una zona a otra.

Los valores típicos de NA están entre 0.2 y 0.5. Cuando el ángulo de incidencia tiene un seno menor a la apertura numérica, la luz se propaga por varios modos gracias al gran diámetro del núcleo que poseen este tipo de fibras, esto da lugar a la dispersión modal.

La dispersión modal es una característica en las fibras multimodo, la cual limita su ancho de banda debido al retraso que se produce en los diferentes modos de luz cuando viaja a través de la fibra.

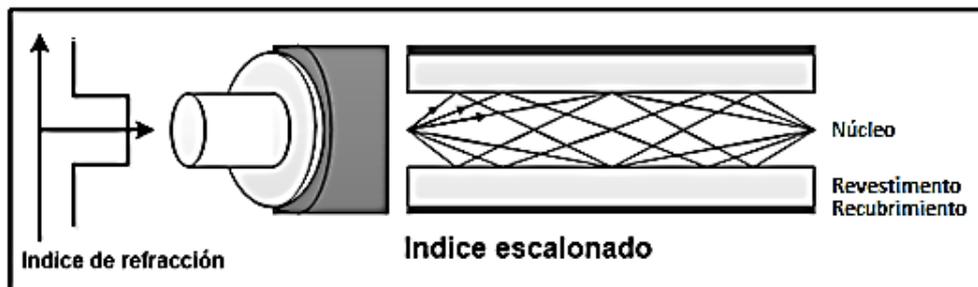


Figura N° 2.3 Fibra multimodo de índice escalonado. Tomado de Johnson (2009)

Fibra Multimodo de Índice Gradual (Multimode Graded Index):

Tienen una banda de paso que llega hasta los 500MHz/Km, su radio varía entre 50  $\mu\text{m}$  a 100  $\mu\text{m}$  de diámetro y un revestimiento de 125  $\mu\text{m}$ . La NA tiene un valor típico de 0,2 o ligeramente menor. Estas fibras provocan menos modos de propagación que las de índice escalonado, reduciendo la dispersión modal y con ello se consigue un aumento de ancho de banda.

El valor de índice de refracción del núcleo para este tipo de fibra es variable, pero la del revestimiento se mantienen constante. Tal como su nombre lo indica, el cambio en el índice de refracción en el interior de la fibra es gradual, varía disminuyendo desde su valor máximo  $n_1$  en el centro del núcleo, hasta un valor  $n_2$  en el límite con el revestimiento. Esta variación da lugar a que las trayectorias

de propagación de la luz sean curvas como se observa en la Figura 2.4 y no tramos rectos como en el caso de las fibras de índice escalonado.

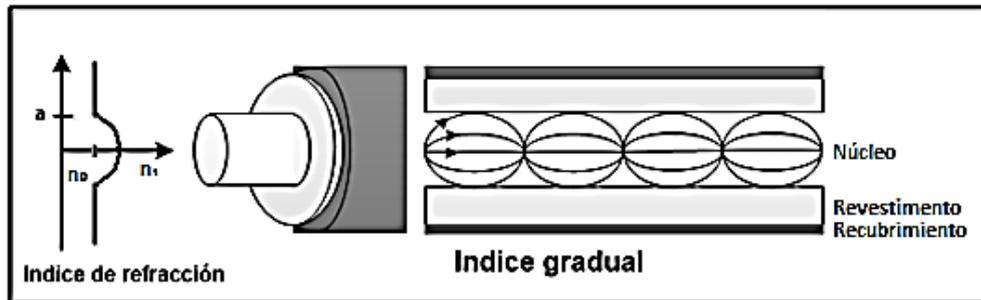


Figura N° 2.4 Fibra multimodo de índice gradual. Tomado de Johnson (2009)

### 2.2.2.2 Fibra Óptica Monomodo (SMF)

Generalmente, la fibra monomodo se caracteriza porque el diámetro de su núcleo es muy pequeño, menor a las 10  $\mu\text{m}$ . Potencialmente, esta es la fibra que ofrece la mayor capacidad de transporte de información y tiene un ancho de banda del orden de los 100 GHz/km (Filio & Mora, 2008). Los rayos de luz generados por un láser, ingresan y se propagan a lo largo del eje de la fibra siguiendo una trayectoria axial como se observa en la Figura 2.5.

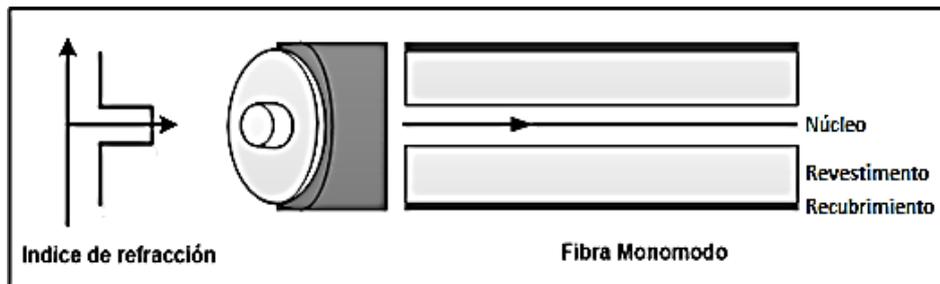


Figura N° 2.5 Fibra Monomodo (SMF). Tomado de Johnson (2009)

### 2.2.3 Según la Estructura del Núcleo

En la Figura N° 2.6 se muestra fibras con diferentes tipos de núcleo estructurado, las cuales fueron fabricadas en el Laboratorio de Fibras Especiales de la UNICAMP en Brasil por Mosquera en el 2016.

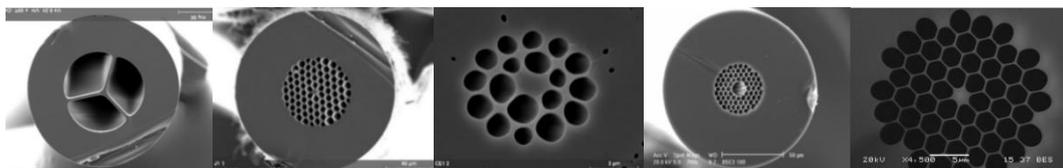


Figura N° 2.6 Fibras de núcleo estructurado. Tomado de Mosquera (2018)

### 2.3 GUIADO DE LUZ EN FIBRA ÓPTICA

El guiado de luz hace referencia al modo de propagación, que es una configuración de campo electromagnético que se propaga sin cambio a lo largo de la fibra, con una velocidad de fase " $v_{ph}$ " dada por (Hecht, 2000):

$$n_{eff} = \frac{c}{v_{ph}} \quad (2.4)$$

La constante de propagación " $\beta$ " está relacionada al índice efectivo de la fibra óptica, por la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff} = k n_{eff} = \frac{\omega}{c} n_{eff} \quad (2.5)$$

Los modos de la constante de propagación pueden ser clasificados como:

- Modos ligados: Son localizados, con la mayor parte de su potencia cercana al núcleo. Pueden tener formas complicadas pero su potencia decae exponencialmente con el radio. Los modos de radiación y ligados tienen constantes de propagación reales, pueden propagarse indefinidamente, sin pérdidas.
- Modos de radiación: Son deslocalizados, su perfil de intensidad no decae muy rápidamente. Los modos débilmente ligados tienen constantes de propagación complejas, también 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, no se propagan y decaen exponencialmente en la distancia de unas pocas longitudes de onda.

Las fibras convencionales soportan todos los tipos de modos; sin embargo, en muchas situaciones solo los modos ligados y de radiación son relevantes.

#### 2.3.1 Degeneración, Polarización y Birrefringencia

Los modos se denominan degenerados cuando para dos o más modos el índice de refracción efectivo es el mismo. La degeneración puede ser causada por simetría de la guía de onda o accidentalmente; en el primer caso, los modos son degenerados para todas las longitudes de onda; mientras que, en el segundo caso, no existe simetría, pero los modos tienen el mismo índice para longitudes

de onda específicas. Los perfiles de intensidad y estados de polarización de los modos degenerados accidentalmente no están necesariamente relacionados.

Es importante conocer la degeneración para entender los efectos de las perturbaciones. Si una perturbación no mantiene su simetría, se rompe la degeneración en dos modos con índices efectivos cercanos, sus propiedades son similares, pero con diferentes estados de polarización. Una fibra es llamada "birrefringente" cuando los modos tienen perfiles de intensidad iguales, pero diferentes estados de polarización y viajan a diferentes velocidades dentro la fibra.

### 2.3.2 Guiado Débil

Las fibras convencionales tienen una diferencia relativamente pequeña entre los valores de índice refractivo del núcleo y el de su revestimiento. En fibras de sílice, de índice de paso, los índices de su núcleo y cubierta son 1,48 y 1,46 respectivamente, mientras que para fibras de polímeros el contraste es de 1,49 y 1,41; en ambos casos, la diferencia es lo suficientemente pequeña para poder usar el modelo de guiado débil. La aproximación de guiado débil reduce las ecuaciones de Maxwell para E y H a una sola ecuación escalar (Snyder & Love, 1983).

### 2.3.3 Conteo de modos

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

$$N_{modos} \approx \frac{1}{2} V^2 \quad (2.3)$$

Una apropiada generalización para el parámetro V es la siguiente (Snyder & Love, 1983):

$$V_{eff} = \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ 2 \int_0^\infty [n^2(r) - n_{cl}^2(r)] r dr \right\}^{1/2} \quad (2.4)$$

Los modos ligados deben tener índices efectivos en el rango:

$$n_{cl} < n_{eff} < n_{m\acute{a}x} \quad (2.5)$$

Donde:

$n_{m\acute{a}x}$  : Mayor índice en la fibra

$n_{cl}$  : Índice del revestimiento

$n_{eff}$  : Índice efectivo

Este rango se puede entender en términos de velocidades de fase, la velocidad de fase más lenta corresponde a un índice refractivo más alto y una velocidad de fase que sea la 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.

### 2.3.4 Apertura numérica (NA)

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. En la Figura 2.7 se muestra el ángulo central del cono llamado ángulo de aceptación,  $\theta_{máx}$ . y el número de abertura NA definido en función de este ángulo:

$$NA = n_0 \sin \theta_{máx} \quad (2.6)$$

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

$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} \quad (2.7)$$

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.

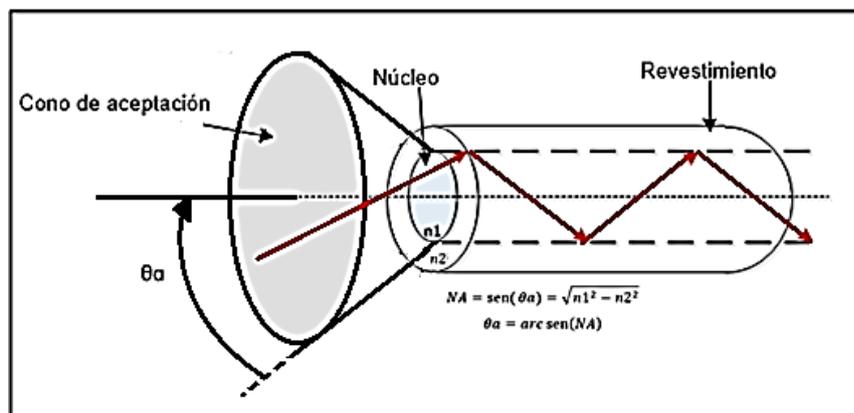


Figura N° 2.7 Apertura Numérica (NA) y Ángulo de aceptación. Tomado de Arévalo (2014)

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.

### 2.3.5 Ancho de Banda y Dispersión

Aplicaciones como TVHD (Televisión de Alta Definición), requieren anchos de banda de hasta algunos Gigabits/s con un núcleo relativamente grande para hacer fácil la conectividad. En estas aplicaciones, la dispersión puede influenciar significativamente la propagación de pulsos, los cuales contienen un rango de frecuencias que cuando viajan a diferentes velocidades. La forma del pulso cambia desencadenando en errores de detección del bit.

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, donde se usan diferentes tipos de codificación para indicar cuando un 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 en un tiempo  $T$ , con el pulso ocupando la mitad del tiempo  $T/2$  (la otra mitad es el retorno a cero).

Por lo tanto, el ancho de banda máximo posible es  $\leq 1/T$  y la velocidad de data el máxima es  $R = 1 \text{ bit} / T$ . En NRZ, la codificación del bit ocupa la longitud entera del pulso  $T$ . En este caso el ancho de banda de trasmisión 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  $\delta\tau$ .

La dispersión total en la fibra óptica es la suma de los diferentes tipos de dispersión y estos son:

- Dispersión modal
- Dispersión cromática
  - Dispersión del material
  - Dispersión de guía de onda
- Dispersión de modo de polarización

### 2.3.6 Dispersión Modal ( $\tau_m$ )

Es la más significativa de las dispersiones sólo ocurre en fibras multimodo, pero se puede reducir considerablemente en fibras de índice graduado.

Ocurre cuando diferentes rayos de luz llegan al final de la fibra en diferentes tiempos debido a sus trayectorias diferentes como se muestra en la Figura N° 2.8, donde debido al solapamiento a causa de la dispersión, el receptor no podrá distinguir donde empieza un pulso y donde acaba el otro, limitando de esta forma el ancho de banda para una longitud de fibra determinada.

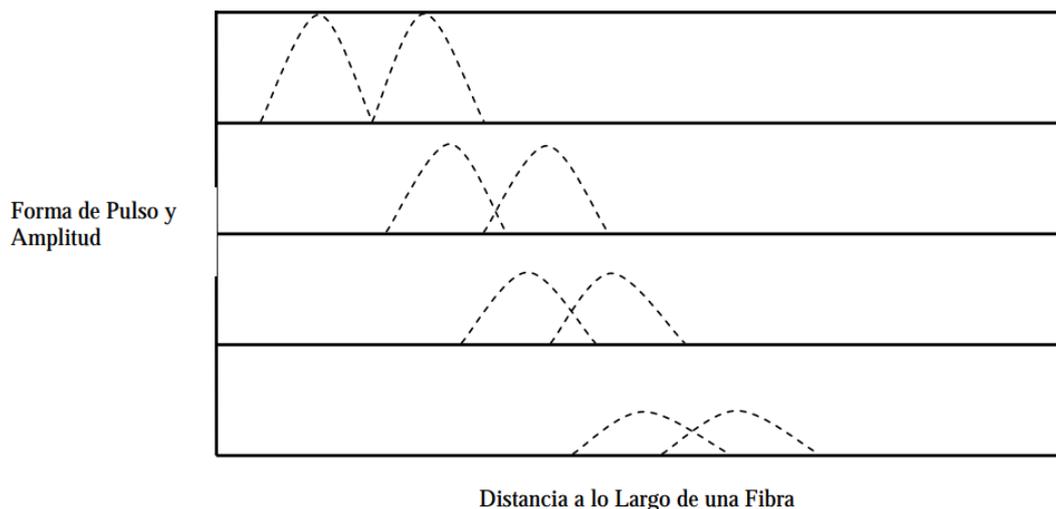


Figura N° 2.8 Ensanchamiento y Atenuación de dos pulsos adyacentes. Tomado de Desirena (2004)

### 2.3.7 Dispersión Cromática

La dispersión cromática puede ser causada por dispersión del material y dispersión de guiado; el primer caso se debe al material con un índice refractivo ligeramente distinto a diferentes longitudes de onda; el segundo, debido a las características geométricas de la guía de onda.

#### 2.3.7.1 Dispersión cromática del material ( $\tau_e$ )

Ocurre tanto en fibras monomodo como multimodo. Ocurre debido a la variación del índice de refracción como una función no lineal de la longitud de onda, esto es ejemplificado en la Figura N° 2.9. Esta es la principal causa de la dispersión cromática, ya que depende intrínsecamente del material. Afecta tanto a fibras multimodo como monomodo.

Estos efectos originan un ensanchamiento del pulso  $\delta\tau_{intra}$ . Así, un pulso propagándose a través de una fibra es ensanchada, dando como resultado la distorsión de la señal.

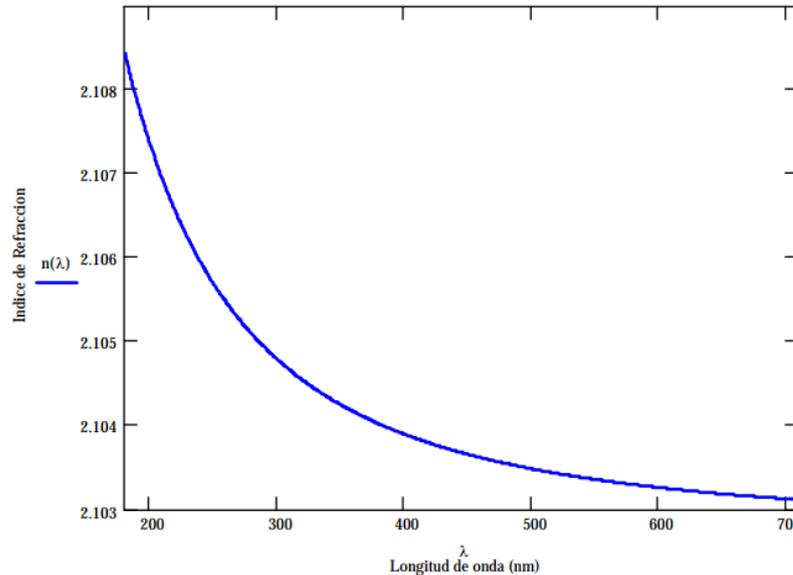


Figura N° 2.9 Variación de Índice de Refracción. Adaptado de Desirena (2004)

### 2.3.7.2 Dispersión cromática de guía de onda ( $\tau_g$ )

Se presenta de manera significativa solo en fibras monomodo, se origina debido a que, si bien la mayoría de la energía en una fibra monomodo se propaga por el núcleo, existe una porción de energía, aproximadamente el 20% (Román, 2010), que se propaga a través del revestimiento. Este, al tener un índice de refracción menor la energía, se propagará a mayor velocidad que la energía que se propaga por el núcleo y por ende esta porción del pulso llegará con distinto retardo al receptor. El grado de dispersión dependerá de la proporción de energía luminosa contenida en el revestimiento.

Los diferentes modos viajan a diferentes velocidades y perturbaciones en la fibra, ocasionando que los pulsos en estas fibras se ensanchen o separen en sus componentes. Esto se llama 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:

$$\delta\tau_{total} = \sqrt{\delta\tau_{intra}^2 + \delta\tau_{inter}^2} \quad (2.8)$$

### 2.3.8 Dispersión de modo de polarización (PMD)

Este tipo de dispersión ocurre solo en fibras monomodo y limita a los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad ( $\geq 10$  Gbps) y de larga distancia, provocando un aumento de la tasa de bit erróneo (BER) por la interferencia correspondiente al ensanchamiento de pulsos.

La dispersión de modo de polarización ocurre cuando los dos componentes ortogonales de polarización de una FO, denominados modos de polarización recorren la fibra a diferentes velocidades, llegando en distintos tiempos al final de la fibra óptica, ensanchando y distorsionando los pulsos.

#### 2.3.8.1 Velocidad de Grupo

La velocidad de propagación de un pulso está determinada no solo 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:

$$\frac{1}{v_g} = \frac{\partial \beta}{\partial \omega} \quad (2.9)$$

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:

$$n_g = \frac{c}{v_g} \quad (2.10)$$

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  $c$ :

$$D_\lambda = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (2.11)$$

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:

$$\delta\tau_{total} = \sqrt{D_\lambda^2 \Delta\lambda^2 + \delta\tau_{inter}^2} \quad (2.12)$$

La variación de velocidad de grupo se produce por las características birrefringentes del medio de transmisión (la fibra óptica), es decir, cada modo de polarización de la luz se propagará en un medio con un valor distinto de índice de refracción (véase la Figura N° 2.10), lo que implica que la señal original se comporte como dos ondas independientes que viajan a velocidades diferentes a lo largo de la fibra óptica (Leiva et al., 2007).

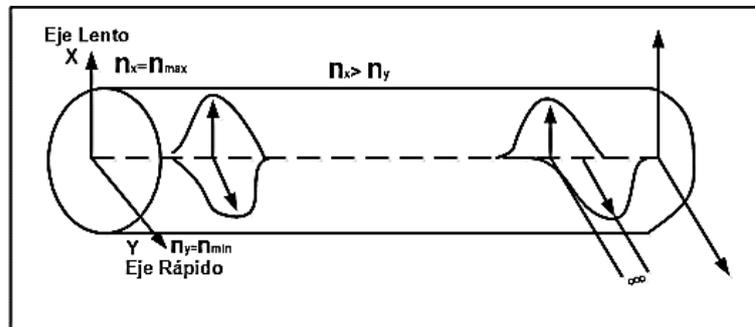


Figura N° 2.10 Propagación de dos modos de polarización en una FO birrefringente. Tomado de Leiva et al. (2007)

### 2.3.9 Dispersión Total ( $\tau$ )

La dispersión total se denota con la siguiente ecuación:

$$\tau^2 = \tau_m^2 + (\tau_e + \tau_g)^2 \quad (2.13)$$

Donde para la fibra óptica multimodo se considera únicamente la dispersión modal, y para la monomodo, la dispersión modal es nula.

### 2.3.10 Ancho de banda de transmisión ( $w$ )

El ancho de banda asociado a una fibra óptica viene dado por:

$$AB = \frac{0.5}{\tau} \quad (2.14)$$

Donde:

$AB$  : Ancho de banda expresado en Ghz.Km

$\tau$  : Dispersión total expresada en ns

## 2.4 TRANSFERENCIA DE POTENCIA EN FIBRAS MULTIMODO

Las perturbaciones del resultado del proceso de fabricación o por 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.

#### 2.4.1 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.

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 N° 2.11, inicialmente el ensanchamiento del pulso es lineal, pero al alcanzar el equilibrio tiene una dependencia del tipo  $\sqrt{L}$ :

$$\begin{aligned} \delta\tau_{inter} &= \delta_0 L, & L \ll L_e \\ \delta\tau_{inter} &= \delta_0 \sqrt{L L_e}, & L \gg L_e \end{aligned} \quad (2.15)$$

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

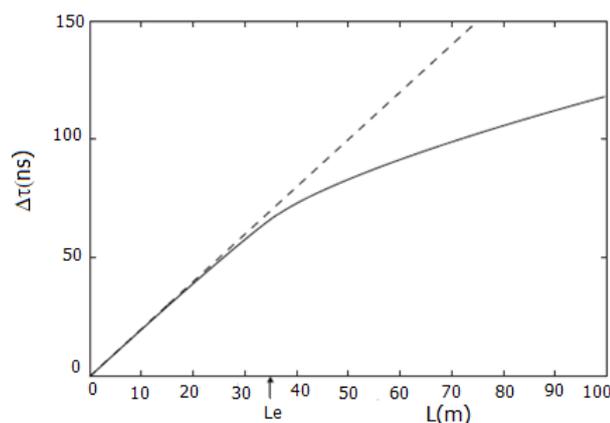


Figura N° 2.11 Ensanchamiento del pulso. Tomado de Mosquera (2018)

## 2.5 MECANISMOS DE ATENUACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS

La atenuación de la luz o pérdida al propagarse a lo largo de la fibra óptica puede ser causada por varios factores, pero de manera general se clasifican como intrínsecos y extrínsecos. Algunas pérdidas de manera intrínseca son provocadas por la composición inherentemente presente en la fibra (vidrio), mientras que la atenuación extrínseca es causada por mecanismos externos, como la flexión.

La atenuación de la señal es una consideración importante en el diseño de sistemas de comunicación. La tasa de atenuación se refiere a la pérdida de potencia en unidades de dB/Km de fibra y se expresa de la siguiente manera.

$$\alpha = 10 \log \frac{P_{entrada}/P_{sal}}{L} \quad (2.15)$$

Donde:

$P_{entrada}$  : Potencia de entrada

$P_{sal}$  : Potencia de salida

$\alpha$  : Coeficiente de atenuación

$L$  : Longitud que recorre la luz

### 2.5.1 Atenuación Intrínseca

Esta pérdida es inherente a la fibra, debido a que es provocada por las impurezas e irregularidades dentro del vidrio durante el proceso de fabricación, en donde no es posible eliminar todas las impurezas. Cuando la señal de luz que se propaga a través del núcleo de la fibra llega a una impureza pueden ocurrir dos cosas: se absorbe o se dispersa.

#### 2.5.1.1 Atenuación Intrínseca por absorción

Se produce como resultado de las impurezas e imperfecciones en la fibra óptica, estas absorben la luz transportada y la convierten en calor. En general, las pérdidas por absorción se originan por los rayos ultravioletas, rayos infrarrojos y la impureza más común se debe a la presencia de iones hidroxilo  $\text{OH}^{-1}$ .

- Pérdidas por absorción ultravioleta: Se debe a los saltos producidos en la excitación electrónica (cambio de nivel de un electrón), los cuales provocan la absorción de energía y pérdidas. Este tipo de pérdida disminuye conforme la longitud de onda crece, por eso para longitudes por encima de 1000nm la pérdida es casi nula.

- Pérdidas por absorción de infrarrojos: Los fotones absorbidos por los átomos de las moléculas del núcleo se convierten en vibraciones mecánicas aleatorias. Este tipo de absorción crece exponencialmente con la longitud de onda y es despreciable para valores menores a 1400nm.
- Absorción por resonancia de iones hidroxilo: Los iones hidroxilo se originan debido a la presencia de restos de vapor de agua que ingresan en la fibra óptica durante la fabricación. Estas pérdidas son significativas en longitudes de onda cercanas a 1400nm.

La Figura 2.12 muestra las pérdidas características en fibra óptica, debido a las diferentes atenuaciones por absorción.

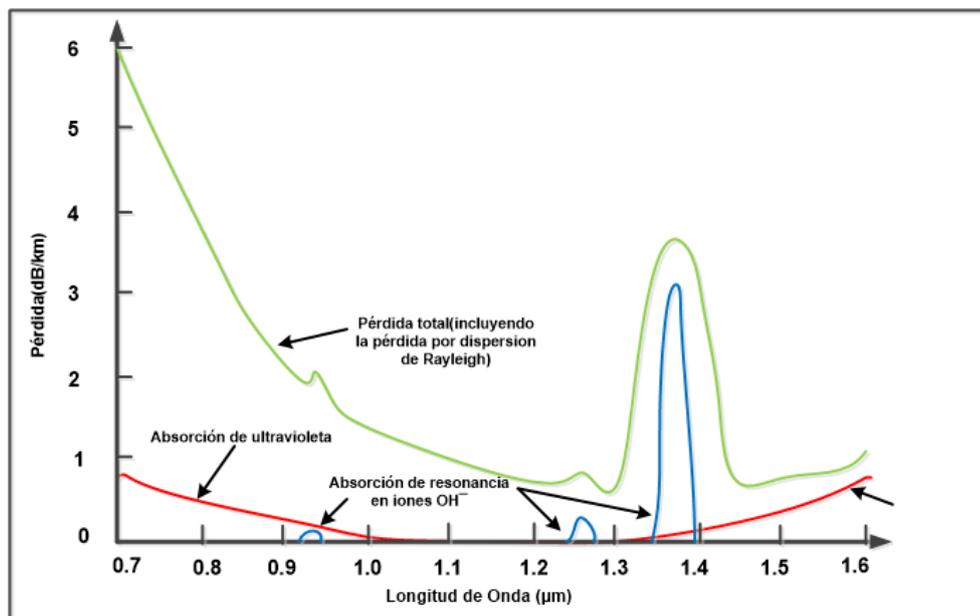


Figura N° 2.12 Curva de pérdidas por Absorción. Tomado de Wayne (2003)

### 2.5.1.2 Pérdidas Intrínsecas por Scattering

Son provocadas por obstrucciones y daños sub-microscópicos que cambian ligeramente el índice de refracción.

#### Pérdidas por Scattering de Rayleigh

Estas pérdidas se denominan también como pérdidas por esparcimiento o dispersión de Rayleigh, debido a que el rayo incidente se dispersa en muchas direcciones. Se produce cuando los rayos que viajan a través de la fibra chocan con partículas cuyo diámetro es mucho menor que la longitud de onda de la señal

óptica. Una parte de estos rayos se difractan y escapa a través del revestimiento, mientras que la otra parte continúa su recorrido en el núcleo de la fibra.

Las pérdidas de este tipo tienen mayor influencia en longitudes de onda entre 400nm y 1100nm, por lo que se debe utilizar longitudes de onda mayores.

Las pérdidas por dispersión de Rayleigh representan la mayor parte de la atenuación de una fibra óptica. En la Tabla 2.1 se muestran los valores de pérdidas intrínsecas típicas para longitudes de onda de 1300nm y 1550nm (Román, 2010):

Tabla N° 2.1 Pérdidas intrínsecas típicas. Adaptado de Román (2010)

$\lambda$ (nm)	Absorción (dB/km)	Rayleigh (dB/km)
1300	0.05	0.25
1550	0.09	0.15

### Pérdidas por Scattering de Mie

Se produce cuando los rayos que viajan a través de la fibra chocan con partículas extrañas al medio, cuyo diámetro es similar a la longitud de onda de la señal óptica, provocando que se esparza hacia adelante.

