

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Construcción y caracterización de un Convertor Modal sintonizable basado en Redes de Periodo Largo grabadas en fibras de ópticas de pocos modos

Sebastián Valencia Garzón

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero en Telecomunicaciones

Asesor(es)

Ph.D. Erick Reyes Vera

Fis. Juan Sebastián Soto Perdomo

Instituto Tecnológico Metropolitano - ITM
Facultad de Ingenierías
Departamento Electrónica y Telecomunicaciones
Medellín, Colombia
2022

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RESUMEN

En las últimas décadas el uso de dispositivos a fibra óptica ha sido ampliamente explorados para dar solución a una gran variedad de problemas de la industria tales como sistemas de sensado y componentes que mejoran el rendimiento de las redes ópticas. En especial las redes de periodo largo han sido una alternativa bastante explorada en esta tecnología debido a que son dispositivos de fácil fabricación y cuyo método de lectura es simple en comparación con otras técnicas.

Por lo anterior, en el presente trabajo se ha desarrollado por primera vez en Colombia un sistema de grabación de redes de periodo largo basado en la técnica de laser de CO₂, el cual permite realizar la inscripción punto a punto de dicha red a lo largo de un cable de fibra óptica convencional. En este mismo sentido, el trabajo muestra la optimización del sistema, de tal manera que se logre una repetitividad y estabilidad en el sistema de grabación de redes de periodo largo. Así mismo, la caracterización de las redes fabricadas fue llevada a cabo con el fin de evidenciar la capacidad que tienen estas para ser controladas con variables externas tales como temperatura y tensión. Los resultados permiten evidenciar que efectivamente en ambos casos el espectro de transmisión puede ser controlado, logrando una sensibilidad máxima de 58 pm/°C y 43 pm/με cuando se hacen pruebas con temperatura y tensión, respectivamente. Finalmente, la red de periodo largo fue empleada para obtener un conversor modal óptico, el cual permite la conversión entre el modo fundamental y modos de orden superior, específicamente el LP₁₁. Para ello, se hizo primero un análisis experimental