Actualmente, este tipo de pérdidas provocadas por imperfecciones como: burbujas, variaciones de diámetro o en el interfaz, están prácticamente eliminadas durante el proceso de fabricación de la fibra óptica.

### 2.5.2 Atenuación Extrínseca

Existen factores externos que influyen en la atenuación total de una señal óptica. Pueden ser originadas por impurezas, defectos de geometría, defectos de cableado o curvatura.

#### 2.5.2.1 Pérdidas por macro-curvatura

En condiciones dinámicas durante el cableado de la fibra óptica, la fibra suele someterse a curvaturas que provocan que la luz se refleje en diferentes puntos de la fibra, los modos escapan del núcleo superando el ángulo máximo de incidencia admitido para mantener la reflexión total interna. Por lo tanto, el radio de curvatura mínimo no debe excederse.

Este tipo de atenuación crece exponencialmente con el radio de curvatura y se toma en cuenta cuando el radio crítico es superado.

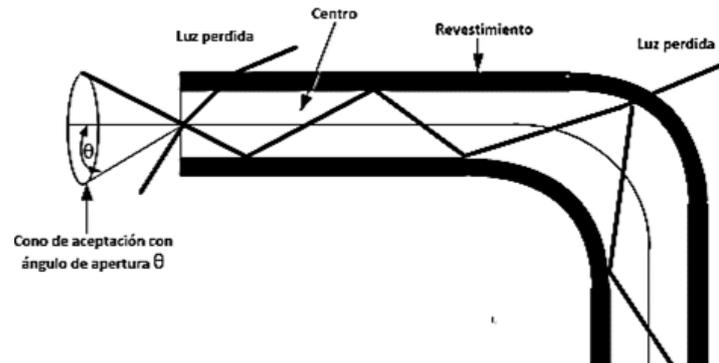


Figura N° 2.13 Pérdidas por macro-curvatura. Tomado de Criollo (2015)

### 2.5.2.2 Pérdidas por micro-curvatura

Este tipo de pérdida es causada por imperfecciones geométricas, irregularidades entre el núcleo, y revestimiento o cambios en el diámetro del núcleo (error de elipticidad).

Las pérdidas por micro curvatura son considerables cuando las irregularidades consecutivas se separan una distancia menor a la longitud de onda. A fin de reducir estas pérdidas ópticas, se puede disminuir los esfuerzos mecánicos, aumentar la sección de la fibra, o aumentar la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y revestimiento.

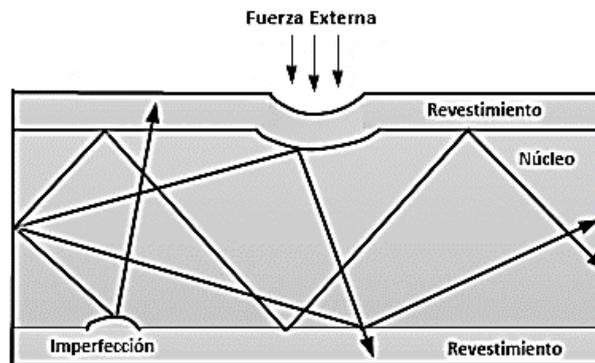


Figura N° 2.14 Pérdidas por micro-curvatura. Tomado de Pinchi (2016)

## 2.6 FABRICACIÓN DE FIBRAS ÓPTICAS

La fabricación de fibras ópticas estándar consiste básicamente en calentar sílice, arena y otros compuestos químicos hasta que se fundan y mezclen. Primero, se realiza la creación de una preforma o barra con esta mezcla, seguido del calentamiento y estiramiento de la preforma hasta obtener la fibra final. El estiramiento se realiza con una máquina de calentamiento, de forma que la fibra

de vidrio se convierta en plástico y alcance diámetros pequeños. La temperatura adecuada para reblandecer el vidrio se sitúa entre los 800 y 1200°C.

Los elementos químicos que son incorporados son el  $\text{GeO}_2$  y el  $\text{P}_2\text{O}_5$ , estos ayudan a incrementar el índice de refracción de sílice que está situada en el núcleo. Mientras que, el  $\text{B}_2\text{O}_3$  y F son utilizados para disminuir el índice de refracción de sílice del revestimiento de la fibra.

### 2.6.1 Metodologías de fabricación

Existen dos técnicas básicas para la fabricación de fibras ópticas, las cuales son: el proceso de vapores oxidados y el método de fusión directa, esta última se realiza con fibras hechas directamente del molde. En el proceso de vapores oxidados, los vapores de metales haluros reaccionan con el oxígeno para formar un polvo blanco de partículas de  $\text{SiO}_2$ . Estas partículas son colectadas sobre las superficies de un vidrio voluminoso formando un tubo llamado preforma.

#### 2.6.1.1 Deposición Externa de Vapores (OVDP)

Este proceso fue desarrollado por la Carning glass Works y fue el primero en lograr atenuaciones inferiores a 20 dB/Km. Actualmente, se logran atenuaciones mucho menores.

El proceso se divide en dos partes, por un lado, la creación de una preforma y por otro el estirado de la preforma. Para todos los métodos el estirado es el mismo, por lo que solo se explicará una vez, más adelante.

La creación de la preforma parte de un sustrato sobre el que se hace crecer la fibra de sílice, a lo largo de la cual se mueve un quemador en forma transversal; es decir, una capa de partículas de  $\text{SiO}_2$  llamada hollín es depositada de un quemador sobre un grafito rotatorio. El vidrio es adherido capa por capa hasta formar una preforma de vidrio cilindro. La composición vítrea y la dimensión deseada para el núcleo y el revestimiento pueden ser incorporadas en el interior de la preforma, siempre y cuando se controle el vapor de haluro metálico durante el proceso de deposición.

Cuando el proceso de deposición es completado, la barra es removida y el tubo lleno de poros es entonces vitrificado en una atmósfera seca con una temperatura alta para limpiar las preformas, la Figura 2.15 muestra el proceso de OVPO.

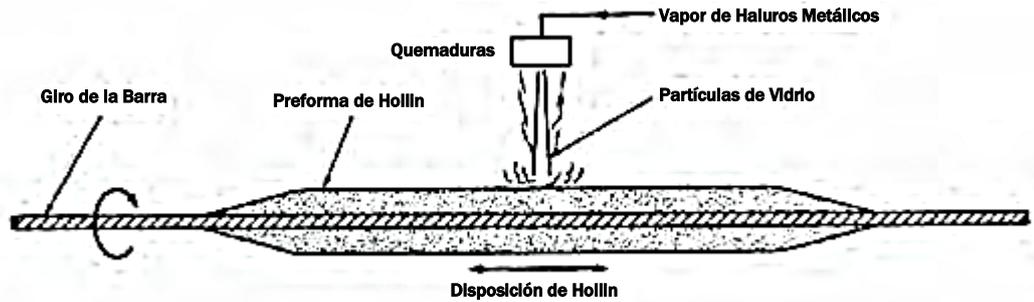


Figura N° 2.15 Preparación de una Preforma para el Proceso OVPO. Tomado de Judd (1962)

### 2.6.1.2 Deposición Axial de Vapores (VAD)

Este proceso se realiza en una cámara de reacción, en la cual se colocan los tubos que alimentan los reactivos en contraposición de la preforma. Los quemadores son tubos coaxiales cilíndricos de sílice donde el material a reaccionar ( $\text{SiCl}_4 + \text{O}_2$ ) penetra por el tubo central y los gases para la combustión ( $\text{O}_2 + \text{H}_2$ ) por el exterior.

El perfil del índice de refracción se controla con la temperatura de la cámara, así como el flujo de material, la velocidad de rotación para mantener la uniformidad geométrica, y la posición entre los quemadores y la preforma. La cámara de calentamiento posterior produce el colapsado de la preforma porosa dando lugar a la preforma transparente, en la Figura 2.16 se muestra la máquina para este proceso.

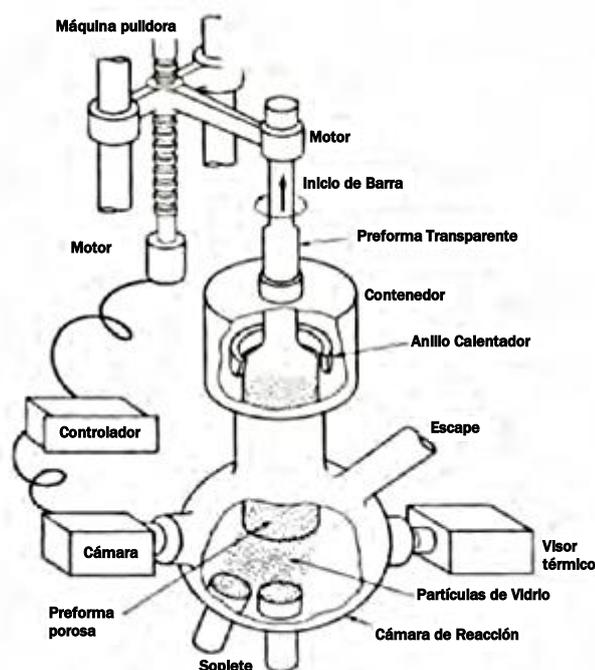
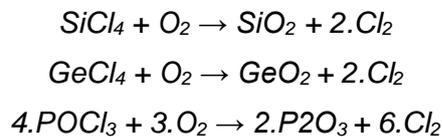


Figura N° 2.16 Máquina para el proceso de VAD. Tomado de Campbell (2000)

### 2.6.1.3 Deposito modificada de vapores químicos (MCVD)

Este proceso se realiza sobre un tubo de cuarzo puro que actúa de sustrato. El tubo se coloca en un entorno que controla la rotación, donde la deposición resulta ser capa por capa. La elevada temperatura en el interior del tubo es alcanzada por la hidrólisis de una llama de H<sub>2</sub>+O<sub>2</sub>. La reacción de oxidación es:



El perfil del índice de refracción deseado se logra variando la composición de la reacción para cada capa. En la figura 2.17 se muestra como la fabricación de la preforma por esta metodología.

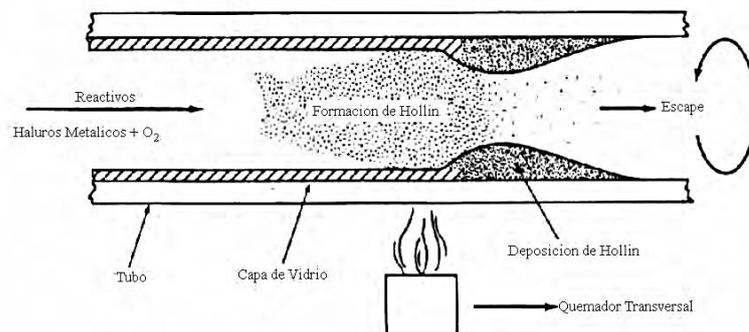


Figura N° 2.17 Diagrama del proceso de MCVD. Tomado de Judd (1962)

### 2.6.1.4 Método del doble crisol

Consiste en dos crisoles concéntricos fabricados de platino o sílice, como se muestra en la Figura 2.18.

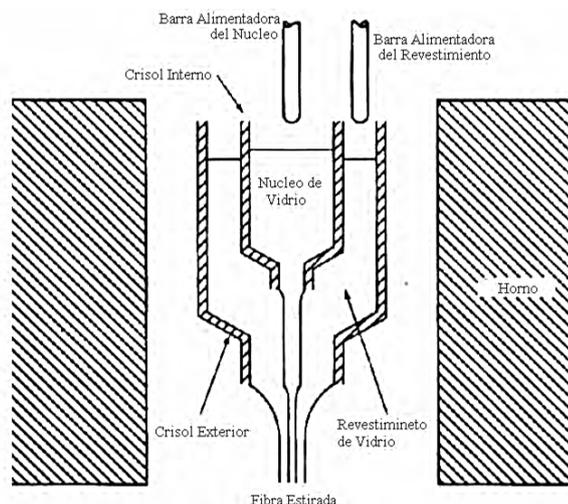


Figura N° 2.18 Método del Doble Crisol. Tomado de Campbell (2000)

El orificio inferior del crisol interior se diseña en función de la FO deseada. El material se introduce en forma de varilla, de forma que la alimentación del crisol puede ser continua. La geometría del perfil del índice de refracción se gradúa con la posición relativa de los orificios de salida de ambos crisoles. Así, un acercamiento pronunciado entre ambos orificios produce una mezcla reducida de los componentes del recubrimiento en el crisol exterior y del núcleo en el interior.

La viscosidad del material se lleva a un valor adecuado para el estirado mediante un horno de RF. El perfil del índice de refracción se ajusta mediante la posición relativa de los crisoles. Por ejemplo, una separación amplia produce mezcla en los vidrios de ambos crisoles, lo cual corresponde a un perfil gradual. Tanto la velocidad de estirado como la temperatura del horno permiten también controlar la mezcla de materiales y por lo tanto el tipo de perfil de índice. El estirado de la FO se efectúa enrollando a la misma en un tambor giratorio colocado debajo del doble crisol. Los mejores valores conseguidos con este método son de 4 dB/km.

#### 2.6.1.5 Fabricación de fibras PCF

Las primeras fibras ópticas micro estructuradas fueron hechas de sílice (Knight et al., 1996) con las proformas hechas a mano, apilando capilares. En la Figura N° 2.19 se muestran los capilares que luego son apilados formando la estructura deseada en una torre de estiramiento convencional. 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.



Figura N° 2.19 Capilares apilados con núcleo de sílice. Tomado por Mosquera (2016)

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. Las primeras fibras hechas de capilares apilados PMMA fueron reportadas 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. Una estructura empaquetada hexagonal de 6 capas con un alto grado de regularidad fue producida por Huang (2004).

En el estirado de la fibra, una preforma estructurada de mayor escala es reducida a fibra de dimensiones reducidas. La preforma es introducida en un horno tal que alcance su temperatura de transición y pueda ser deformada rápidamente. 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 (Mosquera, 2019). El diseño y operación del horno son entonces claves para cualquier torre de jalado de fibra mPOF (Figura N° 2.20).



Figura N° 2.20 Torre de estiramiento de preformas mPOF. Tomado por Mosquera (2019)

## 2.7 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Están basados en el principio de propagación de la luz a través de un medio. En general, los sensores son dispositivos transductores, desarrollados para cuantificar, medir y trasladar magnitudes en un dominio eléctrico.

Los componentes de los sensores de fibra óptica pueden estar o no integrados, se componen principalmente por (Figura N° 2.21):

- Transductor Óptico
- Canal de comunicaciones
- Unidad Optoelectrónica

La Figura N°2.21 muestra los tres componentes que posee todo sensor de fibra óptica.



Figura N° 2.21 Componentes de un sensor de fibra óptica. Adaptado de Criollo (2015)

El transductor óptico es en general un subsistema que determina y caracteriza al sensor. Un sensor óptico es aquel que introduce variables a sensar, que modifican algunas características de la luz en el sistema óptico. La luz transmitida o reflejada puede ser modulada con características de amplitud, fase, frecuencia o polarización (Salgado, 2013).

### 2.7.1 Ventajas y Desventajas de los Sensores de FO

Diversos estudios afirman que los sensores de fibra óptica presentan muchas ventajas frente a sensores de otros tipos, como:

- Pueden trabajar en diversos entornos, incluso en aquellos donde los sensores típicos no, puesto que no son afectados por la interferencia electromagnética (EMI) ni por la radiofrecuencia (RFI).
- Pueden ubicarse en lugares con riesgo de explosión, no portan corriente eléctrica, solo luz.
- Se pueden utilizar a gran distancia; debido a su atenuación baja, no requiere de repetidores.
- Es más sensible que los sensores sin fibra óptica.
- Posee mayor capacidad de transportar información en menos espacio.

Dentro de sus desventajas, se puede mencionar:

- Son frágiles y requieren mayor cuidado para su manipulación e instalación.
- Es necesario realizar una conversión electroóptica.

Una vez reconocidas las ventajas y desventajas, se puede decir que los sensores de fibra óptica poseen diferentes características que los convencionales, las mismas que hacen que se puedan desenvolver en otros campos.

### 2.7.2 Tipos de Sensores de Fibra Óptica

Existen muchas maneras de clasificarlos, siendo las de nuestro interés los sensores modulados (SM) basados en el principio de funcionamiento, dentro de los cuales tenemos Sensores Modulados:

- En amplitud o intensidad: detección mediante la potencia luminosa.
- En fase o interferométrico: detección a través de la fase del haz luminoso.
- En polarización: detección de cambios en la polarización de la luz.
- Espectralmente: detección de cambios en longitud de onda de la luz.

A continuación, Se realizará una descripción breve de dos de algunos de estos.

#### 2.7.2.1 Sensores modulados en amplitud o intensidad

Dentro de estos se puede considerar otros sensores llamados de onda evanescente, pues también detecta cambios de intensidad lumínica. En este tipo de sensores, la luz de fuente óptica con intensidad constante viaja a través del elemento a sensor, el cual modula su amplitud, mediante la absorción o dispersión. Dentro de ellos se puede encontrar, un emisor LED, los usados para medir PH, vibraciones, etc.

#### 2.7.2.2 Sensores modulados en fase o interferométricos

Este tipo de sensores utilizan cambios en la fase de la luz, mediante los cuales detectan los cambios en los parámetros sensados. Por lo tanto, se detecta la señal de modulación de fase interferométrica, comparando una señal y una fase de referencia.

Esto ocurre cuando en un interferómetro la luz se divide en dos haces, donde uno está lejos del lugar de sensado, y el otro cerca. Seguidamente, estos haces se combinan y generan una señal resultante del parámetro que se está midiendo.

Como ejemplo, se puede mencionar a los interferómetros de Mach – Zehnder, Michelson y Fabry Perot, dentro de los cuales están los de deformación, velocidad angular (giroscopio), desplazamientos, etc. En la Figura N° 2.22 se muestra los componentes de un interferómetro de Fabry Perot, donde S es la cavidad, R2 es la interfase segunda y R1 permite que la luz se introduzca dentro de la fibra monomodo (Salgado, 2013).

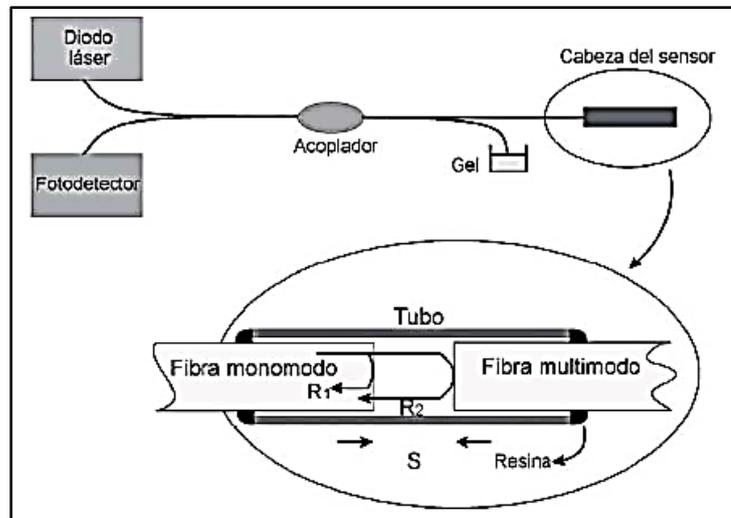


Figura N° 2.22 Esquema de un sensor bajo interferómetro Fabry Perot. Tomado de Salgado (2013)

### 2.7.3 Aplicaciones de los Sensores de Fibra Óptica

En las últimas décadas, el uso de sensores de fibra óptica ha ido incrementando, debido a que la industria que estimula su desarrollo y mejoras (telecomunicaciones) viene cubriendo un crecimiento rápido. Esto a su vez se ve beneficiado, ya que los sensores de fibra óptica pueden operar bajo condiciones hostiles; puesto que sus dispositivos tienen una alta performance, se permite una nueva generación de sensores que cubren múltiples aplicaciones.

En la Ingeniería Civil, generalmente lo usan para monitorear estructuras civiles: edificios, carreteras y puentes, midiendo velocidades de propagación, grietas, deformación o evaluación de daño post sismo, interacción entre el acero u otros materiales con el concreto. Pueden ser aplicados en presas, minas, túneles; de acuerdo con su objetivo y alcance se utilizará un determinado tipo de sensor de fibra óptica.

En la Industria de la Energía Eléctrica, por ejemplo, en el control de carga de líneas de transmisión eléctrica. En la industria de Petróleo y gas, aquí generalmente se usan en tuberías para evitar pérdidas o fugas.

## 2.8 SENSORES DE FIBRA ÓPTICA BASADOS EN REDES LPG

Las redes de periodo largo (LPG) grabadas en fibras ópticas, han sido exhaustivamente 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.

En la Figura N° 2.23 se muestra cómo es que varía la señal de entrada, subdividiéndose perpendicularmente, provocando una señal de salida diferente.

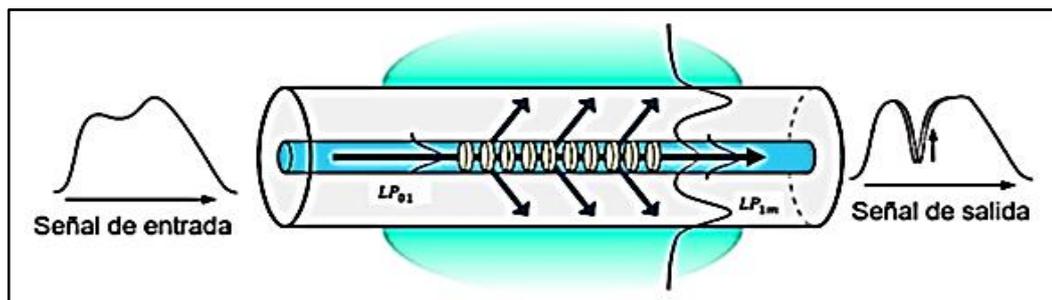


Figura N° 2.23 Principio de funcionamiento de una LPG. Tomado de Mesa et al. (2018)

Una LPG es una perturbación periódica en el índice de refracción de la fibra óptica, cuyo período se elige para acoplar la luz desde el modo guiado fundamental del núcleo a los modos de la cubierta co-propagantes de alto orden.

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 presentarán los espectros de trasmisión de redes LPG obtenidas por gravado permanente usando laser de CO<sub>2</sub>.

Se caracteriza la respuesta de transmitancia de dichas redes y se muestran 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.

### 2.8.1 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:

$$\beta_{01}^{co} - \beta_{nm}^{cl} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2.16)$$

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 (2.17) y (2.18):

$$\frac{dA^{co}}{dz} = j\kappa(z)A^{co} + j\sum_m \frac{p}{2}\kappa(z)A_m^{cl}e^{-j2\delta^{cl-co}z} \quad (2.17)$$

$$\frac{dA_m^{cl}}{dz} = j\sum_m \frac{p}{2}\kappa(z)A^{co}e^{-j2\delta^{cl-co}z} \quad (2.18)$$

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:

$$\kappa(z) = w\epsilon(0)n_1^2\sigma(z)\int_0^{2\pi}d\varphi\int_0^{a_1}rdr(E_r^{cl}E_r^{co*} + E_\varphi^{cl}E_\varphi^{co*}) \quad (2.19)$$

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

$$\delta^{cl-co} = \frac{1}{2}(\beta_{01}^{co} - \beta_{nm}^{cl}) \quad (2.20)$$

La transmitancia de la fibra, calculada desde las ecuaciones anteriores, es entonces expresada en la ecuación (2.21):

$$\frac{P_{cl}^{(n)}(L)}{P_{01}(0)} = \frac{\text{sen}^2[\kappa_g L \sqrt{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g}\right)^2}]}{1 + \left(\frac{\delta}{\kappa_g}\right)^2} \quad (2.21)$$

Donde:

$P_{cl}^{(n)}(L)$  : Potencia de salida después de recorrer una longitud L

$P_{01}(0)$  : Potencia de entrada

$\kappa_g$  : Constante de acoplamiento

$\delta$  : Parámetro de desfase

L : Longitud de recorrido

### 2.8.3 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. 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, eualización de ganancia, modulación óptica y otras aplicaciones. Como las propiedades de las redes LPG dependen de las características particulares de fabricación, primero se muestran sus propiedades básicas para luego pasar a las aplicaciones.

En la Figura N° 2.24 se muestra un arreglo típico, consistente en una placa plana y otra acanalado. La fibra es colocada en medio de estas dos placas y se aplica presión. Todos los diferentes esquemas para grabar por medios mecánicos tienen en común que no es necesario retirar el recubrimiento de polímero para poder grabar la rejilla.

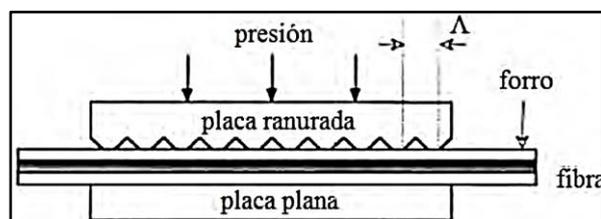


Figura N° 2.24 Arreglo típico para el grabado mecánico de una LPG. Tomado de García (2018)

La Figura N° 2.25 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.

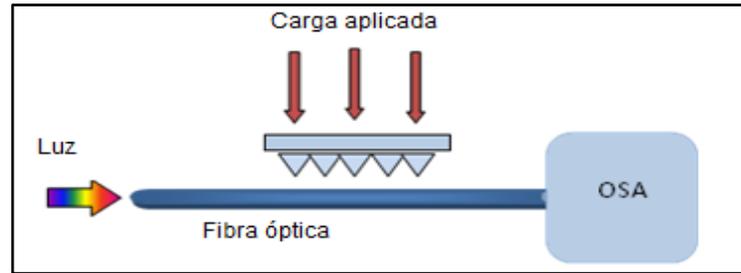


Figura N° 2.25 Arreglo experimental para el grabado de una LPG. Tomado de Mosquera (2019)

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.

#### 2.8.4 Redes LPG grabadas con láser de CO<sub>2</sub>

Esta técnica fue propuesta primeramente por Davis, Karpov y colaboradores en 1998. La Figura N° 2.26 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. El láser es controlado por una computadora.

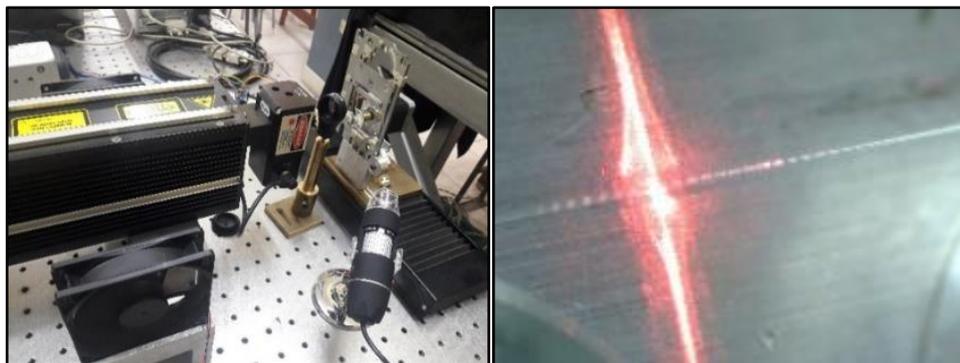


Figura N° 2.26 Equipo experimental para el grabado con láser de CO<sub>2</sub>. Tomado de Mosquera (2019)

Los perfiles de las redes grabadas se muestran a continuación en la Figura N°2.27.

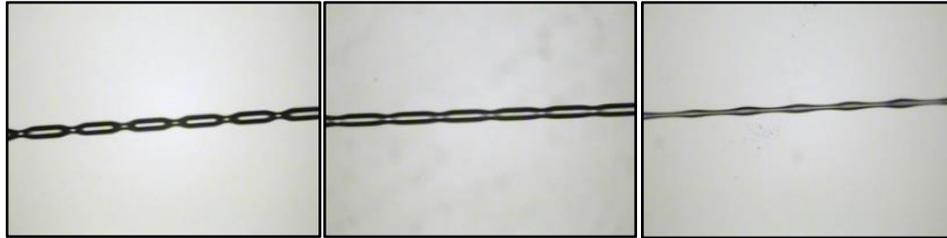


Figura N° 2.27 Perfiles de las redes grabadas con láser CO<sub>2</sub>. Tomado de Mosquera (2019)

#### 2.8.4.1 Grabado punto por punto

En la Figura N° 2.28 se muestra el arreglo experimental para este método.

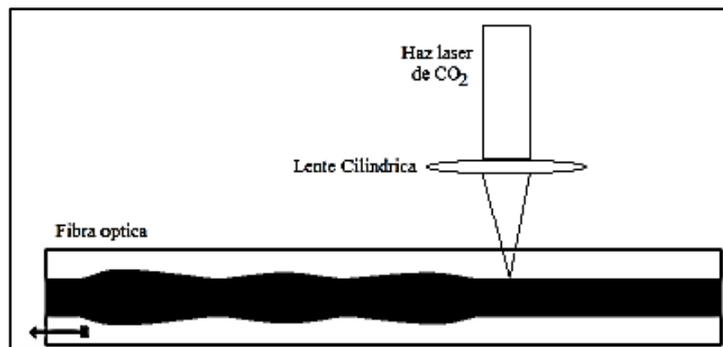


Figura N° 2.28 Arreglo experimental para el grabado punto por punto. Tomado de García (2018)

En la Figura N° 2.29 se muestra la formación de la red a medida que se incrementa el número de periodos o puntos de gravado con el láser de CO<sub>2</sub> sobre la fibra óptica.

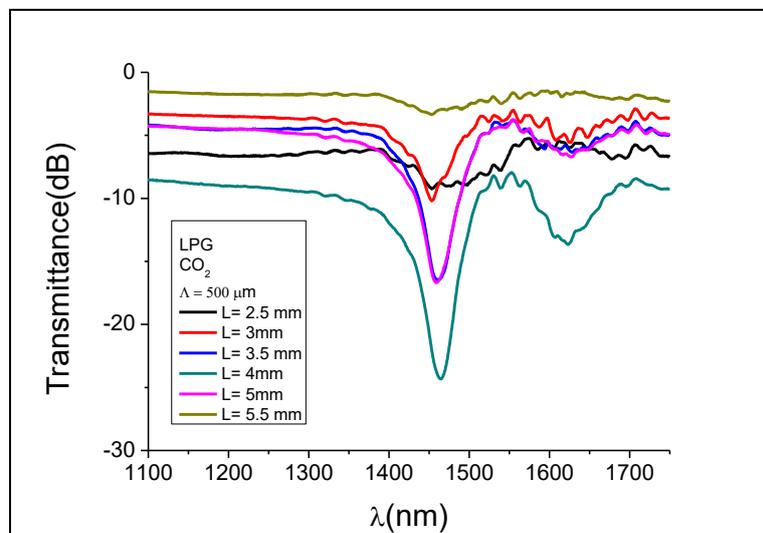


Figura N° 2.29 Evolución de una red LPG respecto al número de periodos. Tomado de Mosquera (2016)

### 2.8.5 Red LPG Gravada en Fibra Afinada (Tápers)

Diversos sensores de fibra óptica enfocan su funcionamiento en la interacción de los modos guiados con el exterior, directamente y/o mediante su acoplamiento con estructuras materiales (normalmente en forma de capas).

Para acceder al campo del guiado en esas estructuras, existen procedimientos entre los cuales, el afinado de la fibra, también llamado *tápering* o *estrechamiento de la fibra* ha sido uno de los más empleados. Donde la fibra óptica es estrechada calentándola y estirándola al mismo tiempo, en un procedimiento experimental cuyos parámetros deben controlarse con cuidado.

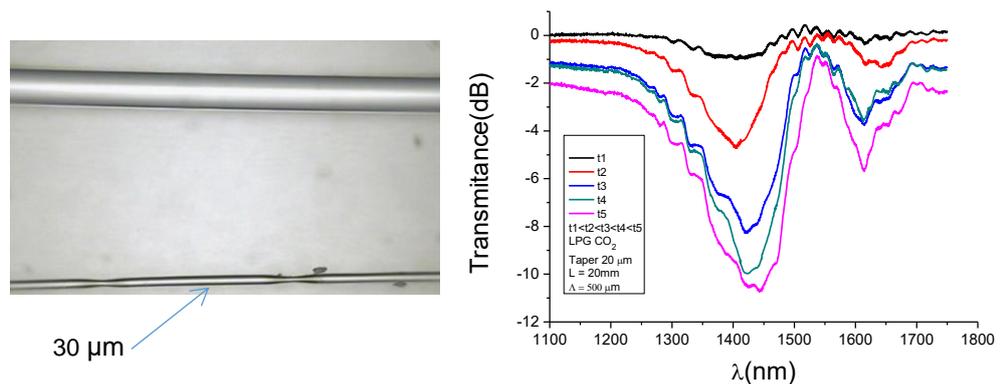


Figura N° 2.30 Espectro de transmisión de un táper. Tomado de Mosquera (2019)

Las magnitudes que definen al táper son 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.

Mosquera (2019) grabó redes LPG en tápers, usando el láser de CO<sub>2</sub>, y un espectro característico de esa red es mostrado en la Figura N° 2.31. Se observa que el valle de resonancia, correspondiente al acoplamiento de los modos guiados núcleo-revestimiento, es más abierto, producto del grabado sobre la fibra en regiones que se van afinando.

Entendiéndose a “core” (co) como núcleo y “cladding” (clad) como revestimiento. Al afinar la fibra, la luz que es guiada en el modo fundamental del núcleo es transferida al modo fundamental del revestimiento. 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 táper 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  $\lambda$ ). La región  $V_{\text{core}} < 1$  tiene una longitud total  $z_1 + z_2 + d$ , donde  $d$  es la longitud de la parte estrechada,  $V_{\text{core}}$  es el parámetro de núcleo,  $n_{\text{clad}}$  es el índice de la cubierta,  $n_{\text{ext}}$  es el índice del medio externo (aire) y  $p(z)$  es el radio local de la fibra.

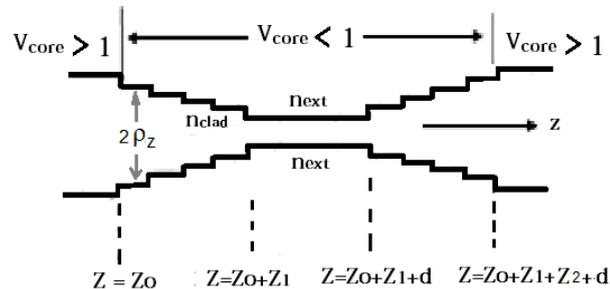


Figura N° 2.31 Fibra afinada con perfil bicónico. Tomado de Mosquera (2019)

Para diámetros de mayores o igual a  $10 \mu\text{m}$ , el 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 táper es simétrico). Cuando el táper es curvado, se produce también acoplamiento con los modos impares ( $LP_{11}$ ,  $LP_{21}$ ,...).

A la salida del táper, 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  $V_{\text{core}} < 1$ .

La constante de acoplamiento entre los modos del cladding cuando no existe curvatura es calculado con la ecuación (2.22):

$$C_{nm;pq} = \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \varepsilon_{pq}^{(i+1)}(r, \phi) \varepsilon_{nm}^{(i)}(r, \phi) r dr d\phi \quad (2.22)$$

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

$$= 0 \quad \text{if } n \neq p$$

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  $V > 100$ ). En la Figura N° 2.32 se muestra la conducta oscilatoria en la transmitancia de  $20\mu\text{m}$ , fabricado en fibra Draka en el Laboratorio de Fibras Especiales de la Universidad de Campinas (UNICAMP).

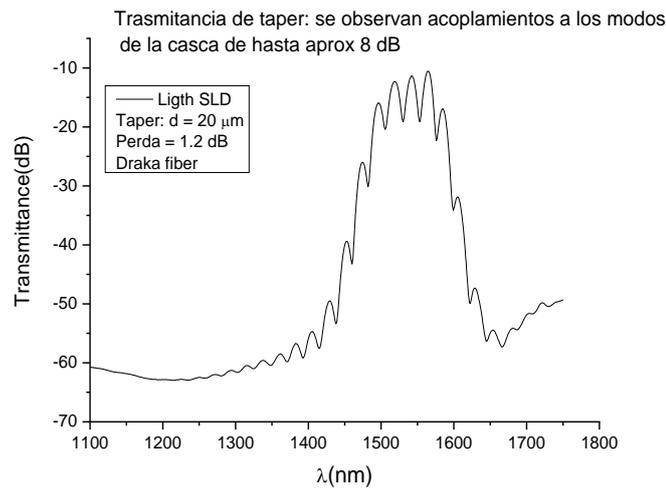


Figura N° 2.32 Oscilaciones en la transmitancia de un tapers. Tomado de Mosquera (2018)

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  $LP_{n\pm 1q}$ .

La curvatura se puede representar como se muestra en la Figura N° 2.33, la cual se constituye de microcurvaturas donde el ángulo entre ellas es representado por  $\psi$ , y para  $N$  microcurvaturas se obtiene un ángulo  $\theta$ .

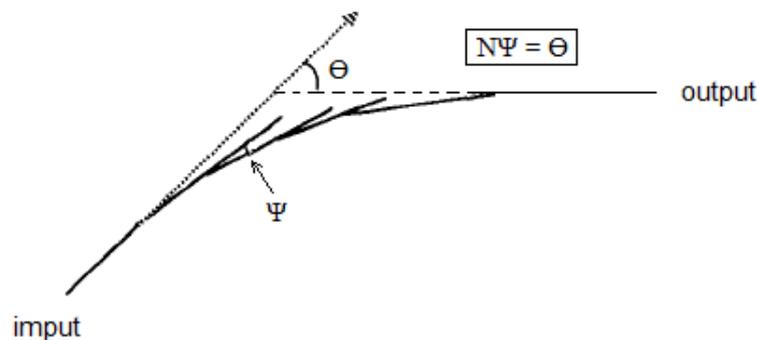


Figura N° 2.33 Geometría para cálculo de los efectos de curvatura del Tapers. Adaptado de Lloyd et al. (2018)

En la Figura 2.30 se muestra la presencia de los dips profundos en la transmitancia, originados del acoplamiento mencionado anteriormente.

$$C_{nm;pq}^{\psi} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \epsilon_{nm}^{(i)} \epsilon_{pq}^{(i+1)} \left[ J_0 \left( X_{nm}^{(i)} r \right) + 2jJ_1 \left( X_{nm}^{(i)} r \right) \cos(\theta) \right] r dr d\theta \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} C_{nm;pq}^{\psi} &\neq 0, & \text{si } n = p \text{ or } n = p \pm 1 \\ C_{nm;pq}^{\psi} &= 0, & \text{de otra manera} \end{aligned}$$

Donde,

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

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

## 2.9 MODELO TEÓRICO DE LA APLICACIÓN LPG

El mecanismo de funcionamiento de los sensores con redes LPG se basa en una perturbación longitudinal periódica del índice de refracción de una fibra óptica, que es capaz de proporcionar acoplamiento entre los modos de núcleo (co, abreviado de core) y revestimiento (cl, abreviado de cladding) en ciertas longitudes de onda.

La ecuación (2.24) describe las longitudes de onda  $\lambda^{(m)}$  en las que se produce el acoplamiento entre los modos a los que se hace referencia:  $n_{co}$  es el índice de refracción efectivo del modo de núcleo,  $n_{cl}^{(m)}$  es el índice de refracción efectivo del modo de revestimiento del orden  $m_{th}$  y  $\Lambda$  es el período de perturbación del índice de refracción (Erdogan, 1997).

$$\lambda^{(m)} = \left( n_{co} - n_{cl}^{(m)} \right) \Lambda \quad (2.24)$$

La curvatura provoca 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 del LPG provocan un cambio en la longitud de onda de la resonancia  $\lambda$ , así como, cambios en la profundidad de la inmersión de transmitancia (ecuación (2.25)).

$$T^{(m)} = 1 - \text{sen}^2(\kappa^{(m)}L) \quad (2.25)$$

Si asumimos una perturbación  $\xi$  actuando sobre la fibra, en la que se ha grabado una red LPG de período  $\Lambda$ , entonces se producirá un corrimiento en la longitud de onda de acoplamiento  $\lambda$  dado por la ecuación 2.26:

$$\frac{d\lambda}{d\xi} = \left( \frac{dn_{co}}{d\xi} - \frac{dn_{cl}^{(m)}}{d\xi} \right) \Lambda + \left( n_{co} - n_{cl}^{(m)} \right) \frac{d\Lambda}{d\xi} \quad (2.26)$$

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:

$$\kappa^{(m)} = \frac{\pi \Delta n_{co} J^{(m)}}{\lambda} \quad (2.27)$$

Donde,  $\Delta n_{co}$  es la modulación de índice del núcleo de la fibra, y  $J^{(m)}$  es la superposición integral entre el modo guiado fundamental y los modos de revestimiento en el área central de la fibra (Erdogan, 1997).

### 2.9.1 Sensibilidad a la curvatura

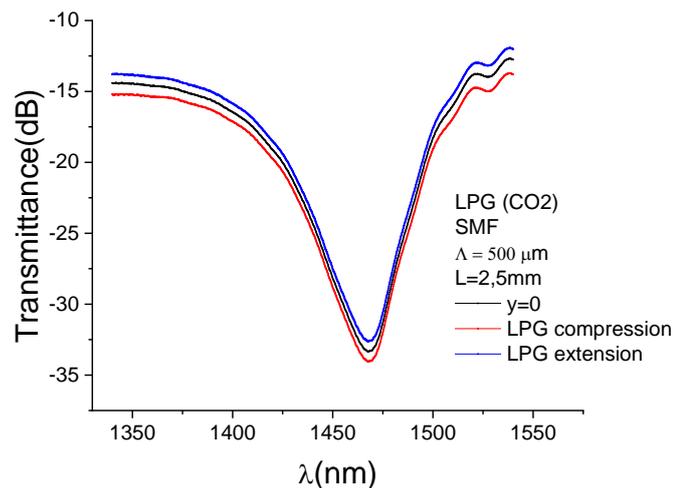


Figura N° 2.34 Sensibilidad a la flexión

Las redes LPG son muy sensibles a la curvatura, así mismo, es posible analizar la sensibilidad a la curvatura de las LPGs observando las ecuaciones para  $\lambda^{(m)}$  y  $T^{(m)}$ , las cuales varían linealmente con la curvatura aplicada. 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 ( $\Lambda$ ).

En la Figura N° 2.34 la sensibilidad a la curvatura de las LPG, escrita por un láser de CO<sub>2</sub>, depende de la dirección de curvatura.

En la Figura N° 2.34 se muestra la sensibilidad a la flexión de la red LPG gravada con un láser de CO<sub>2</sub>, y su dependencia con la dirección de curvatura. La red LPG mostrada pertenece a una fibra óptica monomodo SMF comercial, con período de la red  $\Lambda = 500 \mu\text{m}$  y longitud de la red  $L = 2,5 \text{ mm}$ .

Con el aumento de la flexión (en compresión), más energía se propagará hacia el medio externo, que luego se perderá por dispersión y absorción. Esta pérdida de

energía en el modo de revestimiento reduce la integral de superposición entre el modo fundamental y el modo de revestimiento, causando la reducción de la eficiencia de acoplamiento entre el modo guiado en el núcleo con el modo guiado en el revestimiento de la fibra óptica, disminuyendo la profundidad del mínimo en la transmitancia. Un efecto contrario se observará al curvar la fibra estirándola (red en extensión), en este caso la transmitancia se incrementa.

### 2.9.2 Barra resonante para vibraciones

En el método de la "resonancia de barra", una barra del material de interés se organiza en una configuración en voladizo y se pone en oscilación, tal como se muestra en la Figura N° 2.35.

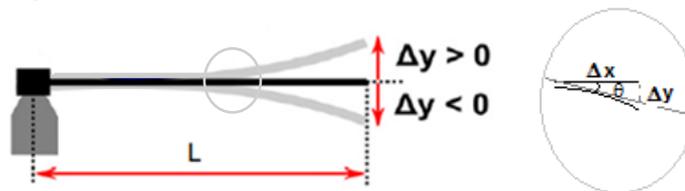


Figura N° 2.35 Deflexión de una viga en voladizo horizontal

El movimiento resultante se estudia para obtener el valor de los módulos de elasticidad flexural del material de barra (Mosquera et al., 2016).

$$\Delta \varepsilon = \Delta x = \frac{\Delta y}{\theta} \quad (2.28)$$

De las ecuaciones (2.24), (2.25) y (2.26) se deduce la ecuación (2.29) que relaciona la variación de la intensidad de la luz transmitida por la LPG con la variación del desplazamiento transversal de la regla:

$$\Delta I = K \Delta y \quad (2.29)$$

Siendo la constante K la intensidad a la sensibilidad de la transmitancia I de la fibra, a su curvatura.

En este trabajo de tesis, se muestra la aplicación de esta sensibilidad a variaciones de curvatura por parte del sensor LPG para determinar, en primer lugar, el desplazamiento, velocidad, aceleración del movimiento flexural de una regla en configuración de voladizo. Para ello, se utiliza una red de fibra óptica de largo periodo sensible a la curvatura para registrar el desplazamiento de la barra en función del tiempo. Si la barra en la configuración en voladizo se desvía verticalmente de su estado de equilibrio y luego se libera, el movimiento resultante es oscilatorio y su amplitud decae en función del tiempo.

### 2.9.3 Viga en Voladizo para Caudal

Para flujos, la LPG es pegada sobre la superficie de una regla en configuración de voladizo, como se muestra en la Figura N° 2.36, donde la tensión axial en la LPG pegada sobre la regla se incrementará o decrecerá con el movimiento flexural de la regla originándose una variación en la transmitancia que acompañará a la curvatura de la placa.

En la Figura N° 2.36 se muestra la viga sin deformar (línea vertical) y la viga desviada en un momento posterior (línea punteada), donde cada punto distanciados "x" del extremo fijado experimenta un desplazamiento transversal igual a  $y(x)$ . Asimismo, se muestra que la dirección del desviamiento es conforme con la fuerza distribuida que, en esta representación, es la correspondiente al flujo de agua.

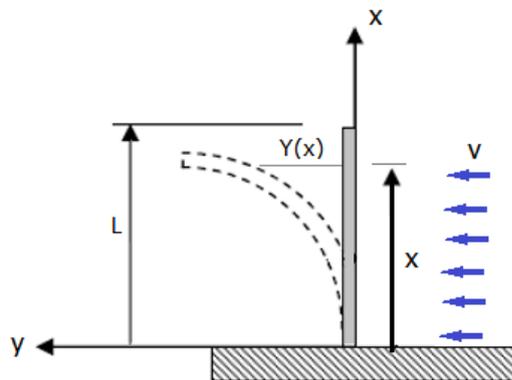


Figura N° 2.36 Representación experimental de una viga en voladizo

## CAPÍTULO III: FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA TIPO LPG

### 3.1 SISTEMA DE FABRICACIÓN DE REDES LPG

El equipo para grabar redes LPG en fibras ópticas de sílice tipo monomodo ha sido implementado en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI.

#### 3.1.1 Diagrama de Bloques

El diagrama de bloques que sigue este sistema se muestra en la Figura N° 3.1. Los equipos que controlan el láser y los motores de paso son proporcionados y controlados desde una PC.

El controlador de láser permite regular la potencia, y definir el momento exacto del grabado. El láser pasa previamente por una lente que concentra el haz de luz requerido para el quemado de la fibra óptica en un pequeño punto incidente. El controlador del mecanismo de pasos verticales y el de la base móvil horizontal se detallan en el apartado de diseño mecánico.

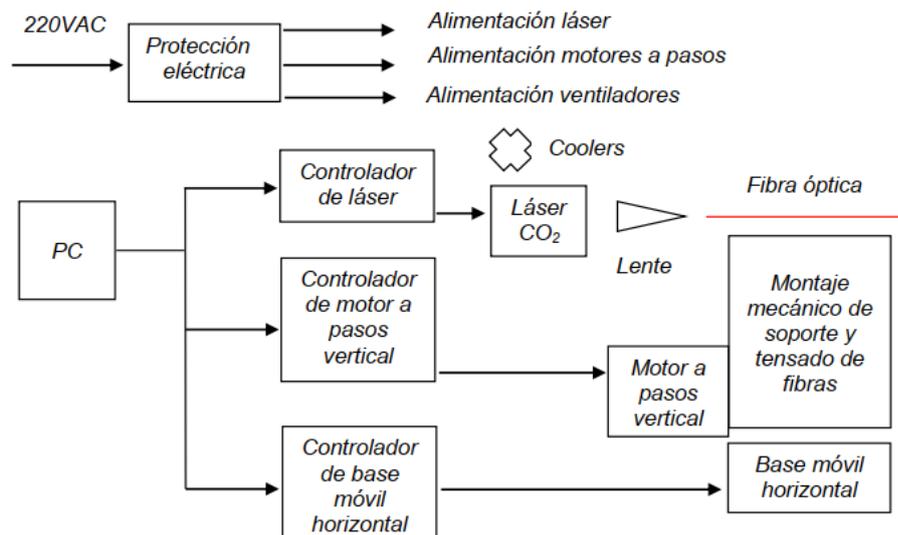


Figura N° 3.1 Diagrama de bloques del sistema. Tomado de Trigos (2021)

#### 3.1.2 Diseño Mecánico

En las Figuras N° 3.2 y 3.3 se muestra el diseño mecánico del sistema para la fabricación de sensores LPG, el mismo que está conformado por lo indicado en el diagrama de bloques. La base móvil horizontal tiene un motor de pasos, al igual que el soporte donde descansan las fibras, pero este último es vertical y con ayuda

de engranajes. Los cilindros de la imagen sirven para tensar la fibra, puesto que son fijos y permiten un grabado uniforme del láser en la fibra óptica.

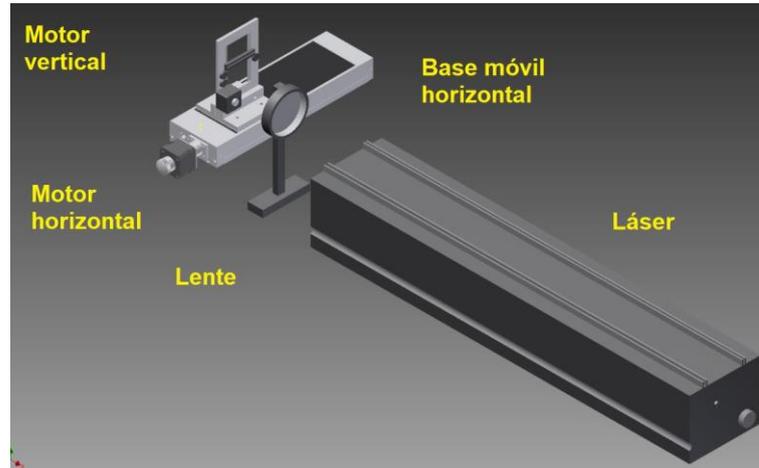


Figura N° 3.2 Diseño mecánico general. Tomado de Trigo (2021)

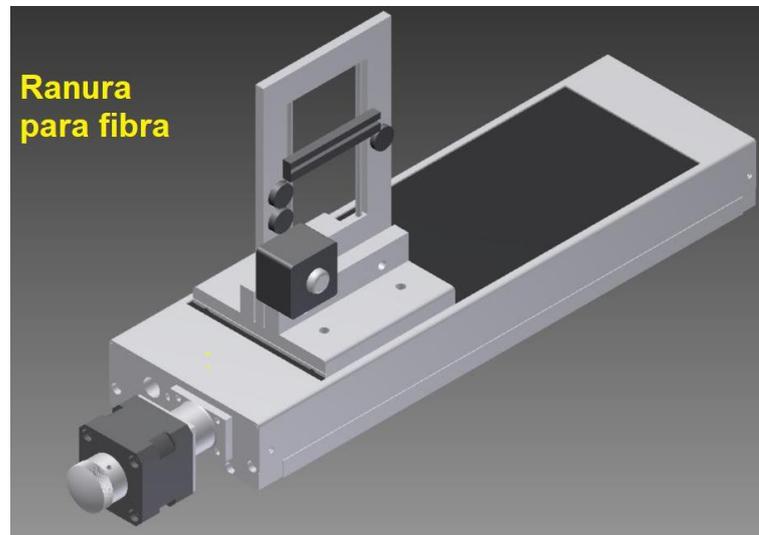


Figura N° 3.3 Diseño mecánico de base horizontal. Tomado de Trigo (2021)

La Tabla N° 3.1 muestra las potencias consumidas por los elementos del sistema.

Tabla N° 3.1 Potencias máximas consumidas. Elaboración Propia

Equipo	Potencia pico máxima a 220VAC	Corriente AC
Láser	30W	0.14A
Motor de movimiento horizontal	25W	0.11A
Motor de movimiento vertical	20W	0.09A
Ventiladores	2W	0.01A



### 3.2.1 Dispositivos empleados en la fabricación

En la grabación de redes LPG en la fibra óptica se utiliza:

- Láser de CO<sub>2</sub> Synrad 48-1KM: Es muy importante en este sistema debido a que permite el quemado de la fibra óptica para poder grabar una red en ella. En la Figura N° 3.6 se muestra el láser empleado, cuya potencia máxima es de 30W.

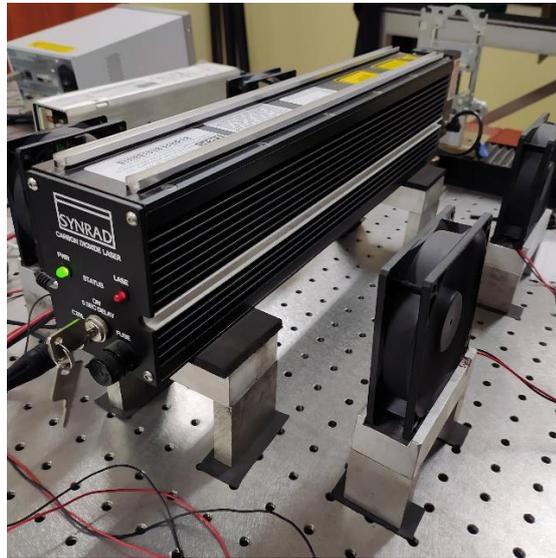


Figura N° 3.6 Láser de CO<sub>2</sub>. Fuente propia

- Controlador de láser UC-2000: Para el control del láser, se usa un equipo de comunicación Synrad UC-2000 mostrado en la Figura N° 3.7, el cual permite una comunicación serial con el computador permitiendo configurar la potencia y tiempo de exposición del láser



Figura N° 3.7 Controlador de láser UC-2000. Fuente propia

- Base Móvil Horizontal ThorLabs NRT100m: En la Figura N° 3.8 se muestra la base micrométrica equipada con un mecanismo para sostener la fibra óptica y permitir que esta se movilice horizontalmente.



Figura N° 3.8 Base Móvil Horizontal. Fuente propia

- Motor a pasos Thorlabs BSC201: Para manipular la base móvil horizontal se emplea un controlador de pasos mostrado en la Figura N° 3.9.



Figura N° 3.9 Controlador de pasos ThorLabs BSC201. Fuente propia

- Un motor a pasos 17PM-J034-P2VS: en la Figura N° 3.10 se muestra este motor al cual se le acopla un sistema mecánico de desplazamiento que permite que la fibra se traslade verticalmente asegurando una exposición uniforme de la fibra al láser de CO<sub>2</sub>.



Figura N° 3.10 Motor a pasos para movimiento vertical. Tomado por Trigo (2021)

- Controlador de motor a pasos TB6560: debido a que el controlador BSC201 solo tiene un canal de salida. En la Figura N° 3.11 se muestra este dispositivo de circuitos.

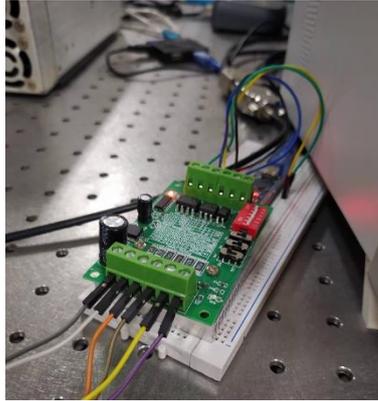


Figura N° 3.11 Circuitos para control de movimiento horizontal. Fuente propia

- Placa Arduino Nano: posee un microcontrolador ATmega328P mostrado en la Figura N° 3.12. En este caso, se utiliza como medio de comunicación entre la PC y el controlador de motor a pasos DRV8825 del movimiento vertical.

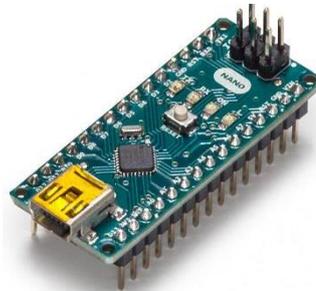


Figura N° 3.12 Microcontrolador de movimiento vertical. Tomado por Trigo (2021)

- Ventilación: por recomendación del manual del láser, es necesaria la ventilación del sistema, e incluso si se trabajara con porcentajes altos de potencia, se necesitaría la disipación de calor, pero como se trabaja con potencias de hasta 10% de la potencia máxima, solo será necesaria la ventilación por aire. Para ello, se emplean 4 coolers como el que se muestra en la Figura N° 3.13, fijados en bases metálicas en los lados laterales del láser y alimentados con 12VDC.



Figura N° 3.13 Cooler para ventilación forzada de láser. Tomado de Trigo (2021)

- Lente de Selenuro de Cadmio: para focalizar la luz láser en un solo punto sobre la fibra óptica. En la Figura N° 3.14, se observa el espaciado entre el lente y los dispositivos empleados en la fabricación de la red LPG.

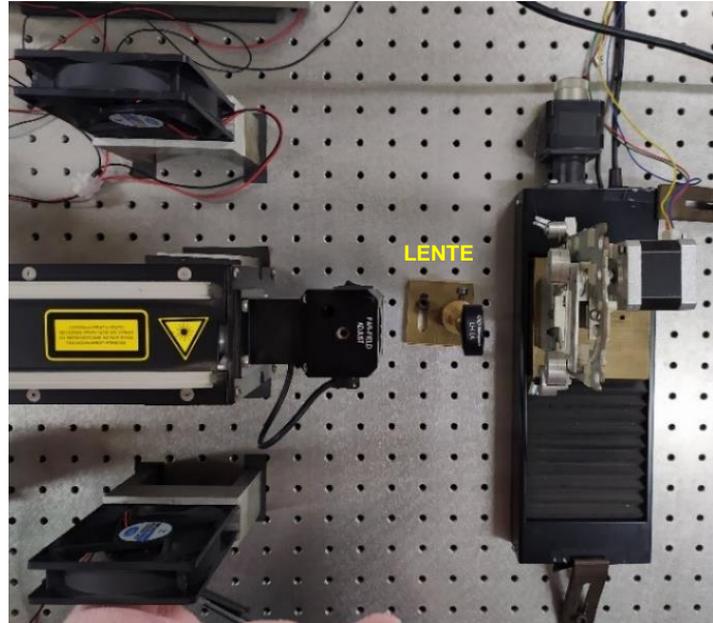


Figura N° 3.14 Ubicación del lente de Selenuro de Cadmio. Fuente propia

### 3.2.2 Dispositivos empleados en la caracterización y aplicaciones

La caracterización óptica de las redes LPG fabricadas se realiza observando la transmitancia espectral de la fibra y en esta se emplean los siguientes dispositivos.

- Empalmadora de fibra óptica Sumitomo Type-82C: permite la fusión de la fibra con red LPG en sus dos extremos con pigtails, como los mostrados en la Figura N° 3.15. El resultado de este proceso es la obtención de una única fibra de mayor tamaño y con conectores para los dispositivos requeridos.



Figura N° 3.15 Empalmadora Sumitomo Type-82C. Fuente propia

- Fuente de luz de super diodo LED Safibra modelo OFLS-6: provee luz de intensidad máxima centrada en 1550  $\mu\text{m}$  y es utilizada para iluminar la fibra en la entrada. En la Figura N° 3.16 se observa la fuente de luz aún sin conectarse a una fibra óptica.



Figura N° 3.16 Fuente de Luz LED Safibra modelo OFLS-6. Fuente propia

- Fotodetector de Germanio Newport modelo 2333: capta la intensidad transmitida por la fibra, en la Figura N° 3.17 se muestra una fotografía de este.



Figura N° 3.17 Fotodetector Newport modelo 2333. Fuente propia

- Espectrómetro STS NIR de la Ocean Optics: la composición espectral de la luz transmitida es analizada por el osciloscopio o espectrómetro mostrado en la Figura N° 3.18.



Figura N° 3.18 Osciloscopio Ocean Optics Newport modelo 2333. Fuente propia

En la Figura N° 3.19 se muestra de manera esquemática el equipamiento para el grabado de redes LPG en fibras ópticas.

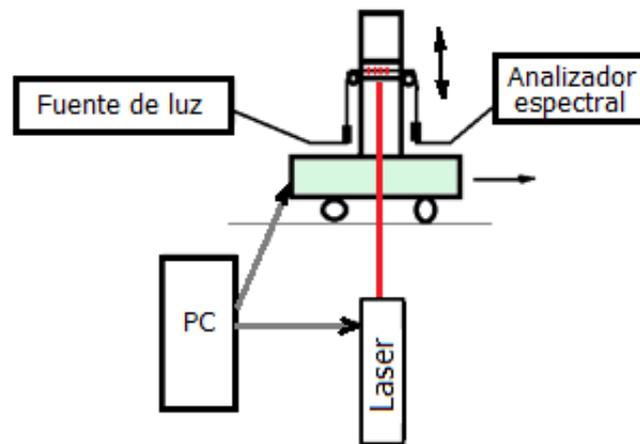


Figura N° 3.19 Esquema de grabado de redes LPG en fibras ópticas. Fuente propia

### 3.2.3 Herramientas de Software

Con el fin de manejar los equipos, se requiere de los siguientes softwares:

- LabView: es un entorno de desarrollo completo que abarca tanto el interfaz gráfico como programación. Con este se realiza la interfaz en donde se introducen los parámetros de la red LPG a grabar.
- Arduino: entorno de programación en lenguaje C para la comunicación con el microcontrolador y control del motor a pasos del movimiento vertical de fibras.
- Thorlabs APT Config: software de configuración del driver de motor a pasos en la base motorizada para el movimiento horizontal de las fibras

## 3.3 AUTOMATIZACIÓN DE GRABADO DE REDES LPG

### 3.3.1 Programa Principal LabView

El programa de lógica de control del sistema se encuentra implementado en LabView, en donde Trigos (2021) implementó una interfaz gráfica que abarca el proceso de fabricación de grabado de redes.

En la Figura N°3.20 se observa la pantalla principal donde se pueden modificar los principales parámetros del grabado de redes LPG como la potencia del láser, período de la red, número de períodos y tiempo de exposición.

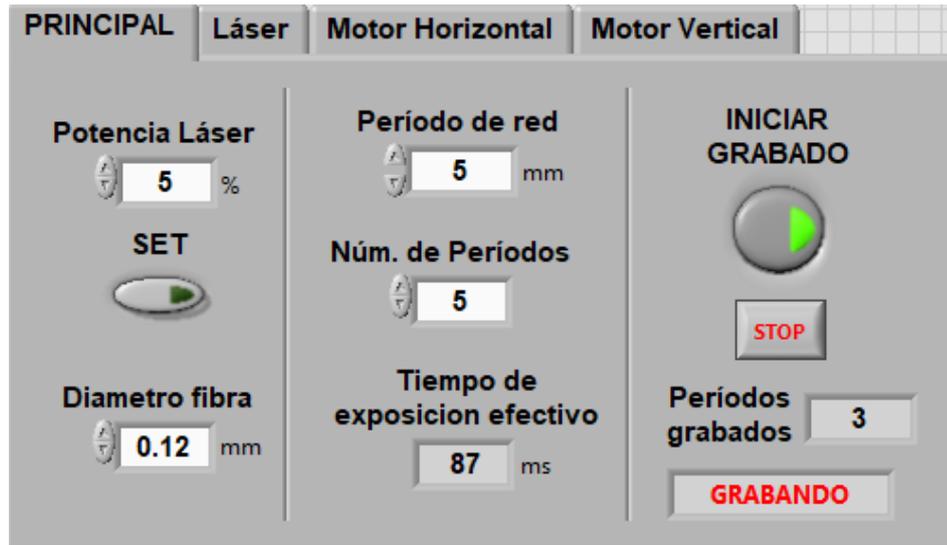


Figura N° 3.20 Pantalla principal LABVIEW. Fuente propia

Al presionar el botón de “iniciar grabado”, se iniciará la secuencia de funcionamiento, que tiene el siguiente algoritmo:

- Quemado de la fibra óptica mediante el láser, concentrado en un punto durante el tiempo de exposición; simultáneamente, se mueve verticalmente la fibra, para asegurar que el láser quemé correctamente la fibra.
- Retorno del motor vertical a su posición inicial.
- Movimiento horizontal de la fibra, según el período de red configurado.
- Repetición de los pasos anteriores tantas veces como se haya configurado el número de períodos.

Como resultado, se obtiene el sensor de fibra óptica con red LPG grabada con una secuencia de puntos quemados espaciados uniformemente.

### 3.3.2 Manejo de Láser CO<sub>2</sub>

Para el control de láser se utiliza el interfaz de control de láser mostrado en la Figura N° 3.20. En este, se puede indicar el puerto USB; el láser se ejecuta pulsando la opción “test laser” y en “estado láser” se puede ver en todo momento si el láser se encuentra apagado o encendido.

La comunicación serial con el controlador láser fue desarrollada por Trigo (2021), donde se monitorea el estado de los botones.



Figura N° 3.21 Interfaz para el control de láser CO<sub>2</sub>. Fuente propia

### 3.3.3 Control de Base Móvil para Movimiento Horizontal

En la Figura N° 3.22 se muestra el interfaz del motor horizontal, donde se puede configurar los parámetros para el movimiento horizontal de la fibra óptica.

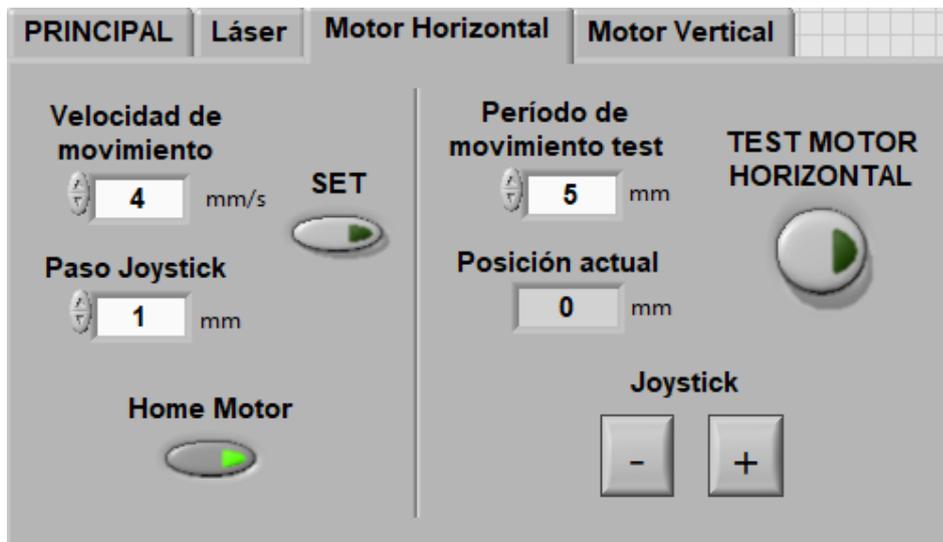


Figura N° 3.22 Interfaz para configuración del Motor Horizontal. Fuente propia

### 3.3.4 Control de Motor a Pasos para Movimiento Vertical

En LabView y en Arduino se tiene la lógica de control para el movimiento vertical con el motor a pasos como se muestra en la Figura N° 3.23. Es importante la velocidad de movimiento, debido a que influye en el tiempo de exposición del láser en la fibra óptica.

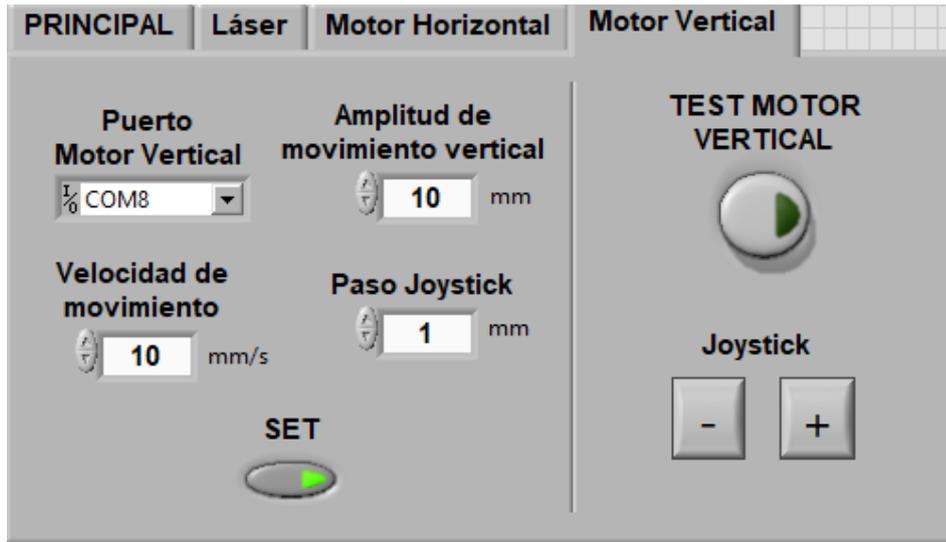


Figura N° 3.23 Interfaz para configuración del Motor Vertical. Fuente propia

### 3.4 FABRICACIÓN DE SENSORES TIPO LPG

#### 3.4.1 Síntesis del Procedimiento

Primeramente, se dejan al descubierto las capas necesarias de la fibra óptica comercial, para poder grabar una red LPG sobre la misma. Una vez hecho, se procede a colocar la fibra óptica sobre un mecanismo que le permite descansar y desplazarse horizontalmente, conectada a un traslador micrométrico NRT100/M de la ThorLabs, pudiéndose grabar redes con períodos a partir de los  $50\mu\text{m}$ . Además, un motor de paso permite que esta se traslade verticalmente para asegurar una exposición uniforme de la fibra al láser de  $\text{CO}_2$  y no solo en un fragmento de ella. En la Figura N°3.24 se muestra los equipos en conjuntos para la fabricación de sensores con redes LPG.



Figura N° 3.24 Equipamiento para la grabación de redes LPG. Fuente propia

### 3.4.2 Sensores LPG Fabricados

La figura 3.25 muestra una de las redes LPG grabadas por el láser de CO<sub>2</sub> sobre una fibra monomodo comercial, empleando el equipo implementado en el Laboratorio de Física de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, y siguiendo los procedimientos requeridos.



Figura N° 3.25 Red LPG grabada. Fuente propia

La figura 3.26 muestra la luz guiada por la fibra óptica monomodo, al pasar por la red LPG grabada en ella.



Figura N° 3.26 Luz guiada en una red LPG de 5 periodos de 500 $\mu$ m. Mosquera 2014

## 3.5 CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES LPG FABRICADOS

Con el fin de realizar la caracterización de respuesta a las variaciones de curvatura de las redes LPG fabricadas, se colocó un sensor de 500  $\mu$ m de paso y 2,5 mm de longitud en una configuración como la que se muestra en la Figura N° 3.27. En esta configuración, se utiliza como fuente de luz un LED superluminiscente (SLED), y para la toma de mediciones, un fotodetector (PDT) acoplado a un osciloscopio (OSC). Para la caracterización espectral de nuestras redes, a la fecha se dispone de un espectrómetro OCEAN OPTICS con un rango de detección de 600nm a 1100nm.

El sensor con red LPG se coloca sobre una barra de interés (con Loctite® Super Bonder) que tiene un extremo fijo y el otro libre. La deflexión de la barra (con desplazamiento vertical  $\Delta y$  en el extremo libre), hace que la red LPG se perturbe doblándose y, por lo tanto, se pueda monitorizar su respuesta de curvatura.

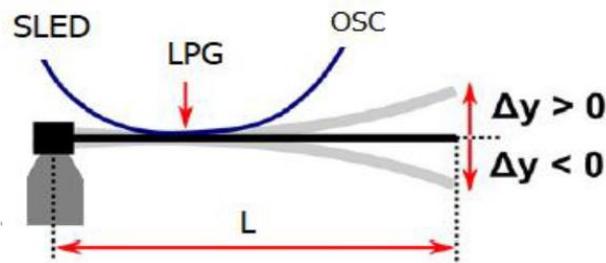


Figura N° 3.27 Configuración en voladizo para la caracterización del sensor LPG. Fuente propia

### 3.5.1 Espectro de Transmitancia de una Red LPG:

La Figura N° 3.28 muestra la respuesta óptica de una red LPG, donde el espectro de transmisión varía en función del desplazamiento vertical del extremo de la barra  $\Delta y$ . La situación en la que la barra se mantiene horizontal se define como  $\Delta y = 0$ , las variaciones positivas de  $\Delta y$  indican desplazamientos hacia arriba y las negativas variaciones hacia abajo.

El gráfico de la Figura N° 3.28 representa el espectro de transmitancia de una LPG para diferentes longitudes de onda.

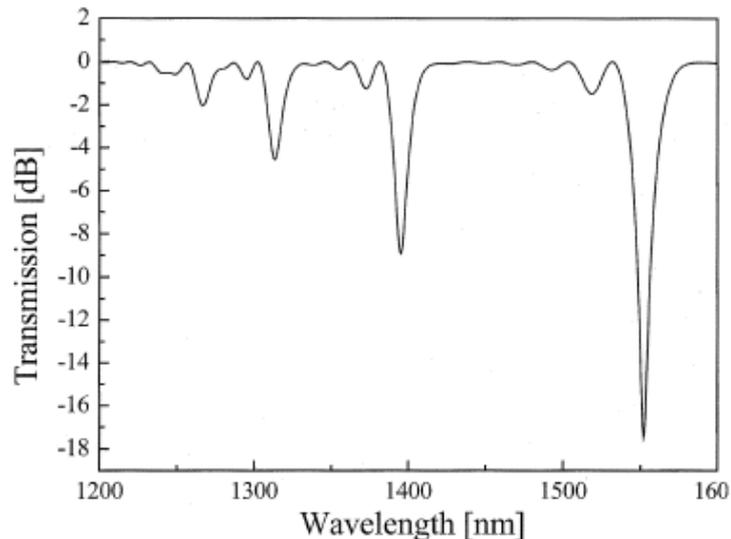


Figura N° 3.28 Espectro de transmitancia de una LPG. Tomado de Jeong (2003)

La respuesta de tensión en el fotodetector es cero cuando la barra está recta. Si hay un incremento de la potencia luminosa transmitida, la variación de la tensión es positiva; si, por el contrario, hay una disminución de la potencia luminosa, la variación de la tensión es negativa. Por lo tanto, al detectar la luz mediante el fotodetector, como la respuesta de voltaje es proporcional a la potencia óptica global de la fuente de luz, las variaciones de voltaje negativas se relacionan con valores  $\Delta y$  negativos y las variaciones positivas con  $\Delta y$  positivos.

Esto ocurre debido a que, para una resonancia menos profunda, un nivel de potencia luminosa global más elevado sensibiliza al fotodetector mientras que, para una más profunda, se detecta un nivel de potencia luminosa más bajo (Mosquera et al., 2015).

### 3.5.2 Respuesta Dinámica del Sensor LPG

Para observar la respuesta dinámica, se sujeta el sensor con red LPG sobre una regla de madera en configuración de voladizo, donde las vibraciones de la regla son registradas simultáneamente por el sensor y por un acelerómetro de estado sólido de la marca PASCO cerca del sensor de fibra óptica.

Las respuestas de ambos sensores se muestran en el osciloscopio (curva amarilla) y laptop (curva negra) de la Figura N° 3.29, correspondientes al sensor LPG y sensor comercial respectivamente.



Figura N° 3.29 Respuesta dinámica del sensor de fibra óptica tipo LPG. Fuente propia

El sensor de fibra óptica tipo LPG muestra gran sensibilidad a las deformaciones flexurales, donde sus señales son similares que las del sensor electrónico comercial.

En la Figura N° 3.30 se muestran las transformadas rápidas de Fourier de las señales detectadas por ambos sensores, las cuales muestran buena coincidencia en cuanto a valores de frecuencia correspondientes a los picos observados en la gráfica FFT. Las transformadas rápidas de Fourier obtenidas por ambos sensores

muestran el mismo valor de frecuencia (29.5 Hz) para el primer modo de mayor amplitud.

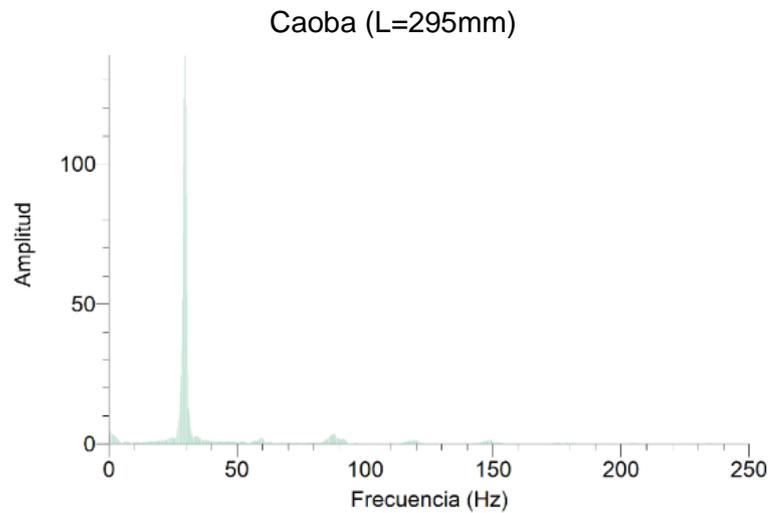


Figura N° 3.30 Trasformada de Fourier con sensor Pasco. Fuente propia

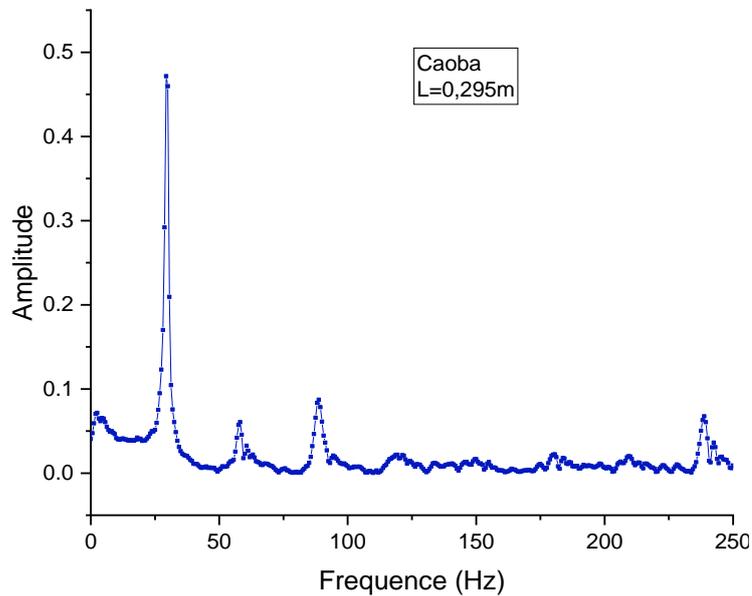


Figura N° 3.31 Trasformada de Fourier con sensor LPG. Fuente propia

## CAPÍTULO IV. APLICACIONES CON LOS SENSORES LPG

### 4.1 MEDICIÓN DE DESPLAZAMIENTOS CON TÁPERS

#### 4.1.1 Teoría de Tápers y Antecedentes

##### 4.1.1.1 Tápers con estructura en forma de S

En la Ecuación 4.1 [2.23] se muestra el cambio de la constante de acoplamiento cuando existe curvatura. Cuando una fibra afinada o táper es perturbada curvándose como en la Figura N° 4.1, se origina acoplamiento a los modos no simétricos LP<sub>1q</sub> además del acoplamiento entre los modos radiales LP<sub>0m</sub> y, en general, acoplamiento entre los modos LP<sub>nm</sub> y LP<sub>nq</sub> o LP<sub>n±1q</sub> originándose la presencia de dips profundos en la transmitancia.

$$C_{nm;pq}^{\psi} = \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \varepsilon_{nm}^{(i)} \varepsilon_{pq}^{(i+1)} \left[ J_0(X_{nm}^{(i)} r) + 2jJ_1(X_{nm}^{(i)} r) \cos(\theta) \right] r dr d\theta \quad (4.1)$$

Para ello, un extremo del táper se encuentra pegado a un soporte fijo, desde el cual la luz es inserida usando una lente de microscopio; mientras que, el otro extremo es sujeto a un soporte que se puede desplazar micrométricamente, para la lectura de la transmitancia. Este extremo se une a un pigtail con ayuda de un spliccer.

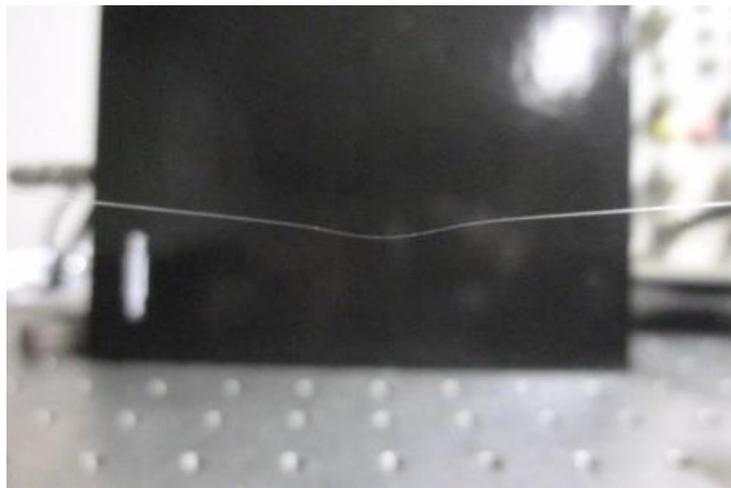


Figura N° 4.1 Curvatura de la fibra en la zona afinada. Mosquera 2019

Datos de la fibra afinada:

- Táper: SMF28
- Longitud de región afinada L = 10mm
- Diámetro de región afinada d = 30micras

Para observar los mínimos en el espectro de transmitancia, la región afinada de la fibra se curva (la longitud de onda y el número de mínimos observados dependen de la curvatura del tálper), seguidamente el extremo móvil se desplaza micrométricamente generando un aumento en la curvatura, y que los mínimos en la transmitancia se acerquen hacia el azul. Este efecto se pudo observar en el analizador espectral óptico (OSA) como corrimiento de fase, o con un fotodetector por pérdida de transmitancia, Mosquera (2019).

La Figura N° 4.2 muestra el corrimiento hacia menores longitudes de onda en los dips de transmitancia, al desplazar un extremo aumentando la curvatura del tálper.

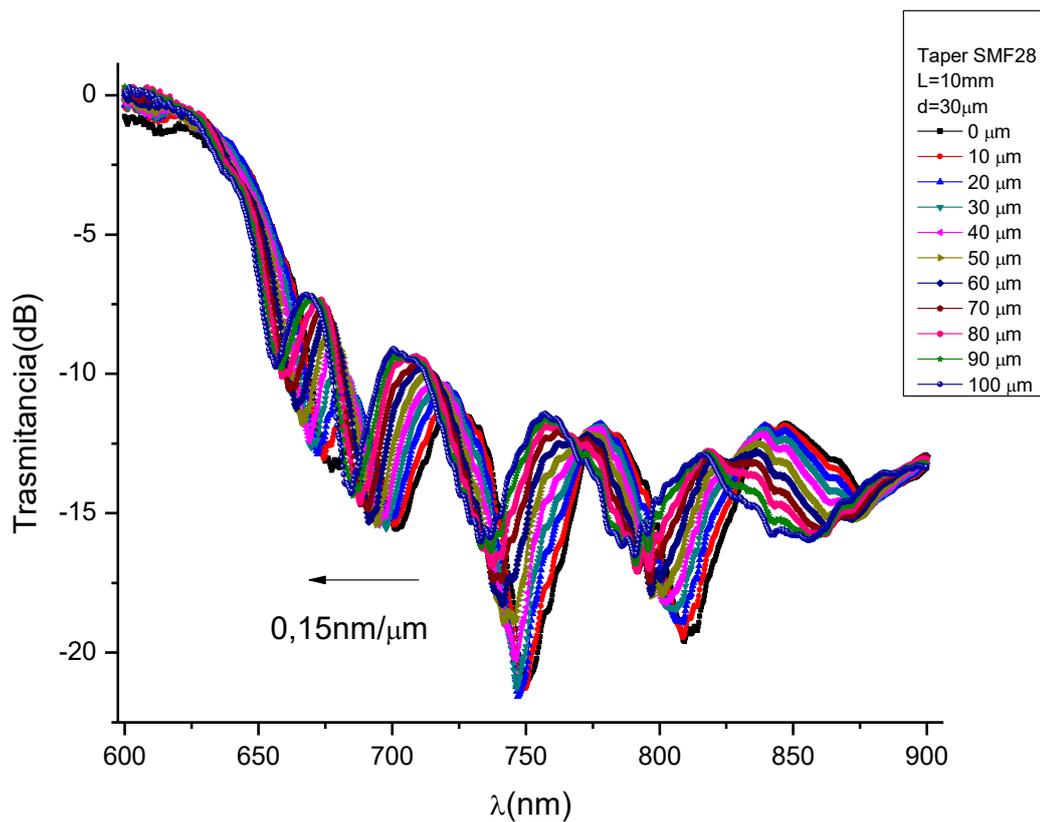


Figura N° 4.2 Espectro de transmitancia del tálper de la Figura N° 4.1. Tomado de Mosquera (2019)

La Figura N° 4.3 muestra las variaciones de los dips de transmitancia, respecto al corrimiento hacia menores longitudes de onda ocurridos al desplazar un extremo mientras este aumenta la curvatura del tálper, este desplazamiento se muestra en la Figura N° 4.4. El sensor muestra  $120\text{pm}/\mu\text{m}$  de sensibilidad a desplazamiento, Mosquera (2019).

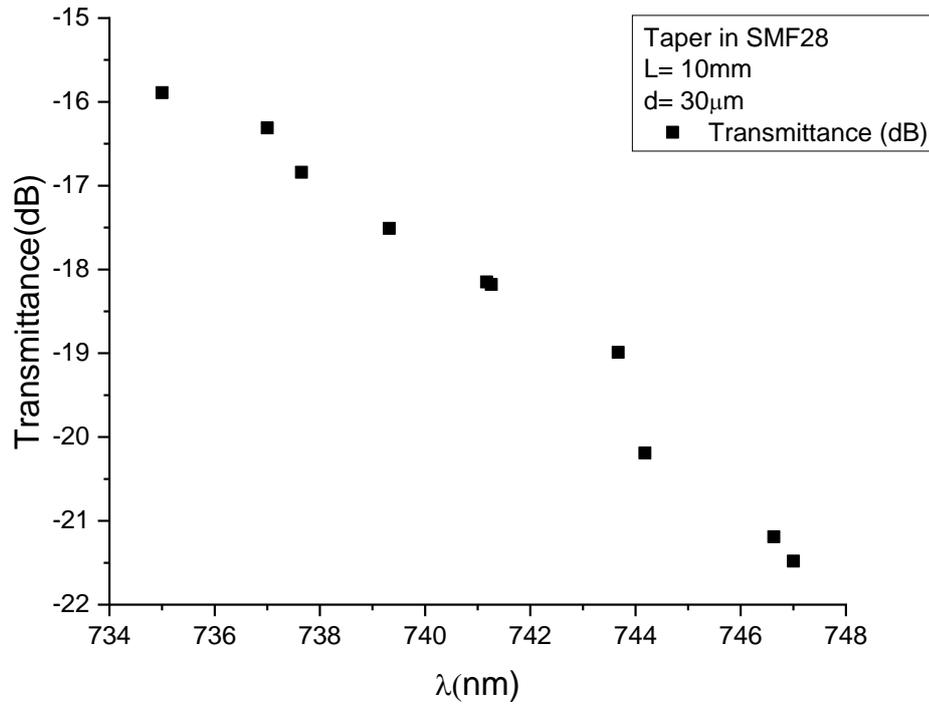


Figura N° 4.3 Dependencia entre la transmitancia y las longitudes de onda. Tomado de Mosquera (2019)

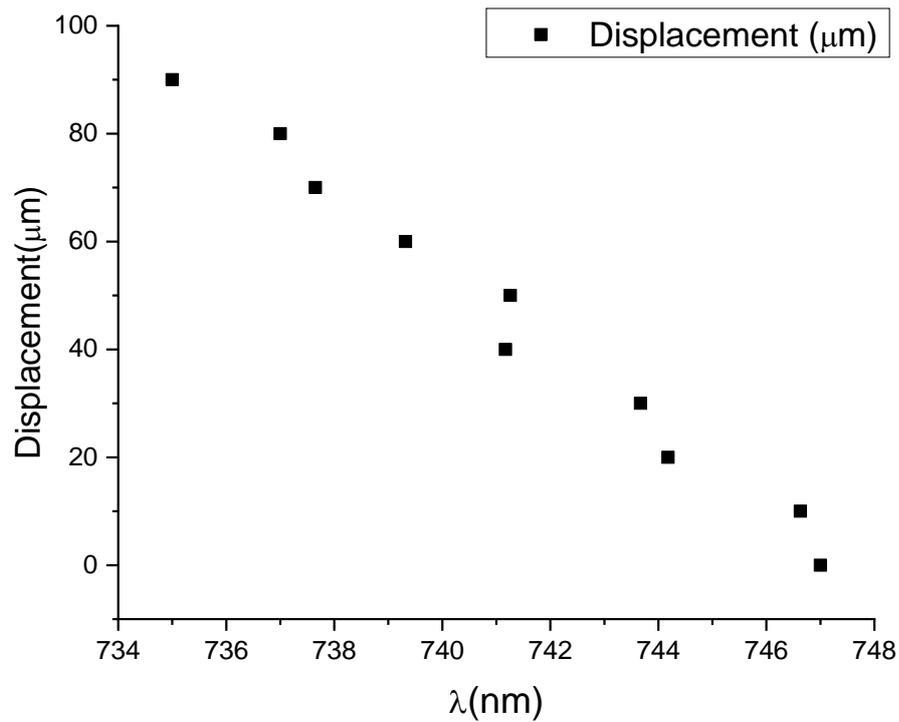


Figura N° 4.4 Dependencia del desplazamiento al aumentar la curvatura del taper. Tomado de Mosquera (2019)

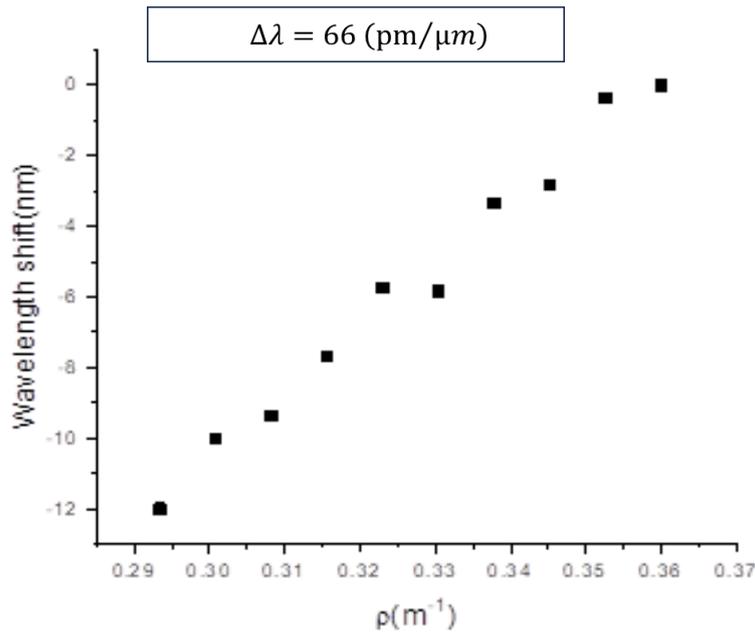


Figura N° 4.5 Dependencia lineal de la fase del dip de transmitancia. Tomado de Mosquera (2019)

Las Figuras N° 4.5 muestra la dependencia lineal del corrimiento de fase del dip de transmitancia al ir desplazando uno de sus extremos, aumentando la curvatura del táper.

#### 4.1.1.2 Optimización del sensor

En 2019, Mosquera encontró que los cambios de la curvatura de la fibra intervienen en la variación de los mínimos de transmitancia del táper, así como en la profundidad de la pérdida de transmitancia.

Optimizando la forma de la curvatura de la fibra, el sensor es más sensible a una curvatura formada en la región de pre-estrechamiento en la entrada del afinamiento. En la Figura N° 4.6 se muestra la pre-configuración en S de la fibra afinada al inicio del sensado de desplazamiento.

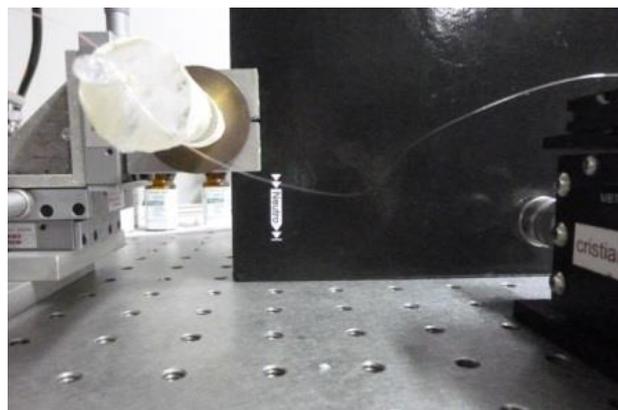


Figura N° 4.6 Curvatura del táper. Tomado de Mosquera (2019)

La Figura N° 4.7 muestra la configuración de un método sencillo para obtener curvatura en forma de S, esto se realizó en tres pruebas de las cuales la mayor sensibilidad alcanzada se dio de la siguiente manera.

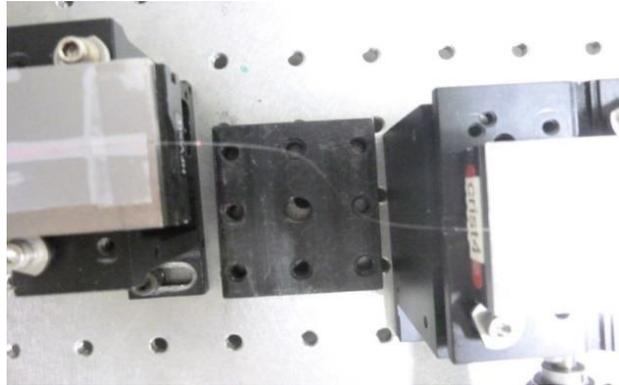


Figura N° 4.7 Método sencillo de obtener curvatura en forma de S. Tomado de Mosquera (2019)

El sensor mostrado anteriormente presenta una sensibilidad de 66 pm/μm, la Figura N° 4.8 muestra la variación de los dips de transmitancia según el incremento de su curvatura por desplazamiento.

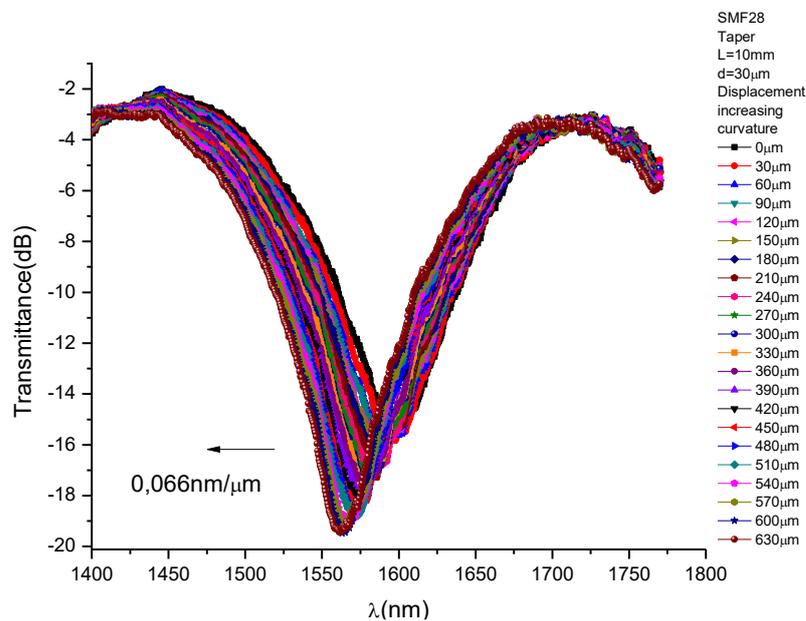


Figura N° 4.8 Transmitancia del táper curvado en S con sensibilidad 66 pm/μm.  
 Tomado de Mosquera (2019)

#### 4.1.1.3 Táper con curvatura inicial “congelada”

El sensor es más sensible a curvatura en la región de pre-estrechamiento, dado que al deformar el táper en esta zona de manera permanente mientras se fabrica el táper, se obtiene un táper bicónico con “curvatura congelada” en la zona de pre-estrechamiento, tal como se muestra en la Figura N° 4.9.

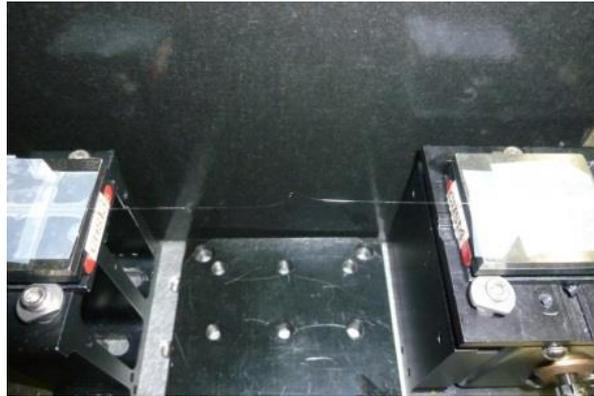
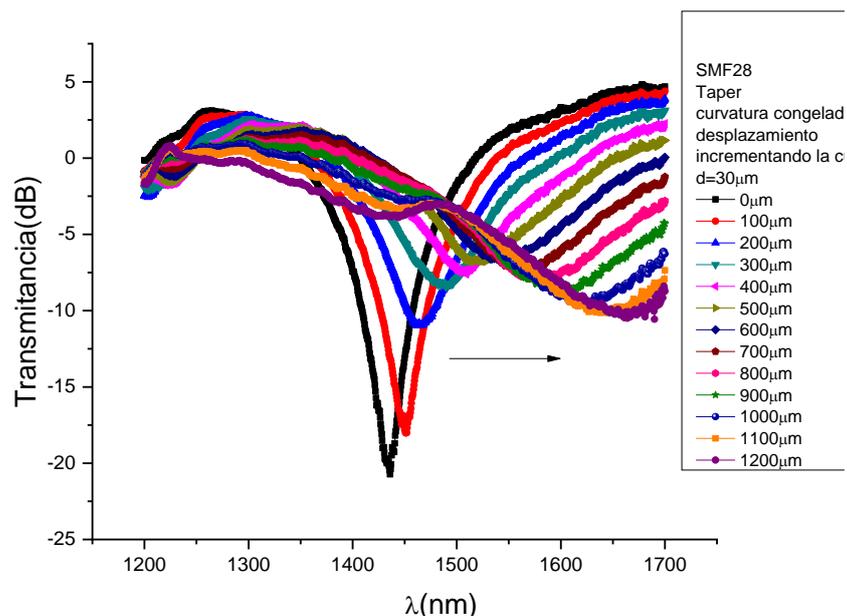


Figura N° 4.9 Fibra afinada con “curvatura congelada” fabricada en fibra SMF28 comercial.  
Tomado de Mosquera (2019)

La Figura N°4.10 muestra la sensibilidad del táper con “curvatura congelada” frente a variaciones de curvatura originados por diferentes desplazamientos.

El rango y sensibilidad de los sensores de desplazamiento basados en fibras afinadas dependen fuertemente de la geometría de la curvatura inicial de la fibra afinada, pudiéndose incrementar la sensibilidad de un sensor con curvatura en S hasta valores de 192 pm/ $\mu\text{m}$  como se muestra en la Figura N°4.11, con valores de rango tan altos como de 1200  $\mu\text{m}$ .

- 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)



- Figura N° 4.10 Transmitancia del táper con “curvatura congelada”. Tomado de Mosquera (2019)

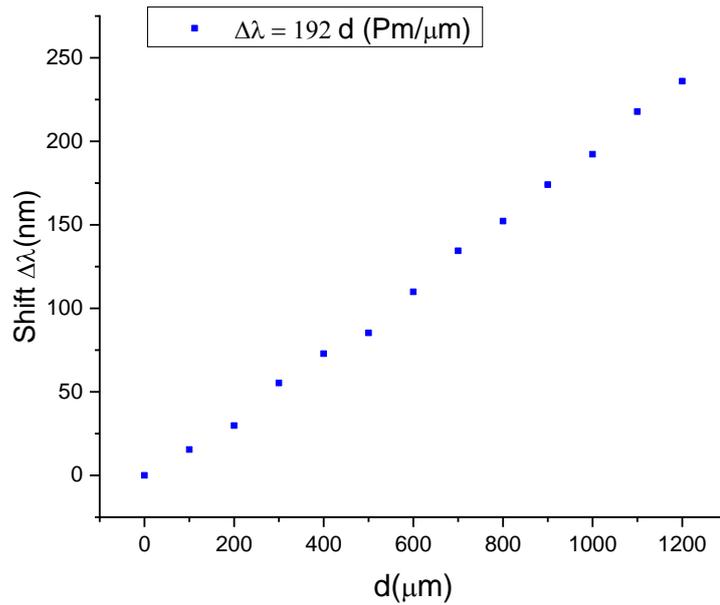


Figura N° 4.11 Sensibilidad del tapper con "curvatura congelada" a variaciones de curvatura originadas por desplazamiento. Tomado de Mosquera (2019)

#### 4.1.2 Arreglo Experimental

Las Figuras N° 4.12 y N° 4.13 muestran el arreglo experimental para analizar las características de transmitancia de sensores de desplazamientos tanto LPG y tapper con curvatura en forma S, respectivamente. Primero, se ubican los soportes metálicos, de manera que se mantenga una distancia igual para ambos casos.

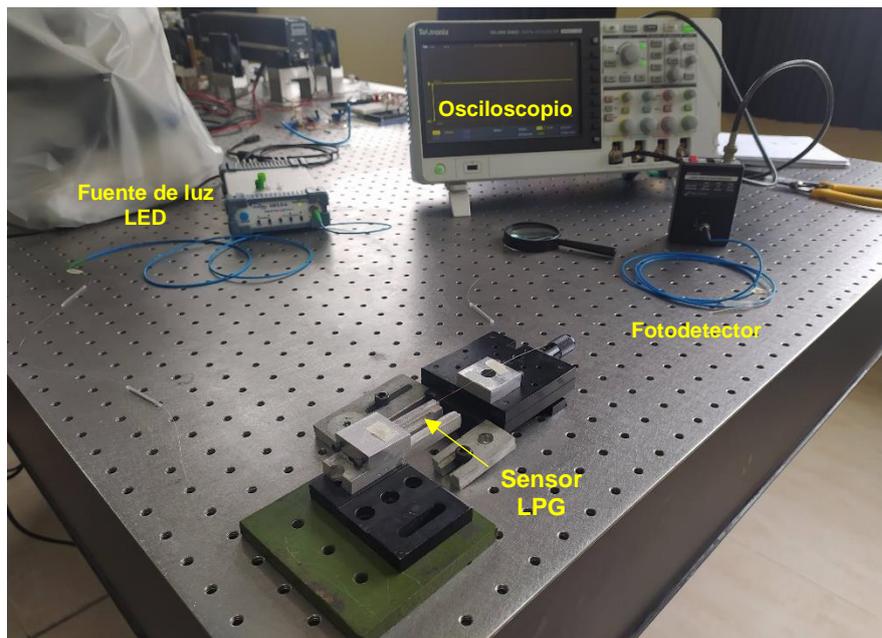


Figura N° 4.12 Arreglo experimental del sensor LPG para registrar su sensibilidad al desplazamiento. Fuente propia

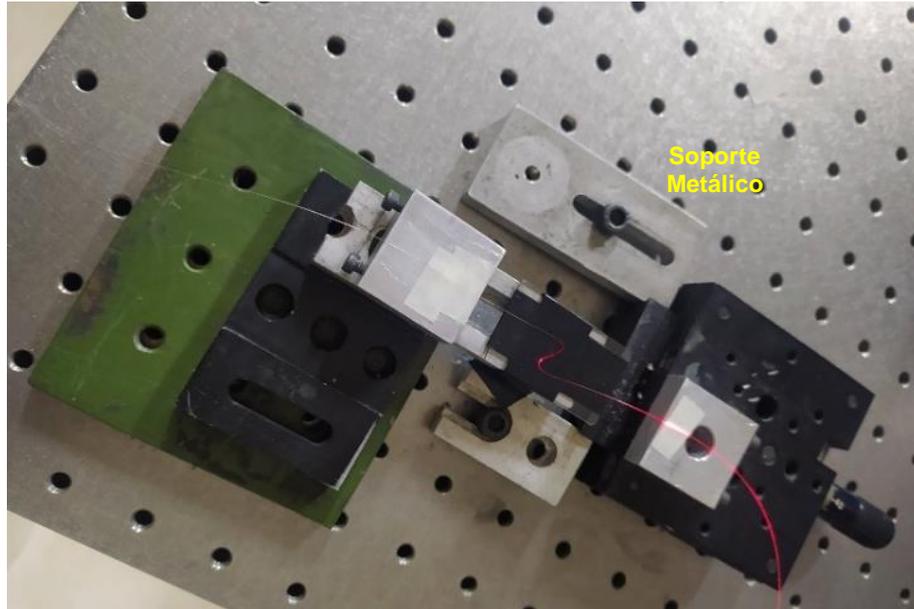


Figura N° 4.13 Arreglo experimental del táper con curvatura S. Fuente propia

Inicialmente, el táper es curvado para observar los mínimos en el espectro de transmitancia, debido a que la longitud de onda y el número de mínimos observados depende de la curvatura del táper. Luego, el extremo móvil es desplazado micrométricamente observando que a medida que aumenta la curvatura, los mínimos en la transmitancia se corren. El efecto se puede observar en el osciloscopio por pérdida de transmitancia.

#### 4.1.3 Fibras con Red LPG Fabricadas y Empleadas

En las Figuras N° 4.14 y N° 4.15 se muestran las fibras comerciales monomodo, con redes LPG fabricadas, con 3 y 6 periodos grabados, respectivamente. Las cuales fueron empleadas en la aplicación de sensores en desplazamientos de la presente tesis.



Figura N° 4.14 Sensor LPG fabricado con 3 periodos en una fibra SMF comercial. Fuente propia

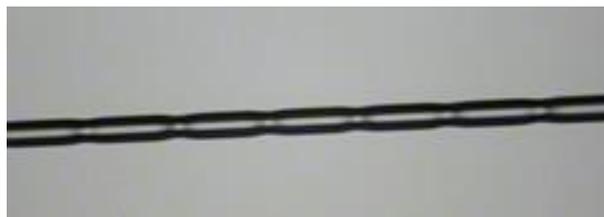


Figura N° 4.15 Sensor LPG fabricado con 6 periodos en una fibra SMF comercial. Fuente propia

#### 4.1.4 Resultados Experimentales

Los sensores LPG y los tapers poseen los siguientes datos experimentales:

- Tipos de LPG: SMF de 3 y 6 periodos
- Tipos de Taper: SMF “B” y “C” con curvatura en S, “D” y “E” con curvatura congelada.
- Longitud de región afinada  $L = 5 \text{ mm}$
- Diámetro de región afinada  $d = 30 \mu\text{m}$

##### 4.1.4.1 Para tapers con curvatura en S

###### Tapers SMF “B y C”

Las Tablas N° 4.1 y N° 4.2 muestran el resultado de los dips de intensidades de transmitancia obtenidas para dos tapers SMF diferentes con curvatura en S, “B” y “C” respectivamente, variando su desplazamiento.

Tabla N° 4.1 Resultado para el taper SMF “B” con curvatura S. Fuente propia

Taper SMF “B”	
Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	Intensidad de Transmitancia (Volts)
0	8.045
50	8.000
100	7.860
150	7.845
250	7.680
300	7.440
350	7.325

Tabla N° 4.2 Resultado para el táper SMF "C" con curvatura S. Fuente propia

Táper SMF "C"	
Desplazamiento (µm)	Intensidad de Transmitancia (Volts)
0	7.925
50	7.800
150	7.645
200	7.445
250	7.275

En la Figuras N° 4.16 muestra el gráfico de los resultados para los tápers SMF "B" y "C", donde se observa cómo varían los dips de transmitancia alcanzada en Volts respecto a desplazamientos provocados en fibras afinadas con curvatura S.

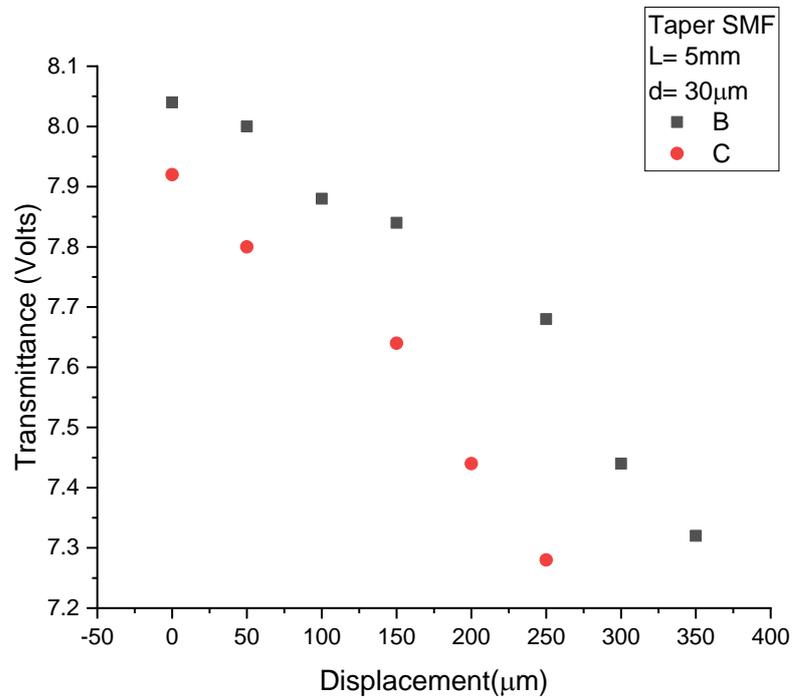


Figura N° 4.16 Resultado de los dips de Intensidad de Transmitancia para los tápers SMF "B" y "C" con curvatura en S. Fuente propia

A continuación, se presenta la variación entre los dips de intensidad de transmitancia y la variación de desplazamiento en las Tablas N° 4.3 y N° 4.4.

Tabla N° 4.3 Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "B" con curvatura S.

Fuente propia

<b>Táper SMF "B"</b>	
<b>Δ Desplazamiento (μm)</b>	<b>Δ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)</b>
0	0
50	45
100	140
150	15
250	165
300	240
350	115

Tabla N° 4.4 Variaciones entre los dips de transmitancia del táper SMF "C" con curvatura S.

Fuente propia

<b>Táper SMF "C"</b>	
<b>Δ Desplazamiento (μm)</b>	<b>Δ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)</b>
0	0
50	125
150	155
200	200
250	170

La Figura N° 4.17 muestra la dependencia lineal entre la variación de los dips de intensidad de transmitancia y la variación del desplazamiento que varía la curvatura del táper, para los tápers SMF "B" y "C".

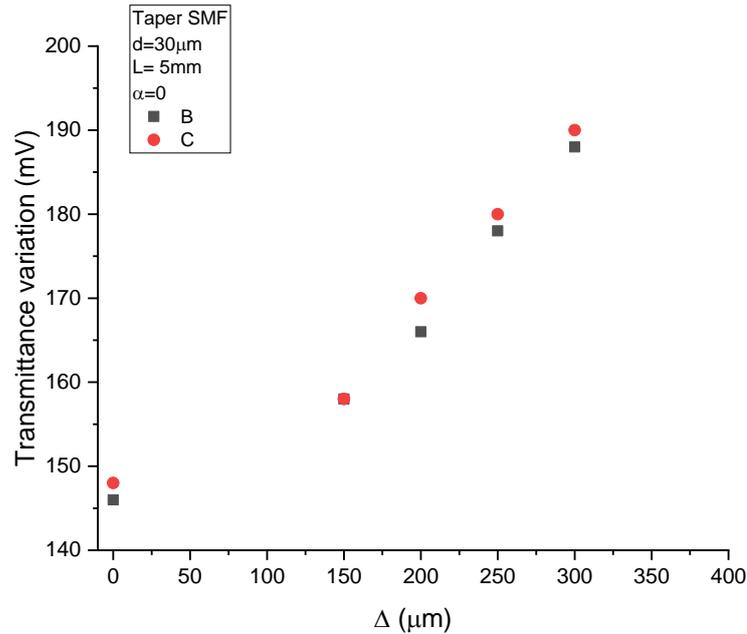


Figura N° 4.17 Dependencia lineal de la variación de los dips de intensidad de transmitancia de los tapers SMF "B" y "C", con curvatura S ( $\alpha = 0$ ) frente al desplazamiento. Fuente propia.

Un  $\alpha = 0$ , quiere decir que no presenta una disposición diferente que la curvatura S, donde  $\alpha$  representa las diferentes disposiciones de curvatura probadas en un taper, su signo dependerá de la dirección, por ejemplo, si fuera hacia arriba sería positivo y si fuera hacia abajo sería negativo (-), su valor solo implica que es una curvatura distinta puesto que no tiene medida.

#### Táper SMF "A" ( $\alpha = -0.2$ )

Para un taper con curvatura en S, cuya disposición se varió (hacia abajo), se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la Tabla N°4.5.

Tabla N° 4.5 Variaciones entre los dips de transmitancia del taper SMF "A" con curvatura S con disposición ( $\alpha = -0.2$ ). Fuente propia

Táper SMF "A"	
$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)
150	345
200	353
250	360

Táper SMF "A"	
$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)
300	370
350	378
400	388
450	397
500	405
550	412
600	418
650	420

En la Figura N° 4.18 se muestra estas variaciones entre los dips de intensidad de transmitancia en milivolts del táper SMF "A" con curvatura S y ( $\alpha = -0.2$ ).

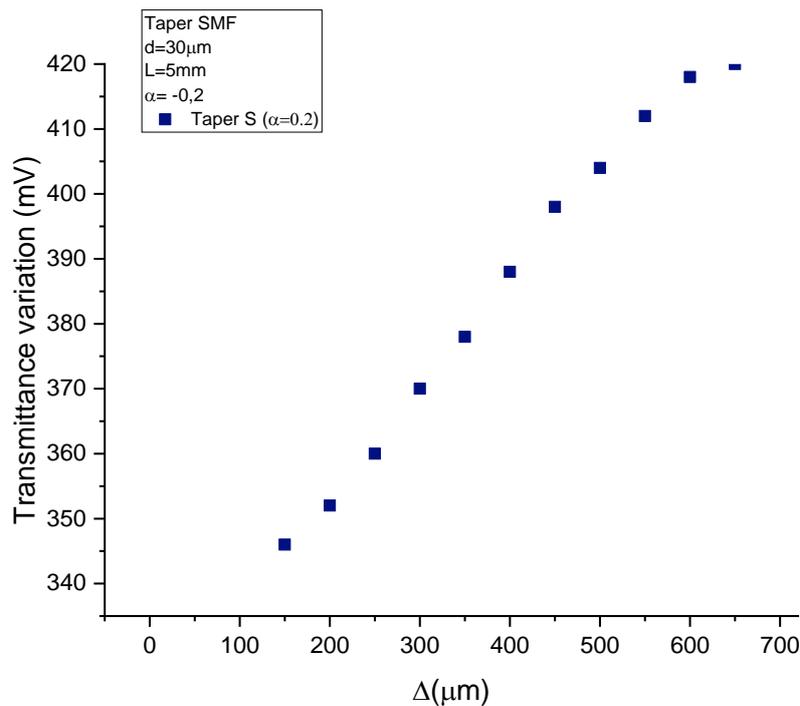


Figura N° 4.18 Dependencia lineal de la variación de los dips de intensidad de transmitancia del táper SMF "A" con curvatura S ( $\alpha = -0.2$ ) frente al desplazamiento. Fuente propia

#### 4.1.4.2 Para tapers con curvatura congelada

Para los tapers SMF "D" y "E" con curvatura congelada se hizo la misma prueba que en los casos anteriores, en la Tabla N°4.6 se muestran los resultados obtenidos para la variación entre la intensidad de transmitancia y la variación de desplazamiento.

Tabla N° 4.6 Variaciones entre los dips de transmitancia del taper SMF "D" y "E" con curvatura congelada. Fuente propia

Táper SMF "D"		Táper SMF "E"	
$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)	$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)
0	350	0	350
100	360	100	360
150	400	150	400
200	500	200	500
250	600	250	600
300	700	300	700
350	750	350	750
400	800	400	800
450	900	450	900
500	1200	495	500
550	1250	550	1250
600	1300	600	1300
650	1500	650	1600
700	2200	700	2200

En la Figura N° 4.19 se muestra el gráfico de estas variaciones para el taper SMF "D" con curvatura congelada.

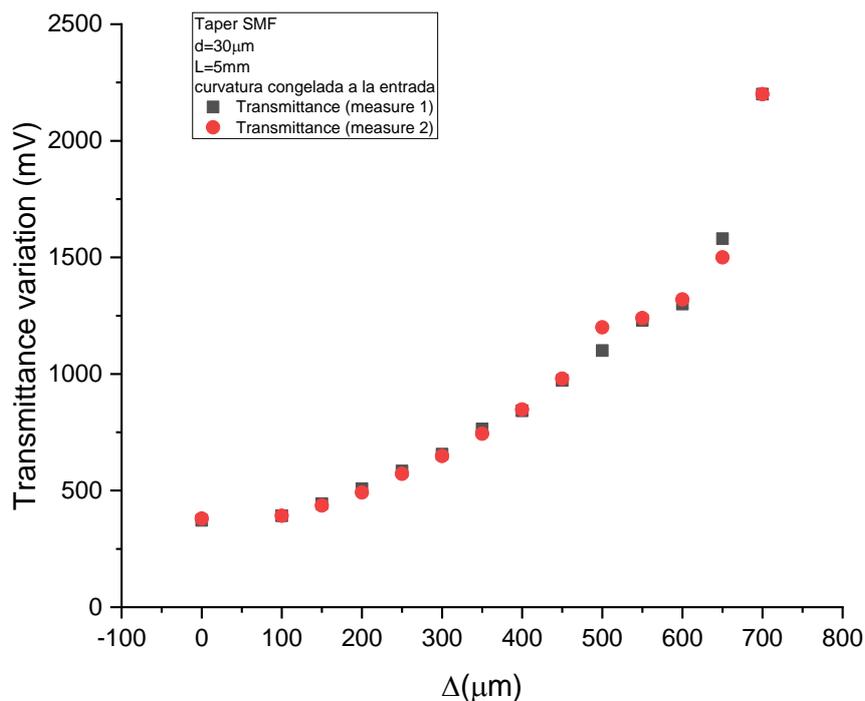


Figura N° 4.19 Variación entre los dips de intensidad de transmitancia y el desplazamiento para un tápér con “curvatura congelada”. Fuente propia

#### 4.1.4.3 Para sensores LPG

Para conocer las respuestas al desplazamiento en LPGs, se realizó la misma prueba que para los tápérs, pero empleando en este caso sensores LPG de 3 y 6 periodos. La Tabla N°4.7 muestran los resultados obtenidos para los sensores LPG evaluados.

Tabla N° 4.7 Variaciones entre los dips de transmitancia de los sensores LPG de 3 y 6 periodos. Fuente propia

LPG 3 periodos		LPG 6 periodos	
Δ Desplazamiento (μm)	Δ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)	Δ Desplazamiento (μm)	Δ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)
0	210	0	610
50	225	50	780
100	260	100	850
150	290	150	875

LPG 3 periodos		LPG 6 periodos	
$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)	$\Delta$ Desplazamiento ( $\mu\text{m}$ )	$\Delta$ Dips de Intensidad de Transmitancia (mV)
200	325	200	905
250	350	250	-
300	360	300	-

La Figura N° 4.20 muestra la variación entre los dips de transmitancia obtenidos en sensores LPG de 3 y 6 periodos.

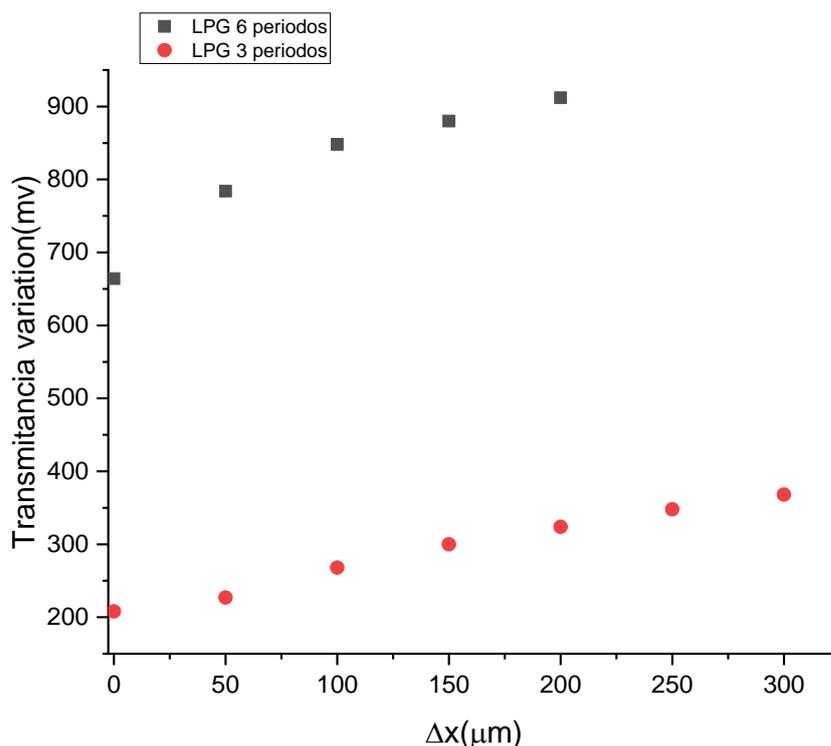


Figura N° 4.20 Dependencia lineal de la intensidad de transmitancia del sensor LPG frente al desplazamiento. Fuente propia

#### 4.1.5 Análisis y Conclusiones

De los resultados presentados en las gráficas se observa una dependencia lineal de las variaciones entre dips de transmitancia, tanto para tapers como sensores LPG. Esto permite concluir que existe una fuerte sensibilidad frente al desplazamiento, siempre que este sea controlado en rangos pequeños.

## 4.2 MEDICIÓN DEL MOE FLEXURAL EN MADERAS CON SENSOR LPG

### 4.2.1 Artículo publicado

L Mosquera, L. Yana, J. Basurto, and Ana Torre, "LPG fiber optic sensor applied to the flexural vibration monitoring and determination of dynamic Young's modulus of woods". Washington, DC United States. 22–26 June 2020. ISBN: 978-1-943580-78-1. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2020.SW1F.3>

El artículo "LPG Fiber Optic Sensor Applied to the Determination of the Flexural Elasticity Modulus of Woods" publicado por el Dr. Mosquera (asesor de la presente tesis) y Leidy Yana (tesista), muestra la viabilidad del uso de redes de largo periodo (LPG) inducidas por láser de CO<sub>2</sub> para determinar los módulos de elasticidad a la flexión de diferentes tipos de madera. Para ello, se caracteriza la respuesta dinámica de barras de diferentes maderas puestas en oscilación. Recuperando las oscilaciones de flexión de las barras a partir de la respuesta temporal de los LPG y realizando la transformada rápida de Fourier (FFT) de la misma, se obtiene las frecuencias de vibración del movimiento. El conocimiento de estas frecuencias de vibración para las longitudes de oscilación de los diferentes tipos de maderas permite calcular los módulos de elasticidad a la flexión de las muestras evaluadas. En el Anexo A.1 se adjunta este artículo científico que fue publicado e indexado en SCOPUS (2020) y presentado en el congreso de Imágenes y Aplicaciones Ópticas de la OSA (2020).

### 4.2.2 Teoría del MOE a través de vibraciones

El tratamiento formal del movimiento oscilatorio que rige la configuración en voladizo de la madera mostrada en la Figura N° 4.21, se da a través de la ecuación Euler-Bernoulli, la cual indica que la solución general tiene una forma de serie con componentes de frecuencia infinitos, que se representan mediante la ecuación (4.1), donde los módulos de densidad de material y elasticidad flexural son  $\rho$  y  $Y$ , respectivamente;  $A$  y  $L$  son, el área transversal y la longitud vibratoria de la barra;  $I$  es el segundo momento de la sección transversal que, para una barra rectangular de ancho  $b$  y profundidad  $h$ , se puede calcular como  $bh^3/12$ ;  $k_v$  es la constante de amortiguación viscosa del sistema. Las condiciones límite del problema determinan el valor de la constante  $\lambda_n$ .

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{l}\right)^4 - \left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2} \quad (4.1)$$

A medida que se centra en la determinación del módulo de Young, se puede ver, a partir de la ecuación (4.1), que el conocimiento de un solo componente de frecuencia es suficiente para alcanzar nuestro objetivo, ya que por la teoría de Timoshenko se conoce la longitud de onda  $\lambda_1$ . Por lo tanto, basta con determinar el primer componente de frecuencia,  $f_1$ , y luego encontrar los módulos de elasticidad flexural de los materiales de interés.

#### 4.2.3 Arreglo Experimental

En esta investigación, se emplearon sensores de LPG inducidos por láser de CO<sub>2</sub> de paso de 500  $\mu\text{m}$  y 2,5 mm de largo impresos en fibras ópticas estándar.

La configuración experimental se muestra en la Figura N° 4.21. Un LED superluminiscente se utiliza como fuente de luz y para tomar medidas se utiliza un fotodetector acoplado a un osciloscopio.

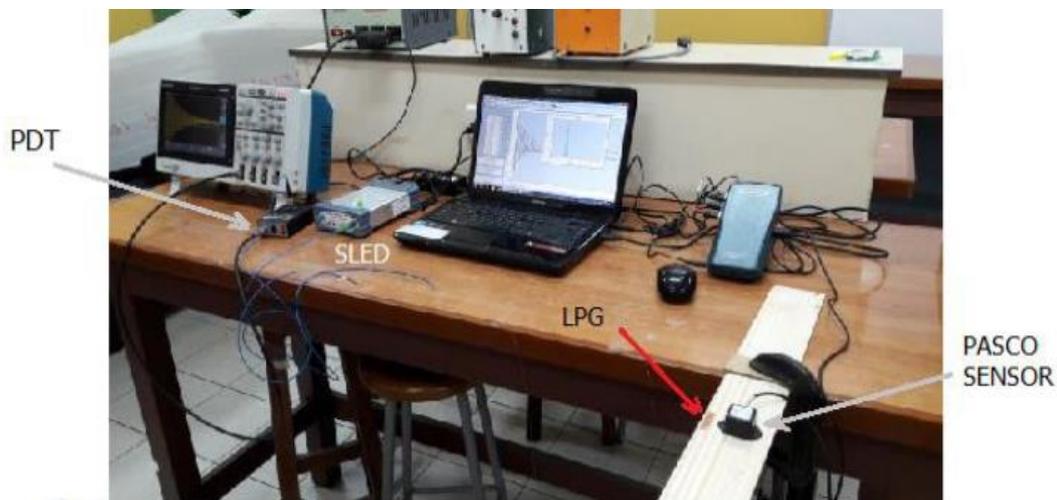


Figura N° 4.21 Arreglo experimental para la medición de MOE con sensor LPG. Fuente propia

El LPG está pegado en una barra de madera, que tiene un extremo fijo y el otro se deja libre para la perturbación. La desviación de la barra (contado como un desplazamiento vertical y del extremo de la barra libre), hace que el LPG se doble y, por lo tanto, se pueda supervisar su respuesta de curvatura.

Al detectar la luz utilizando el fotodetector, ya que su respuesta de voltaje es proporcional a la potencia óptica general de la fuente de luz de banda ancha, las variaciones de voltaje negativas están relacionadas con valores negativos  $\Delta y$  y las variaciones de voltaje positivos identificando valores positivos de  $\Delta y$ . Se vio que la dependencia del voltaje con el desplazamiento vertical de una barra es lineal (Mosquera et al., 2016).

#### 4.2.4 Propiedades de las Maderas en Estudio

La Tabla N° 4.13 muestra los valores de las dimensiones, densidades, porcentaje de humedad y momento de inercia  $I$  de las maderas estudiadas.

Tabla N° 4.8 Características de las maderas estudiadas. Fuente propia

Muestra	Tipo de madera	h (m)	b (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$I$ (Kgm <sup>2</sup> ).10 <sup>-8</sup>	CH (%)
1	Cariniana domesticata Martius (Cachimbo)	0.0158	0.0513	590	1.6862	12,42
2	Swietenia mahagoni (Caoba)	0.0148	0.0515	469	1.3926	12,50
3	Carapa guianensis Aubl. (Cedro)	0.0161	0.0510	451	1.7906	11,59
4	Pinus patula (Pino)	0.0149	0.0492	465	1.3576	10,91
5	Cedrelinga cateniformis (Tornillo)	0.0157	0.0517	470	1.6817	11,39

#### 4.2.5 Resultados y análisis del método de la "Barra Resonante"

Inicialmente, la barra puesta en oscilación en una configuración en voladizo, se desvían ligeramente y luego se libera.

Se supervisan las respuestas mediante la curvatura provocada por el movimiento del sensor LPG, la señal medida en el osciloscopio toma una forma sinusoidal cuya amplitud decae en función del tiempo (Figura N° 4.22).

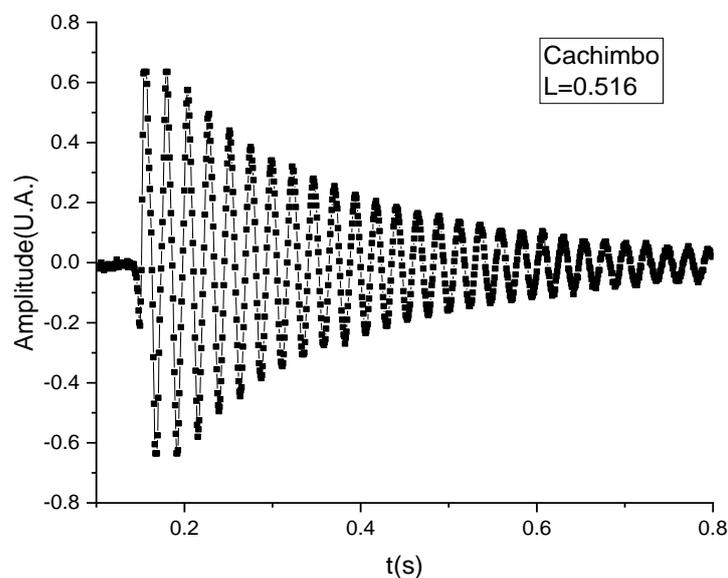


Figura N° 4.22 Movimiento Oscilatorio percibido por el sensor LPG. Fuente propia

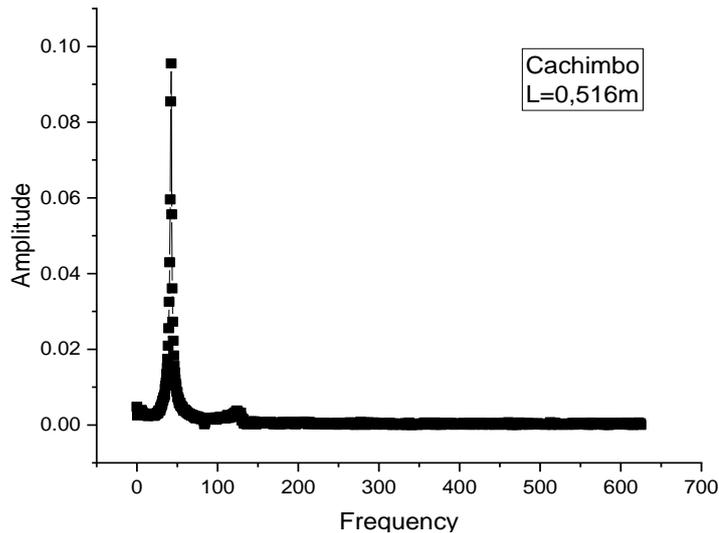


Figura N° 4.23 Transformada de Fourier con sensor LPG. Fuente propia

Las frecuencias de vibración del movimiento se obtuvieron de la transformada de Fourier (FFT), mostrada en la Figura N° 4.23, del registro tiempo historia de oscilaciones flexurales. El valor encontrado para  $K_v$  (en todos los casos) muestra:

$$\left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2 \ll \frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{l}\right)^4 \quad (4.2)$$

El valor de los módulos de elasticidad flexural del material del voladizo ( $Y$ ) se determina a partir del ajuste de la frecuencia de datos experimentales del primer modo ( $f_1$ ) frente a la longitud ( $L$ ) del voladizo. Las Tablas N°4.8, 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12, muestran los resultados de las primeras frecuencias armónicas del primer modo normal obtenidas de las transformadas de Fourier para cada tipo de madera empleada.

Tabla N° 4.9 Resultados de frecuencia para la madera *Caoba*. Fuente propia

Muestra	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)
1	0.47	50
2	0.53	42.5
3	0.583	35
4	0.635	28
5	0.69	26
6	0.745	22
7	0.81	19.5

Tabla N° 4.10 Resultados de frecuencia para la madera *Cachimbo*. Fuente propia

<b>Muestra</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
1	0.442	47
2	0.48	39
3	0.515	34
4	0.557	30.5
5	0.600	27
6	0.655	23
7	0.717	18

Tabla N° 4.11 Resultados de frecuencia para la madera *Cedro*. Fuente propia

<b>Muestra</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
1	0.470	49
2	0.516	42.2
3	0.57	36.1
4	0.618	30
5	0.679	26
6	0.735	22.1

Tabla N° 4.12 Resultados de frecuencia para la madera *Pino*. Fuente propia

<b>Muestra</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Frecuencia (Hz)</b>
1	0.458	45.5
2	0.49	39.5
3	0.523	35.5
4	0.555	28.5
5	0.59	25.5
6	0.617	24

Tabla N° 4.13 Resultados de frecuencia para la madera Tornillo. Fuente propia

Muestra	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)
1	0.445	54
2	0.495	47.5
3	0.54	38
4	0.58	34
5	0.637	29.5
6	0.705	24
7	0.75	20.5

A partir de las tablas de resultados, las Figuras N° 4.24 a la N° 4.28, muestran las curvas de ajuste de las primeras frecuencias armónicas del primer modo normal contra la longitud del voladizo (L) para barras de cinco maderas diferentes (cachimbo, caoba, cedro, pino y tornillo).

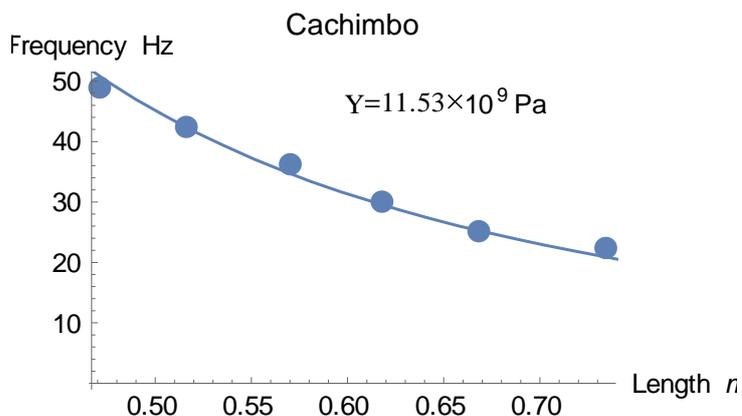


Figura N° 4.24 Trasformada de Fourier con sensor LPG para el Cachimbo. Fuente propia

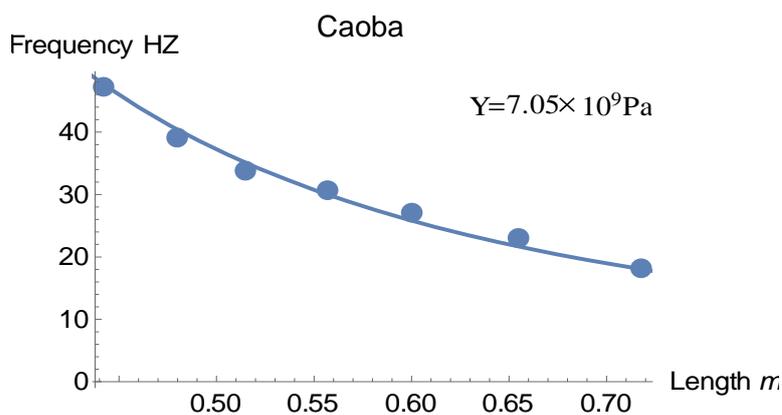


Figura N° 4.25 Trasformada de Fourier con sensor LPG para Caoba. Fuente propia

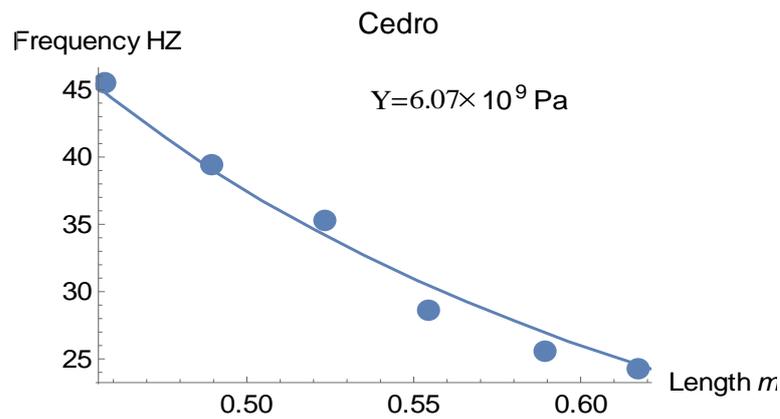


Figura N° 4.26 Trasformada de Fourier con sensor LPG para Cedro. Fuente propia

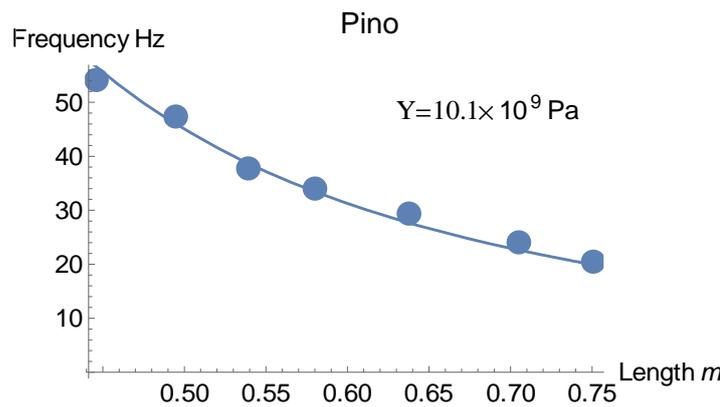


Figura N° 4.27 Trasformada de Fourier con sensor LPG para Pino. Fuente propia

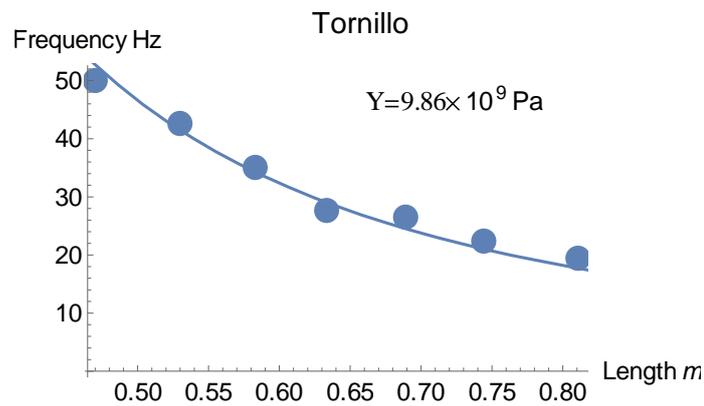


Figura N° 4.28 Trasformada de Fourier con sensor LPG para Tornillo. Fuente propia

En la Tabla N° 4.14 se muestran los módulos de elasticidad flexural determinados por esta técnica, para las cinco maderas estudiadas, basados en el ajuste de la ecuación (4.2) con sus respectivos datos experimentales. Estos resultados están en buen acuerdo con aquellos reportados en la literatura, utilizando diferentes técnicas.

Tabla N° 4.14 Módulo de elasticidad flexural de las maderas. Fuente propia

Muestra	Tipo de madera	Y (GPa)	Y referencia (GPa) L.I. – L.S.
1	Cariniana domesticata Martius ( <i>Cachimbo</i> )	11.53	9.29 - 12.84
2	Swietenia mahagoni ( <i>Caoba</i> )	7.05	7.2 - 10.3
3	Carapa guianensis Aubl. ( <i>Cedro</i> )	6.07	6.0 - 7.25
4	Pinus patula ( <i>Pino</i> )	10.1	8.0 - 13.1
5	Cedrelinga cateniformis ( <i>Tornillo</i> )	9.86	8.2 - 10.9

En la Tabla N° 4.15 se muestran los resultados de la ecuación (4.3), para el Índice de Desviación Estándar (SDI, de su acrónimo en inglés).

El SDI es una herramienta estadística que permite evaluar el desempeño; comparando los resultados obtenidos con una metodología desarrollada (la de la presente investigación) y los resultados obtenidos por otras técnicas (referencia).

$$SDI = \frac{\text{Media de (Y)} - \text{Media de (Y ref.)}}{\text{D.S.de (Y ref.)}} \quad (4.3)$$

Tabla N° 4.15 Índice de Desviación Estándar (SDI) del Y obtenido. Fuente Propia

	Y	Y referencia (GPa)	
	(GPa)	L. I.	L. S.
<b>Desv Estándar</b>	2.28	1.22	2.36
<b>Media</b>	8.92	7.74	10.88
<b>SDI</b>	-	<b>0.97</b>	<b>-0.83</b>

Los SDI calculados para los límites de referencias están entre +/-1.0, esto quiere decir que pertenecen al rango aceptable.

#### 4.2.6 Análisis y Conclusiones

- Se muestra satisfactoriamente la aplicación de redes de período largo de fibra óptica, a la monitorización de vibraciones y la determinación de módulos de elasticidad flexural (MOE) para los diferentes tipos de madera analizados.

- Los módulos de elasticidad flexural determinados experimentalmente para las muestras analizadas: Cachimbo, Caoba, Cedro, Pino y Tornillo; están de acuerdo con los valores reportados en la literatura, utilizando otras técnicas.
- Los SDI (Índice de Desviación Estándar) calculados con respecto a los límites de los MOE de referencia, indican un desempeño aceptable del equipo de laboratorio.

### 4.3 MEDICIÓN DEL FLUJO DE AGUA EN UNA TUBERÍA CON SENSOR LPG

#### 4.3.1 Artículo publicado

L Yana, L Mosquera, and F Loayza, "Fluid flow measurement using LPG fiber optic sensor". Washington, DC United States. 19–23 July 2021. ISBN: 978-1-943580-90-3. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2021.STu1A.6>

El artículo "Fluid flow measurement using LPG fiber optic sensor" publicado por Leidy Yana (tesista) y el Dr. Mosquera (asesor de la presente tesis), muestra la viabilidad de utilizar un sensor de LPG grabado en fibra óptica monomodo para determinar los caudales correspondientes a diferentes niveles de descenso en un tanque vertical lleno de líquido. Para ello, se caracteriza la respuesta dinámica con un sensor de LPG en un orificio de área transversal mucho menor que la del tanque, que se encuentra en la base inferior del mismo, la velocidad del agua viene dada por la ecuación de Torricelli, y tras algunas reducciones derivamos la relación entre la variación de la transmitancia y la variación de la altura  $h$  del líquido en el tanque. Conociendo las curvas de ajuste de las medidas realizadas directamente por el caudalímetro Arduino y los datos de lectura de transmitancia del sensor LPG, se observa una buena concordancia entre ambos. El rango de medida de este sensor es ajustable variando las dimensiones y el material del voladizo.

En el Anexo A.2 se adjunta este artículo científico que fue publicado y presentado en el congreso de Imágenes y Aplicaciones Ópticas de la OSA

#### 4.3.2 Teoría de sensores LPG en flujos

##### 4.3.2.1 Viga en voladizo para flujos

Una varilla está dispuesta en una configuración en voladizo tal como es muestra en la Figura N° 4.29.

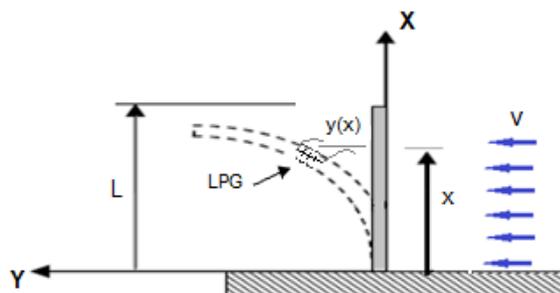


Figura N° 4.29 Diagrama esquemático de la deformación del apoyo en voladizo de la fibra óptica debido al flujo de fluido. Fuente propia

Para pequeñas variaciones del esfuerzo axial sobre la LPG pegada a la varilla se puede considerar una relación lineal entre la variación de la intensidad de la luz transmitida por la LPG con la variación del desplazamiento transversal  $\Delta y$  de la placa como la ecuación (4.4) [2.35].

$$\Delta I = K\Delta y \quad (4.4)$$

Por otro lado, el análisis de deformación flexural de la varilla en configuración de voladizo permite deducir la ecuación (4.5) correspondiente a la deflexión  $y(x)$  originada por el paso de un fluido actuando uniformemente sobre esta.

$$y(x) = \frac{Fx^2}{24L(EI)}(x^2 - 4Lx + 6L^2) \quad (4.5)$$

#### 4.3.2.2 Fuerza ejercida por el fluido

La fuerza "F" ejercida por el fluido que impacta la varilla se expresa mediante la ecuación:

$$\frac{F}{L} = \frac{c}{L}\rho Av^2 \quad (4.6)$$

Donde:

- $F$  : Fuerza uniforme actuando sobre la superficie de la varilla
- $E$  : Módulo de elasticidad flexural de la varilla
- $I$  : Momento de inercia de la sección transversal
- $L$  : Longitud de la varilla en voladizo
- $A$  : Área de impacto con la varilla
- $\rho$  : Densidad del fluido
- $v$  : Velocidad del flujo

Cuando un sensor LPG se pega a la varilla, se observan cambios en la intensidad "I" de la luz transmitida por la fibra debido a su curvatura. La ecuación (4.4) muestra la relación lineal entre  $\Delta I$  y la amplitud de deformación  $\Delta y$  de la curvatura del voladizo.

Si se tiene un depósito vertical lleno de agua hasta una altura "h", la velocidad de salida del agua "v" a través de un orificio situado en la base inferior del depósito viene dada por la ecuación de Torricelli,  $v^2 = 2gh$ , para un orificio de sección transversal mucho menor que la del depósito.

Reemplazando la ecuación (4.6) en la ecuación (4.5), y teniendo en cuenta la relación lineal entre  $\Delta I$  y  $\Delta y$ , se deduce una respuesta lineal entre la variación de la transmitancia y la variación de la altura del líquido en el depósito.

$$y(h) = \frac{c}{L} \rho A 2g \frac{x^2}{24(EI)} (x^2 - 4Lx + 6L^2)h = ah \quad (4.7)$$

Donde “a” es una constante.

La ecuación (4.7) muestra la relación lineal entre la deformación “y” del voladizo y la altura “h” del nivel de agua en el tanque. Dado que la variación de la intensidad de la luz transmitida por la fibra óptica es proporcional a  $\Delta y$ . Por lo tanto, el caudal de salida se puede calcular conociendo  $h$  o  $y(h)$ , o midiendo  $\Delta I$ , como se muestra en la ecuación (4.8).

$$Q = A\sqrt{2g}\sqrt{h} \quad (4.8)$$

#### 4.3.3 Arreglo Experimental

Una vez fabricado y calibrado ópticamente el sensor LPG de fibra óptica, se procede a implementar el dispositivo para medir la velocidad de flujo.

A fin de acompañar nuestros resultados con mediciones hechas por instrumentos convencionales calibrados, se aplicará el sensor en la medición del caudal de agua en una tubería. Para ello, se monta el dispositivo mostrado esquemáticamente en la Figura N° 4.30.

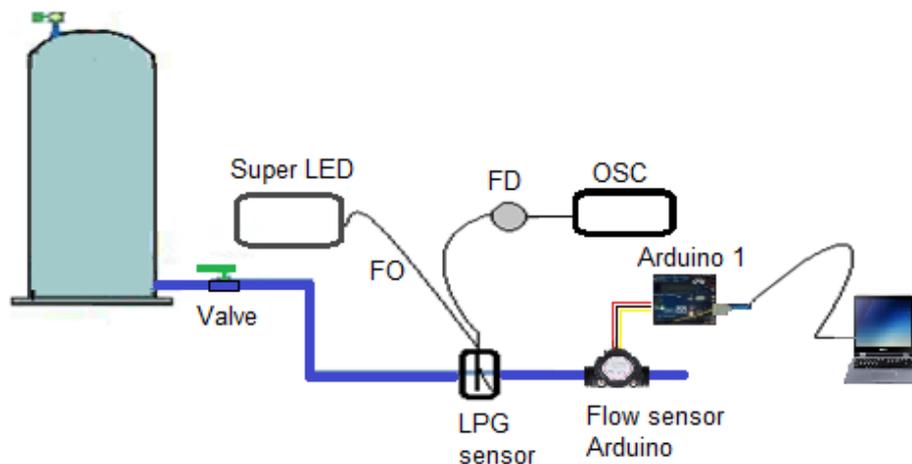


Figura N° 4.30 Esquema del arreglo experimental para la medición de flujo. Fuente propia

Regulando el flujo de agua en la tubería se toman los datos (en forma automatizada) de la transmitancia de la fibra (convertida a voltaje DC) versus el caudal en la tubería.

La lectura paralela del caudal por un caudalímetro electrónico permitirá calibrar el dispositivo. La automatización de la toma de datos se realizará empleando una tarjeta Arduino para la adquisición por una PC de los voltajes de salida de la señal de fibra óptica.

En la Figura N° 4.31 se muestra el arreglo experimental de la aplicación del sensor LPG en la medición de flujo de agua.



Figura N° 4.31 Arreglo experimental para la medición de flujo en una tubería con sensor LPG.

Fuente propia

La Figura N° 4.32 muestra un diagrama en detalle del sensor de flujo basado en una LPG grabada en fibra óptica monomodo comercial.

La curvatura del cantiléver es ocasionada por el paso del flujo de agua, esto deforma la fibra óptica con una red LPG grabada sobre ella, originando una pérdida en la transmitancia, por lo que el monitoreo de la transmitancia de la fibra permitirá medir el flujo del fluido en tiempo real.

Para relacionar los resultados de lectura de la Intensidad transmitida por la fibra óptica con la velocidad del flujo se usará la ecuación (4.8).

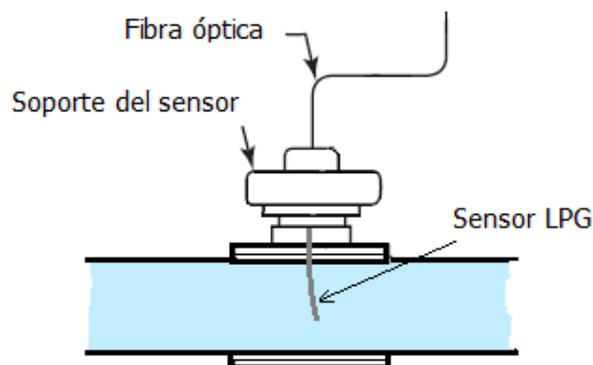


Figura N° 4.32 Esquema del arreglo experimental en voladizo para tubería. Fuente propia

#### 4.3.4 Resultados experimentales

La Tabla N° 4.16 muestra los resultados de los caudales obtenidos mediante el uso de alturas “h” del nivel de agua en el depósito, medidos directamente por el caudalímetro Arduino y su curva de ajuste en la Figura N° 4.33.

Tabla N° 4.16 Caudales obtenidos por el caudalímetro Arduino. Fuente propia

Altura “h” (m)	Caudal Arduino “Q” (L/min)
0.48	7.70
0.51	7.90
0.54	8.25
0.57	8.39
0.60	8.70
0.63	8.80
0.66	9.00
0.69	9.29
0.72	9.42

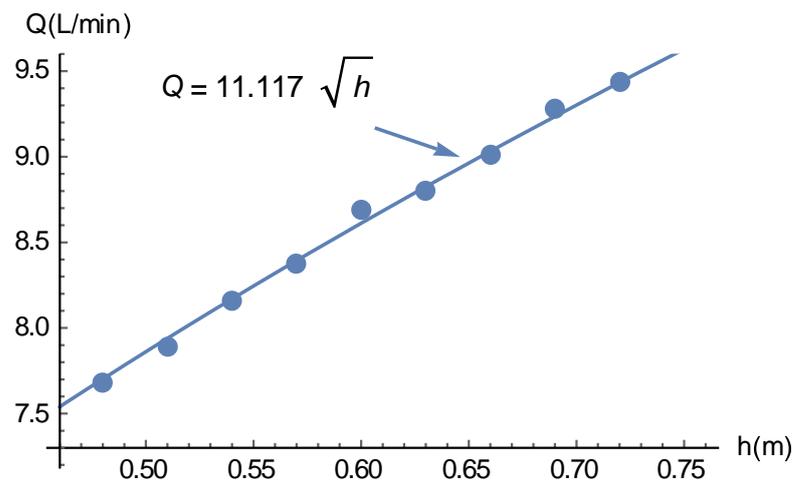


Figura N° 4.33 Caudal de salida frente a la altura del agua en el tanque medido con el sensor de efecto Hall del arduino YF-S201. Fuente propia

Los datos de lectura de la transmitancia del sensor LPG se muestran en la Tabla N°4.17 y su curva de ajuste se muestran en la Figura N° 4.34.

Tabla N° 4.17 Caudales obtenidos por el sensor LPG. Fuente propia

Altura "h" (m)	Transmitancia "T" (mv)
0.36	0.19
0.42	0.26
0.47	0.31
0.54	0.35
0.57	0.38
0.63	0.41
0.72	0.5

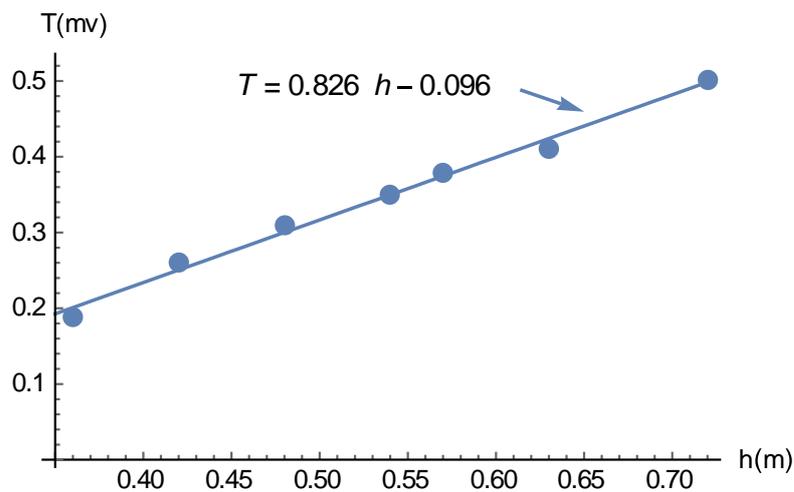


Figura N° 4.34 Caudal de salida frente a la altura del agua en el tanque medido con el sensor de fibra óptica tipo LPG. Fuente propia

La línea mostrada en la Figura N° 4.34 como resultado de la aplicación del sensor LPG en la medición de flujo, muestra una buena concordancia con el modelo teórico desarrollado para el caudalímetro Arduino. El rango de medición de este sensor es ajustable variando las dimensiones y el material del voladizo.

De las curvas ajustadas de las Figura N° 4.33 y N° 4.34 se obtienen las siguientes ecuaciones (4.9) y (4.10):

$$Q = 11.117\sqrt{h} \quad (4.9)$$

$$T = 0.826h - 0.096 \quad (4.10)$$

Despejando la altura de la ecuación (4.9) se obtiene:

$$h = Q^2/123.588 \quad (4.11)$$

A continuación, se realiza el cálculo del caudal obtenido con las mediciones de Transmitancia por el sensor LPG, reemplazando (4.11) en (4.10):

$$T = Q^2/149.622 - 0.096 \quad (4.12)$$

Despejando Q, se obtiene la ecuación (4.13), con la cual finalmente podemos encontrar los caudales medidos con el sensor LPG en (L/min).

$$Q = \sqrt{149.622 * (T + 0.096)} \quad (4.13)$$

En la Tabla N° 4.18 se muestran los caudales determinados con los sensores LPG, con ayuda de la ecuación hallada (4.13), los cuales están en buen acuerdo con los obtenidos por la técnica de referencia, en este caso los obtenidos con el caudalímetro Arduino.

Tabla N° 4.18 Comparación de caudales de flujo en la Tubería. Fuente propia

Altura h (m)	Q Sensor LPG (L/min)	Q Arduino (L/min)
0.36	6.54	6.67
0.42	7.30	7.20
0.47	7.79	7.62
0.54	8.17	8.17
0.57	8.44	8.39
0.63	8.70	8.82
0.72	9.44	9.43

Para encontrar el Índice de Desviación Estándar se emplea la ecuación (4.xx) [4.3] y el resultado se muestra en la Tabla N° 4.19.

$$SDI = \frac{\text{Media de (Y)} - \text{Media de (Y ref.)}}{\text{D.S.de (Y ref.)}} \quad (4.xx)$$

Tabla N° 4.19 Índice de Desviación Estándar (SDI) del Q obtenido. Fuente Propia

	Q Sensor LPG (L/min)	Q Referencia Arduino (L/min)
<b>Desv Estándar</b>	0.95	0.95
<b>Media</b>	8.06	8.05
<b>SDI</b>	-	<b>0.01</b>

El SDI calculado se encuentra en el rango de  $\pm 1.0$ , esto quiere decir que es aceptable.

#### 4.3.5 Análisis y Conclusiones

- Los flujos de agua probados en una configuración de LPG Cantilever, se lograron con la asistencia de sensores de fibra óptica tipo LPG.
- Los valores de las diferentes mediciones de flujo determinadas permiten encontrar la ecuación tendencia del flujo en función de la altura gracias a su lectura de transmitancia. Esto indica que las redes de largo periodo se pueden emplear directamente en la caracterización dinámica del flujo de fluidos, en este caso, el agua.

## CONCLUSIONES

1. La presente tesis demuestra satisfactoriamente la fabricación, caracterización y aplicación de sensores con redes LPG en la monitorización de desplazamientos, vibraciones y curvatura.
2. La sensibilidad al desplazamiento depende de la curvatura en el caso de tápers, siendo mejor la de curvatura congelada. Asimismo, los sensores LPG muestran ser sensibles al desplazamiento, donde existe dependencia lineal entre las variaciones de intensidad de transmitancia y la variación de desplazamiento.
3. Con el monitoreo de vibraciones es posible determinar los módulos de elasticidad flexural (MOE) para diferentes tipos de madera analizados: Cachimbo, Caoba, Cedro, Pino y Tornillo, están en buen acuerdo con los valores reportados por la literatura (empleando técnicas diferentes).
4. Las redes de fibra de período largo se pueden emplear directamente en la caracterización dinámica de las propiedades elásticas de un material.
5. Los sensores LPG muestra buena sensibilidad frente a cambios de curvatura, lo cual permite obtener una aplicación de estos en la determinación del caudal de un flujo de fluido.
6. Los valores de las mediciones de flujo a diferentes alturas del tanque de agua determinados por los sensores LPG, permiten relacionar el caudal con la transmitancia. Con lo cual se concluye que las redes de largo periodo se pueden emplear directamente en la caracterización dinámica del flujo de fluidos.
7. La presente tesis sirvió de base en la presentación de 02 artículos científicos en Congresos Internacionales publicados en el OSA Journal y 01 indexado en SCOPUS.

## **RECOMENDACIONES**

1. Se podría realizar un control de desempeño interno para la instrumentación utilizada, incluyendo otras herramientas del Sistema de Control de Calidad, para trabajos a futuro.
2. Se puede partir de esta investigación, adecuando las condiciones de los sensores LPG para otros tipos de materiales; por ejemplo, en el sensado de la concentración de sustancias químicas presentes en soluciones, relacionados al control ambiental y la bio-medicina.
3. Se recomienda extender el empleo de sensores LPG en la medida de desplazamientos, curvatura, presiones, vibraciones, valores de índices de refracción, todo ello visando a su aplicación en el monitoreo de edificaciones en nuestro país.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agrell, E., Karlsson, M., Chraplyvy, A. R., Richardson, D. J., Krummrich, P. M., Winzer, P., . . . Gisin, N. (2016). Roadmap of optical communications. *Journal of Optics*, 18, 6, 1 - 40. doi:10.1088/2040-8978/18/6/063002
- Ang, J. L., Idapalapati, S., & Asundi, A. K. (2012, August 26-30). Flow Measurements using a Simple Fiber Optic Technique. *The 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research (ACEM' 12)*. Retrieved from [http://www.i-asem.org/publication\\_conf/acem12/W3A-1.pdf](http://www.i-asem.org/publication_conf/acem12/W3A-1.pdf)
- Arévalo, G. (2014). *Comunicaciones por Fibra Óptica*. Folleto, Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Maestría en Redes de Comunicaciones, Quito, Ecuador.
- Aróstegui, A., & Sato, A. (1970). Study of the physical-mechanical properties of wood from 16 forest species in Peru. *Revista Forestal del Perú*, 4(1-2), 1-13. Retrieved from <http://revistas.lamolina.edu.pe/index.php/rfp/article/view/1082/1032>
- Bao, X., & Chen, L. (2012). Recent Progress in Distributed Fiber Optic Sensors. *Sensors*, 12, 8601-8639.
- Beltrán, J. P. (2014). *Diseño de Redes de Fibra Óptica*. Centro de Educación, Quito, Ecuador.
- Bobb, L., Shankar, P. M., & Krumboltz, H. D. (1990, July). Bending Effects in Biconically Tapered Single-Mode. *Journal of Lightwave Technology*, 8(7), 1084-1090.
- Cabezas, A., & Pinto, R. (2014). *Sistemas de Comunicaciones Ópticas*. Monografía, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, D.C.
- Chen, J.-H., Huang, X.-G., Zhao, J.-R., Tao, J., He, W.-X., & Liu, S.-H. (2010). Fabry–Perot interference-based fiber-optic sensor for small displacement measurement. *Optics Communications*, 283, 3315-3319. doi:10.1016/j.optcom.2010.04.401

- Costa, J. W., Franco, M. A., Serrão, V. A., Cordeiro, C. M., & Giraldi, M. T. (2019). Macrobending SMS Fiber-Optic Anemometer and Flow Sensor. *Optical Fiber Technology*, 52(IId. 101981), 1-9. doi:10.1016/j.yofte.2019.101981
- Criollo, L. (2015). *Diseño de una Red Convergente de Fibra Óptica para interconectar los Campus de la Universidad de las Américas*. Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8078>
- Digilov, R. M., & Abramovich, H. (2013). Flexural Vibration Test of a Beam Elastically Restrained at One End: A New Approach for Young's Modulus Determination. (X. Chen, Ed.) *Advances in Materials Science and Engineering*. doi:10.1155/2013/329530
- Dionisio, E. (2017). *Diseño e implementación de empalmería de fibra óptica de planta externa del enlace Carip-Tarma-La merced de la red de Transmisión de fibra óptica de la empresa America movil*. Universidad Peruana de Los Andes. Huancayo: Repositorio UPLA.
- Du, Y., & Veciana, G. (2016). Efficiency and optimality of largest deficit first prioritization: Resource allocation for real-time applications. *IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*. San Francisco, CA, USA: IEEE.
- Elcoso Usieto, I. (2018). Desarrollo de Sensores de Fibra Óptica para la Detección de Compuestos Orgánicos e Inorgánicos en Medio Acuoso. *Tesis de Grado*. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España. Retrieved from <https://hdl.handle.net/2454/30641>
- Erdogan, T. (1997). Fiber Grating Spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8), 1277-1294. doi:10.1109/50.618322
- Espinoza, C. R. (2014). *Estudio de guías de onda ópticas de índice escalón obtenidas por multi-implantación de iones de plata*.
- Fan, C.-f., Chiang, C.-l., & Yu, C.-p. (2011). Birefringent photonic crystal fiber coils and their application to transverse displacement sensing. *Optics Express*, 19(21), 19948-19954. doi:10.1364/OE.19.019948

- Fernández, S. (2009, Setiembre 24). *EMTT*. Retrieved from Adiós a las atenuaciones por curvaturas: <http://marismas-emtt.blogspot.com/2009/09/adios-las-atenuaciones-por-curvaturas.html>
- Ferraro, P., & De Natale, G. (2002). On the possible use of optical fiber Bragg. *Optics and Lasers in Engineering*, 37(2-3), 115–130. doi:10.1016/S0143-8166(01)00141-5
- Filio, E., & Mora, A. (2008). *Propuesta de Sistema de Monitoreo de Red Lineal de Fibra Óptica con cable OPGW para luz y fuerza*. Tesis, Ciudad de México.
- Fleming, J. A., Lightcap, E. S., Sadis, S., Thoroddsen, V., Bulawa, C. E., & Blackman, R. K. (2002). Complementary whole-genome technologies reveal the cellular response to proteasome inhibition by PS-341. *SGD Saccharomyces Genome Database*, 99(3), 1461-1466. doi:10.1073/pnas.032516399
- Fujiwara, E., Hayashi, J. G., Delfino, T. d., Jorge, P. A., & Cordeiro, C. M. (2019). Optical Fiber Anemometer Based on a Multi-FBG Curvature Sensor. *in IEEE Sensors Journal*, 19(19), 8727-8732. doi:10.1109/JSEN.2019.2923046
- Ganguly, A. K. (2011, January 6-7). Fluid Flow Measurement Using Bending Loss of Optical Fiber. *Proceedings of National Conference NATCONIC*. Retrieved from [http://www.researchgate.net-publication/275355114\\_Fluid\\_Flow\\_Measurement\\_Using\\_Bending\\_Loss\\_Of\\_Optical\\_Fiber](http://www.researchgate.net-publication/275355114_Fluid_Flow_Measurement_Using_Bending_Loss_Of_Optical_Fiber)
- García, L. (2018). *Rejillas de Periodo Largo en Fibra Óptica: Fabricación y caracterización*. Centro de Investigaciones en Óptica. León, Guanajuato, México: A. C.
- Gonzalez, J. S. (2004, Marzo). Growth, properties and uses of Western Red Cedar. *37R(Segunda)*, 29-30. Vancouver, Columbia Británica, Canadá: Forintek Canada Corp. doi:ISSN 0824-2119
- Gregory Cooper, W. (2007). *Sistemas de Control de Calidad Básico e Intermedio para el Laboratorio Clínico*. (R. Neill Carey, Ed.) *BIO - RAD*, 2da. edición. Retrieved from [https://www.qcnet.com/Portals/60/PDFs/BasicQCBklt\\_Sp\\_May11.pdf](https://www.qcnet.com/Portals/60/PDFs/BasicQCBklt_Sp_May11.pdf)

- Guano, H. A., Molina, P. C., & Jiménez, M. S. (2014). Estudio y Simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una Fibra Óptica Monomodo. *Revista Politécnica*, 33(1). Retrieved from [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/134](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/134)
- Hecht, E. (2000). *ÓPTICA* (Tercera ed.). Madrid: Addisson Wesley Iberoamericana. doi:ISBN: 82-1820425-7
- Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., & Kawasaki, B. S. (1978). Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection filter fabrication. *Applied Physics Letters*, 32, 647-649. Retrieved from <https://doi.org/10.1063/1.89881>
- Huang, J., Lan, X., Wang, H., Yuan, L., Wei, T., & Gao, Z. (2012). Polymer optical fiber for large strain measurement based on multimode interference. *Optics Letters*(37), 4308-4310.
- Jeong, H., & Oh, K. (2003). Theoretical analysis of cladding-mode waveguide dispersion and its effects on the spectra of long-period fiber grating. *Journal of Lightwave Technology*, 21(8), 1838-1845. doi:10.1109/JLT.2003.815641
- Jiménez, M. S. (2012). *Características de la fibra óptica*. Folleto, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Jiménez, M. S., & Carrera, C. A. (2015). Estudio y Simulación del efecto no lineal Automodulación de fase (SPM). *Revista Politécnica*, 35(1). Retrieved from [https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/article/view/351](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/351)
- Johnson, M. (2009). *Optical fibres, cables and systems*. Ginebra, Suiza: ITU Telecommunication Standardization Sector. Retrieved from <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/13477/T-HDB-OUT.10-2009-1-PDF-E.pdf?sequence=2>
- Jorge, & Martinez Lafuente, J. (2014). *Análisis Paramétrico de Transiciones a Bocinas*. Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicaciones, Madrid.

- Kaminow, I., Li, T., & Willner, A. (2013). *Optical Fiber Telecommunications Volume VIA* (Vol. 6th Edition). San Diego, United States: Elsevier Science Publishing Co Inc.
- Kashyap, A. K., & Kalpagam, V. (1979). Dilute solution properties of methyl methacrylate/acrylonitrile random copolymers, 1. Mark-Houwink relation. *WILEY*, 180.
- Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, P., & Sridhar, S. (2010). Experimental studies on fiber optic sensors embedded in concrete. *Measurement*, 43, 157–163.
- Kesavan, K., Ravisankar, K., Parivallal, S., Sreeshylam, S., & Narayanan, T. (2004). A TECHNIQUE FOR EMBEDDING EFPI FIBER OPTIC STRAIN SENSORS IN CONCRETE. *Experimental Techniques*, 28 (4), 31-33.
- Knight, J. C., Birks, T. A., Russell, P. J., & Atkin, D. M. (1996). All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding. *Optics Letters*, 21(19), 1547–1549.
- Kolpakov, S. A., Gordon, N. T., Mou, C., & Zhou, K. (2014). Toward a New Generation of Photonic Humidity Sensors. *Sensors*, 14, 3986-4013.
- Langbourd, P., & all., e. (2011). Comparison of wood properties of planted big-leaf Mahogany (*Swietenia Macrophylla*) in Martinique island with naturally grown Mahogany from Brasil, Mexico and Perú. *Journal of tropical Forest Science*, 23(3), 252-259. Retrieved from [https://agritrop.cirad.fr/560903/1/document\\_560903.pdf](https://agritrop.cirad.fr/560903/1/document_560903.pdf)
- Large, M. C., Aygyros, A., Zagari, J., Manos, S., Issa, N. A., Basset, I. M., . . . van Eijk Elenburg, M. A. (2002). *Microstructured polymer optical fibres: progress and promise*. Optical Society of America.
- Leung,, C. K., Wan, K. T., & Chen, L. (2008). A Novel Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion in Concrete. *Sensors*, 8, 1960-1976.
- Liu, J. G., Hattenberger, C. S., & Borm, G. (2002). D ynamic strain measurement with a fibre Bragg grating sensor. *Measurement*, 32, 151–161.
- Mejía Aranda, A. R. (2018). Elaboración de un Sensor de Presión de Fibra Óptica mediante la Técnica de Interferencia Multinodal (MMI). *Tesis de Doctorado*

- en Ingeniería y Ciencias Aplicadas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, México. Retrieved from <http://riaa.uaem.mx/xmlui/handle/20.500.12055/460>
- Mera, D. A., Pabon, B. F., & Jiménez, M. S. (2002). *Estudio y diseño de las redes ópticas WDM (Wavelength Division Multiplexing) y su aplicación en redes de acceso*. Proyecto de titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/5041>
- Mesa Yandy, A. M. (2018). *Diseño, Desarrollo, Caracterización y Análisis de Sensores de Fibra Ópticas: Aplicación al Estudio de Materiales y Estructuras. Tesis de Doctora en Ingeniería*. Universidad Nacional de la Plata, La Plata, Argentina. Retrieved from <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/66531>
- Moropoulou, A., Labropoulos, K. C., Delegou, E. T., Karoglou, M., & Bakolas, A. (2013). Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1222-1239.
- Mosquera Leiva, L., Osório, J. H., & Cordeiro, C. M. (2016). Determination of Young's Modulus using Optical Fiber Long-Period Gratings. *Measurement Science and Technology*, 1-6. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/0957-0233/27/1/015102>
- Mosquera, K., Osório, J. H., & Cordeiro, C. M. (2015). Determination of Young's Modulus using Optical Fiber Long-Period Gratings. *Measurement Science and Technology*, 1-6. Retrieved from <http://iopscience.iop.org/0957-0233/27/1/015102>
- Mosquera, L., & Basurto, P. (2018). Monitoring of Stresses and Deformations in Soils by Fiber Optic Sensors. *Innovation in Education and Inclusion: Proceedings of the 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, 1-6. Retrieved from <http://laccei.org/LACCEI2018-Lima/meta/FP416.html>
- Mosquera, L., Yana, L., & Basurto, J. (2020). LPG Fiber Optic Sensor Applied to the Determination of the Flexural Elasticity Modulus of Woods. *EasyChair*, 2632. Retrieved from <https://easychair.org/publications/preprint/sM9c>

- Nabil, E., & all., e. (2018). Evaluation of Physical, Mechanical and Chemical Properties of Cedar and Sycamore Woods after Heat Treatment. *Egyptian Journal of Chemistry*, 61(6), 1131-1149. doi:10.21608/ejchem.2018.4301.1383
- Orłowska, K., Słupski, P., Świątkowski, M., Kunicki, P., Sankowska, A., & Gotszalk, T. (2015). Light Intensity Fibre Optic Sensor for MEMS displacement and vibration metrology. *Optics & Laser Technology*, 65, 159-163. doi:10.1016/j.optlastec.2014.07.019
- Ortiz Zacarías, J. E. (2015). Sensor Óptico de Nivel de Líquidos. *Tesis de Maestría en Optomecatrónica*. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C., Guanajuato, México. Retrieved from <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/802>
- Park, H. S., Yong Song, K., & Hyun Yun, S. (2002). All-Fiber Wavelength-Tunable Acoustooptic Switches Based on Intermodal Coupling in Fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 20, pp. 1797-1884. Piscataway, USA.
- Rodrigues Pinto, A. M., Baptista, J. M., Santos, J. L., Lopez Amo, M., & Frazão, O. (2012). Micro-Displacement Sensor Based on a Hollow-Core Photonic Crystal Fiber. *Sensors*, 12, 17497-17503. doi:10.3390/s121217497
- Rodríguez Gutiérrez, G. (2017). Monitorización de Estructuras de Hormigón mediante Sensores de Fibra Óptica Distribuida. *Tesis doctoral*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Retrieved from <https://www.tdx.cat/handle/10803/458246>
- Rojas, J. (2019). *Fabricación y Caracterización de Redes de Periodo Largo*. Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín, Colombia: ResearchGate. doi:10.13140/RG.2.2.13520.12804
- Román, R. (2010). *Diseño de la ampliación de la red de comunicación de EmelNorte utilizando fibra óptica y tecnología inalámbrica*. Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador: EPN. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3731>
- Salgado Díaz, P. (2013). Estudio y Desarrollo de Sensores de Fibra Óptica para Detección de Vibraciones en Ductos Ascendentes Submarinos. *Tesis*

- Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Retrieved from <http://oa.upm.es/22149/>
- Shindo, A. (2004). Research and development of carbon fiber. *Kinki Kagaku Koyokai*(611), 5-8.
- Snyder, A. W., & Love, J. D. (1983). *Optical Waveguide Theory*. Canberra, Australia: IBT Global. London .
- Tanaka, S., Somatomo, H., Wada, A., & Takahashi, N. (2009). Fiber-Optic Mechanical Vibration Sensor Using Long-Period Fiber Grating. *Japanese Journal of Applied Physics*, 48. doi:10.1143/JJAP.48.07GE05
- Tomasi, W. (2003). *Sistema de Comunicaciones Electrónicas* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- Vengsarkar , A. M., Lemaire, P. J., Judkins, J. B., Bhatia, V., Erdogan , T., & Sipe, J. E. (1996). Long-period grating as band-rejection filters. *Journal of Lightwave Technology*, 14, 58-64.
- Wheeler, L., Take, W., Hout, N., & Le, H. (2019). Use of Fiber Optic Sensing to Measure Distributed Rail Strains and Determine Rail Seat Forces Under a Moving Train. *Canadian Geotechnical Journal*,56, 1-13. doi:10.1139/cgj-2017-0163
- Winzer, A. (2018). *Stockholm Blues: Kurzprosa* (Vol. Ed. 1). Alemania: Books on Demand.
- Yang, H. Z., Qiao, X. G., Luo, D., Lim, K. S., Chong, W., & Harun, S. W. (2014). A review of recent developed and applications of plastic fiber optic displacement sensors. *Measurement*, 48, 333-345. doi:10.1016/j.measurement.2013.11.007
- Yoza, L., Baradit, E., & Acevedo, M. (2015). Characterization of the physical mechanics properties of the peruvian species, pino (*pinus patula*) and tornillo (*cedrelinga cateniformis*) by using non destructives techniques. *Anales Científicos*, 76(1), 12-16. doi:10.21704/ac.v76i1.758
- Zárate, J., & Gutierrez, Ó. (2012). Wood species used in Boyacá characterization, according the Colombian Earthquake-Resistant Construction's

Regulations. *Engineering Faculty Journal, UPTC*, 21(32), 73-91. doi:ISSN-e 0121-1129

Zhanga, Y.-n., Zhao, Y., & Wang, Q. (2014). Improved design of slow light interferometer and its application inFBG displacement sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 168-174. doi:10.1016/j.sna.2014.04.034

## ANEXOS

### ANEXO A. ARTÍCULOS PUBLICADOS

#### A.1. Primer artículo publicado e indexado

L Mosquera, L. Yana, J. Basurto, and Ana Torre, "LPG fiber optic sensor applied to the flexural vibration monitoring and determination of dynamic Young's modulus of woods". Washington, DC United States. 22–26 June 2020. ISBN: 978-1-943580-78-1. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2020.SW1F.3>

#### LPG FIBER OPTIC SENSOR APPLIED TO THE DETERMINATION OF THE FLEXURAL ELASTICITY MODULUS OF WOODS

L Mosquera<sup>1</sup>, L Yana<sup>1</sup>, J Basurto<sup>1</sup> A Torre<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Apartado 1301, Lima Perú

[imosquera@uni.edu.pe](mailto:imosquera@uni.edu.pe)

#### Abstract

In this work, we show the feasibility of using CO<sub>2</sub> laser induced long-period gratings (LPGs) for determining the flexural elasticity modules of woods. To do this, we characterized the dynamic response of bars made of different woods put in oscillation. By recovering the bars' flexural oscillations from the LPG time response and by taking the fast Fourier transform (FFT) of it, the movement vibration frequencies could be obtained. Knowledge of these vibration frequencies for the oscillation lengths of different bars allowed us to calculate the materials' the flexural elasticity modules.

Keywords: optical fiber sensing; vibration sensor; MOE of woods

#### 1. The flexural elasticity modules determination

In the 'bar resonance' method, a bar of the material of interest is arranged in a cantilever configuration and put in oscillation. The resulting movement is studied in order to obtain the bar material's flexural elasticity modules value [1,3]. We use a curvature sensitive long-period fiber grating to register the displacement of the bar as a function of time.

If the bar in cantilever configuration is vertically deflected from its equilibrium state and then released, the resulting movement is oscillatory and its amplitude decays as a function of time. The formal treatment of this movement, via the Euler–Bernoulli equation, indicates that the general solution has a series form with infinite frequency components, which are given by equation (1), where  $\rho$  and  $Y$  are, respectively, the material density and flexural elasticity modules;  $A$  and  $L$  are, the cross-sectional area and the vibrating length of the bar;  $I$  is the second moment of the cross-section, which, for a rectangular bar of width  $b$  and depth  $h$ , can be calculated as  $b h^3/12$ ;  $k_v$  is the viscous damping constant of the system. The value of the constant  $\lambda_n$  is determined by the boundary conditions of the problem.

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

As we focus on the determination of the Young's modulus, one can see, from equation (1), that the knowledge of only one frequency component is enough to attain our goal. In this investigation, we

determined the first frequency component,  $f_1$ , and then found the flexural elasticity modules of the materials of interest.

## 2. Long-period gratings and their curvature sensitivity

Long-period fiber gratings (LPGs) consist of a longitudinal periodic perturbation of the refractive index of an optical fiber which is able to provide coupling between core and cladding modes at certain wavelengths. Equation (2) describes the wavelengths  $\lambda^{(m)}$  where the coupling between the referenced modes happen— $n_{co}$  is the effective refractive index of the core mode,  $n_{cl}^m$  is the effective refractive index of the  $m$ th order cladding mode and  $\Lambda$  is the period of the refractive index perturbation [4].

$$\lambda^{(m)} = (n_{co} - n_{cl}^{(m)})\Lambda \quad (2)$$

The curvature causes stretching or compression of the fiber by changing the refractive indices  $n_{co}$ ,  $n_{cl}$  due to the elasto-optic effect. In addition, the elastic deformation changes the period of the grating ( $\Lambda$ ). Changes in refractive indexes of the fiber and in the period of the LPG cause a shift in the wavelength of resonance  $\lambda$  as well as, changes in the depth of the transmittance dip (equation (3)).

$$T^{(m)} = 1 - \sin^2(\kappa^{(m)}L) \quad (3)$$

Where,  $T^{(m)}$  is the dip of the  $m$ -th mode transmittance and  $\kappa^{(m)}$  denotes coupling coefficient between the core mode and the  $m$ -th order cladding mode given as

$$\kappa^{(m)} = \frac{\pi \Delta n_{co} J^{(m)}}{\lambda} \quad (4)$$

And,  $J^{(m)}$  is the overlap integral between the fundamental guided mode and the cladding modes in the core area of the fiber [4].

In this research, CO<sub>2</sub> laser-induced LPGs sensors of 500  $\mu\text{m}$  pitch and 2.5 mm long imprinted on standard optical fibers were employed. The experimental setup is shown in figure 1. A superluminescent LED is used as the light source. A photodetector coupled to an oscilloscope are used for taking measurements. The LPG is glued on a wooden bar, which has one fixed end and the other one is let free. The deflection of the bar (accounted as a vertical displacement  $\Delta y$  of the free bar end), causes the LPG to bend and, thus, its curvature response can be monitored.

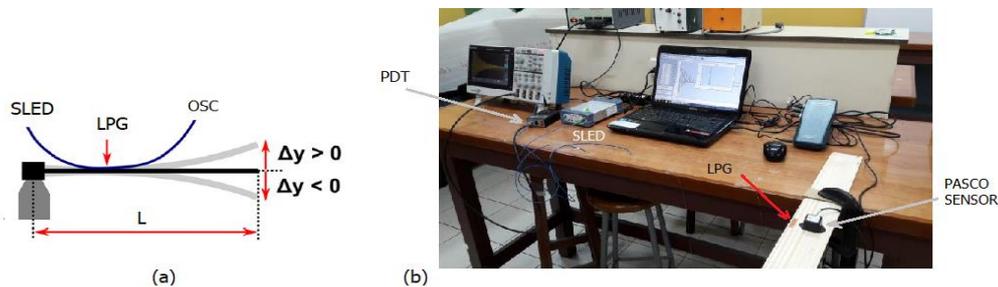


Figure 1. (a) Scheme and (b) picture of the experimental setup.

When detecting light using the photodetector, as its voltage response is proportional to the overall optical power from the broadband light source, negative voltage variations are related to negative  $\Delta y$  values and positive voltage variations identify positive  $\Delta y$  values. The dependence of voltage on bar vertical displacement was seen to be linear [1].

## 3. 'Bar resonance' method results

Initially, the bar put in oscillation in a cantilever setup, is slightly deflected and then released. The signal measured in the oscilloscope takes a sinusoidal form whose amplitude decays as a function of time (figure 2a). By taking the Fourier transform of the measured signal, one can identify the frequency components of the oscillating bar movement. The figure 2b shows the amplitude of the fast Fourier transform (FFT), calculated from figure 2a data as a function of the frequency.

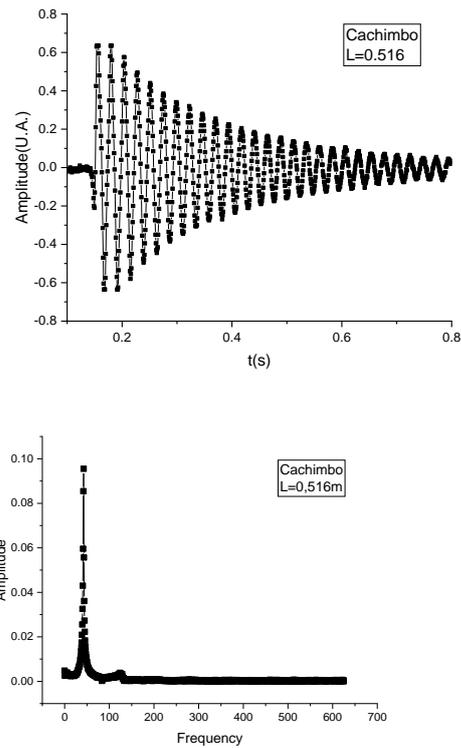
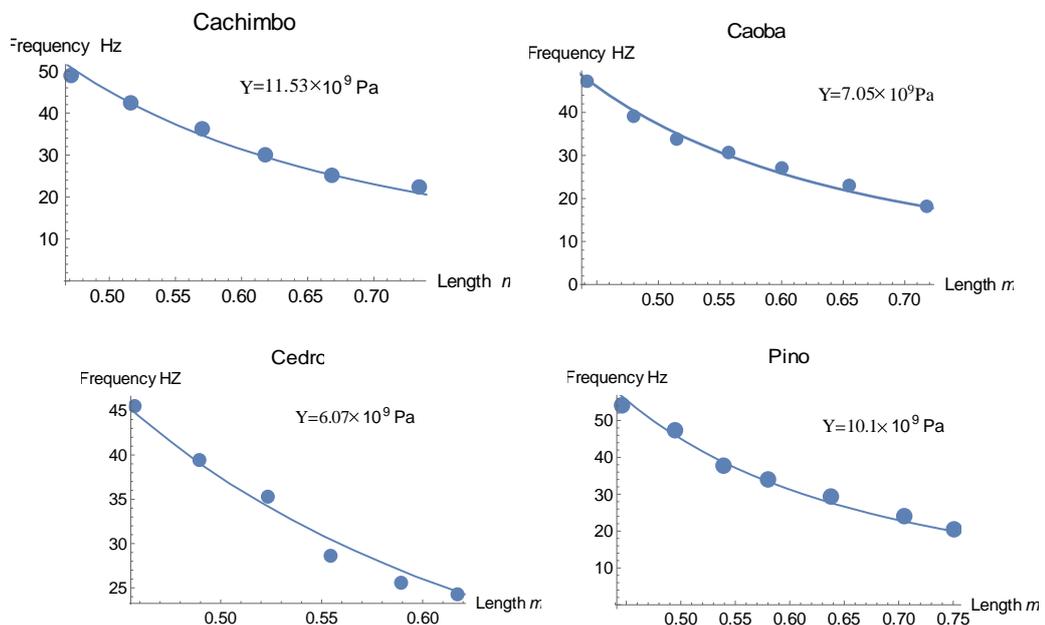


Figure 2. a) Photodetector time response of LPG sensor. b) The fast Fourier transform (FFT) amplitude as a function of frequency.

The value found for  $K_v$  (in all cases) shows that  $\left(\frac{k_v}{2\rho A}\right)^2 \ll \frac{YI}{\rho A} \left(\frac{\lambda_n}{l}\right)^4$ , The flexural elasticity modulus value of the material of the cantilever ( $Y$ ) is determined from the experimental data fitting frequency of the first normal mode ( $f_1$ ) versus the overhang length ( $L$ ) of the cantilever. Figure 3 shows the frequency setting of the first normal mode ( $f_1$ ) against the cantilevered length ( $L$ ) for bars of five different woods (cachimbo, mahogany, cedar, pine and tornillo). The values determined for the flexural elasticity moduli  $Y$  of the woods, based on the adjustment of equation (1) with their respective experimental data, are shown in table 2.



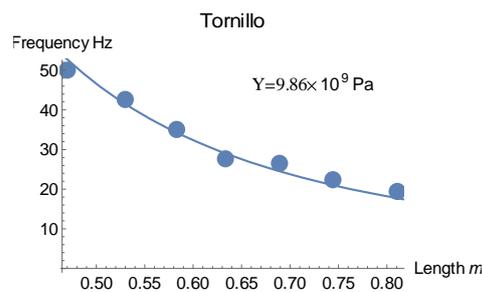


Figure 3. The first harmonic frequencies  $f_1$  (blue circles) versus the length of the cantilevered. The solid curve represents the fitting of equation (1) with the experimental data of the woods. The determined values of the flexural elasticity moduli of the woods are shown in each curve.

Table 1 shows the values of the dimensions, densities, humidity percentage and moment of inertia I of the woods studied.

Table 1: Characteristics of the woods studied

Material	h (m)	b (m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	I (Kgm <sup>2</sup> ).10 <sup>-8</sup>	Moisture content (%)
Cariniana domestica Martius (Cachimbo)	0.0158	0.0513	590	1.6862	12,42
Swietenia mahagoni (Caoba)	0.0148	0.05155	469	1.3926	12,50
Carapa guianensis Aubl. (Cedro)	0.01615	0.05101	451	1.7906	11,59
Pinus patula (Pino)	0.0149	0.04925	465	1.3576	10,91
Cedrelinga cateniformis (Tornillo)	0.01574	0.05175	470	1.6817	11,39

The flexural elasticity modules, determined by this technique, for the five woods studied, they were in good agreement with the order of magnitude reported for these modules, using different techniques [ 5-10].

Table 2: flexural elasticity moduli of the woods

Material	Y (GPa)	Y(reference) (GPa)
Cariniana domestica Martius (Cachimbo)	11.53	9.29-12.84
Swietenia mahagoni (Caoba)	7.05	7.2-10.3
Carapa guianensis Aubl. (Cedro)	6.07	6.0-7.25
Pinus patula (Pino)	10.1	8.0-13.1
Cedrelinga cateniformis (Tornillo)	9.86	8.2-10.9

## Conclusions

This paper has reported the application of fiber long-period gratings to vibration monitoring and flexural elasticity modules determination. To the best of our knowledge, this is the first article to deal with the determination of wood material's flexural elasticity modules using long-period fiber gratings. Cachimbo, Mahagoni, Cedar, Pinus and Tornillo samples were tested. The values of the flexural elasticity moduli of the woods, determined by us, are in good agreement with the values reported in the literature using other techniques. This indicates that long-period fiber gratings can be straightforwardly employed in the dynamic characterization of a material's elastic properties.

## Acknowledgments

This research was supported by IGI-FIC and VRI of the National Engineering University. The authors thank for the support provided.

## References

- [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).
- [2] 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". *Advances in Materials Science and Engineering* (2013).
- [3] S Tanaka, H Somatomo, A Wada, and N Takahashi. "Fiber-Optic Mechanical Vibration Sensor Using Long-Period Fiber Grating". *Japanese Journal of Applied Physics* 48 (2009).
- [4] T. Erdogan and J. Lightwave, "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, No. 8, 1997, pp. 1277-1294.
- [5] P Langbourd et al. "Comparison of wood properties of planted big-leaf Mahogany (*Swietenia Macrophylla*) in Martinique island with naturally grown Mahogany from Brasil, Mexico and Perú". *Journal of tropical Forest Science* 23(3):252-259 (2011).
- [6] Yoza L., Baradit E. & Acevedo M., "Characterization of the physical mechanics properties of the peruvian species, pino (*pinus patula*) and tornillo (*cedrelinga cateniformis*) by using non destructives techniques". *Anales Científicos*, 76 (1): 12-16 (2015). DOI: <http://dx.doi.org/10.21704/ac.v76i1.758>
- [7] Julián Andrés Zárate Ramírez and Óscar Javier Gutiérrez Junco, "Wood species used in Boyacá characterization, according the Colombian Earthquake-Resistant Construction's Regulations". *Engineering Faculty Journal, UPTC*, January-June (2012), Vol. 21, No 32, pp.73-91.
- [8] A. Aróstegui and A. Sato. "Study of the physical-mechanical properties of wood from 16 forest species in Peru". *Revista Forestal del Perú* V.4 (1-2):1-13.
- [9] Eman Nabil et al. "Evaluation of Physical, Mechanical and Chemical Properties of Cedar and Sycamore Woods after Heat Treatment". *Egypt. J. Chem.* Vol. 61, No.6 pp. 1131 - 1149 (2018).
- [10] Josefina S. Gonzalez. "Growth, properties and uses of western red cedar". Co-published by Western Red Cedar Lumber Association and Western Red Cedar Export Association. (Special publication, ISSN 0824-2119; no. SP-37R) (1997).

## A.2. Segundo artículo publicado

L Yana, L Mosquera, and F Loayza, "Fluid flow measurement using LPG fiber optic sensor". Washington, DC United States. 19–23 July 2021. ISBN: 978-1-943580-90-3. <https://doi.org/10.1364/SENSORS.2021.STu1A.6>

### FLUID FLOW MEASUREMENT USING LPG FIBER OPTIC SENSOR

L Mosquera<sup>1</sup>, L Yana<sup>1</sup>, F Loayza<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University of Engineering. Lima/Perú

**Abstract:** A single-mode fiber optic recorded LPG sensor is used to measure the outflow of water from a vertical tank as the liquid level inside it decreases.

## 1. Theory

### 1.1. LPG Cantilever

A rod is arranged in a cantilever configuration, being deformed by the passage of a uniform fluid, as shown in figure 1. The deformation  $y(x)$  of the rod is given by the equation 1 [1]

$$y(x) = \frac{Fx^2}{24L(EI)}(x^2 - 4Lx + 6L^2) \quad (1)$$

While the force  $F$  exerted by the fluid, on the rod of cross section  $A$ , density  $\rho$ , moment of inertia  $I$  and modulus of elasticity  $E$ , is expressed by equation 2.

$$\frac{F}{L} = \frac{c}{L} \rho A v^2 \quad (2)$$

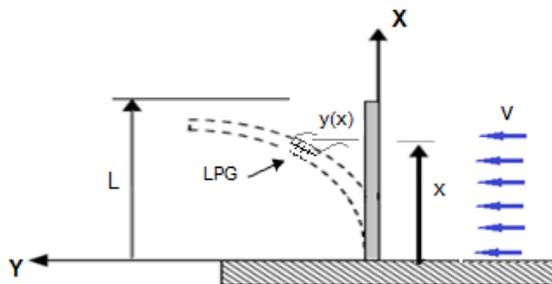


Fig. 1. Schematic diagram of the deformation of the cantilever support of the optical fiber due to the fluid flow

When an LPG sensor recorded on fiber optic is glued on the rod, changes in the intensity  $I$  of the light transmitted by the fiber are observed due to its curvature. Equation (3) indicates a linear relationship between  $\Delta I$  and the deformation amplitude  $\Delta y$  of the cantilever curvature [2].

$$\Delta I = K \Delta y \quad (3)$$

If we have a vertical tank filled with water up to a height  $h$ , the exit velocity of the water through a hole located in the lower base of the tank is given by the Torricelli equation,  $v^2 = 2gh$ , for a hole of cross-sectional area much smaller than the cross-sectional area of the tank.

From equations 1-3 a linear response is deduced between the variation of the transmittance and the variation of the height  $h$  of the liquid in the tank.

$$y(h) = \frac{c}{L} \rho A 2g \frac{x^2}{24(EI)} (x^2 - 4Lx + 6L^2)h = ah \quad (4)$$

Where  $a$  is a constant

Equation 4 shows the linear relationship between the deformation  $y$  of the cantilever and the height  $h$  of the water level in the tank. Since the variation of the intensity of light transmitted by the optical fiber is proportional to  $\Delta y$ . Therefore, the output flow,  $Q = A\sqrt{2g\sqrt{h}}$ , it can be calculated by knowing  $h$  or  $y(h)$  or by measuring  $\Delta I$ .

### 1.2. Experiment

Figure 2 shows the vertical tank with water outlet in its lower part. A metal rod is glued at one end to the wall of the horizontal water outlet tube, remaining in a cantilever configuration inside the pipe. Fiber optic with engraved LPG network is glued on the cantilevered body of the rod. The fiber input is fed by a Safibra OFLS-B-15 source and the fiber output is connected to a Newport InGaAs photoreceiver whose voltage signal is recorded on a Tektronix TBS2104 oscilloscope. At a distance of 0.3m, an arduino YF-S201 flow sensor was installed to accompany the measurements for calibration purposes of the optical flowmeter.

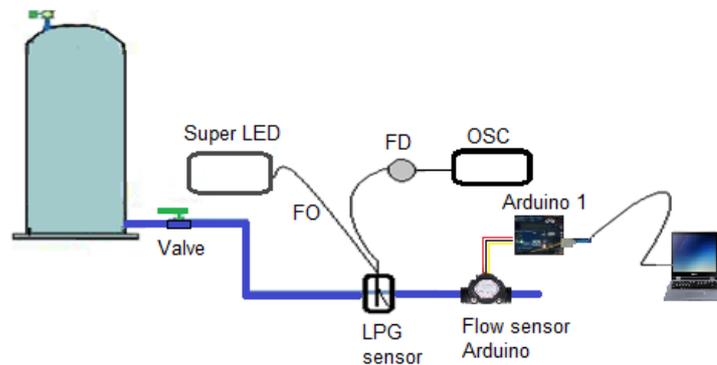


Fig. 2. Experimental setup for flow measurement. The signal from the LPG sensor is read on an oscilloscope, while the signal from the Arduino flow sensor is read directly on the PC. Optical fiber (FO), Photodetector (FD), Oscilloscope (OSC)

### 1.3. Flow Measurements

Transmittance signals from the LPG flow sensor when opening and closing the tank's water outlet valve are shown in figure 3.

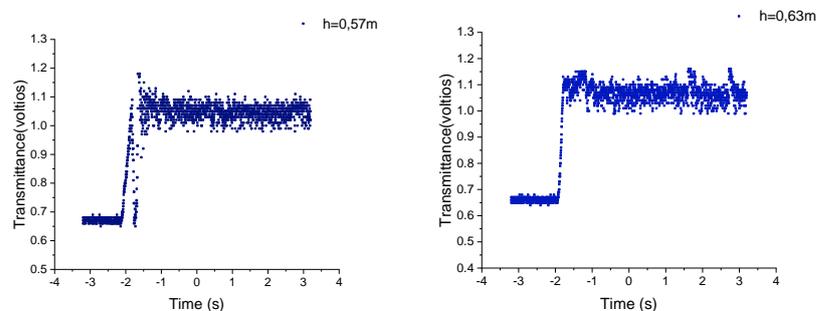


Fig.3. Outlet flow versus water height in tank measured with LPG type fiber optic sensor

## 2. Results

The flow rates corresponding to different heights  $h$  of the water level in the tank, measured directly by the Arduino flowmeter and its adjustment curve are shown in figure 4a. The transmittance reading data of the LPG sensor and its adjustment curve are shown in figure 4b.

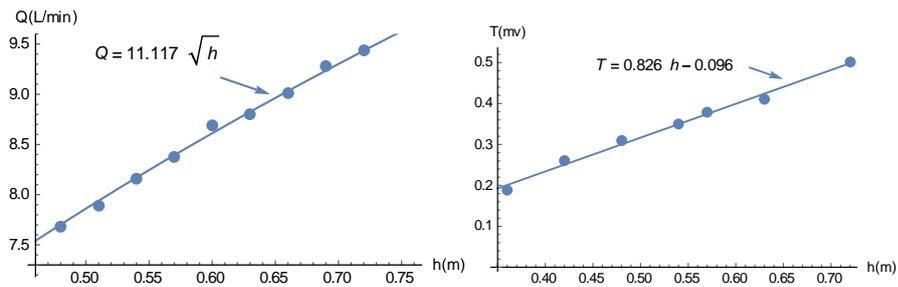


Fig.4a. Output flow versus water height in tank measured with arduino YF-S201 Hall Effect sensor. 4b. Outlet flow versus water height in tank measured with LPG type fiber optic sensor

The line shown in figure 4b shows good agreement with the theoretical model developed for the LPG sensor. The measuring range for this sensor is adjustable by varying the dimensions and material of the cantilever.

### 3. References

- [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* (Advances in Materials Science and Engineering, 2013).
- [2] 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).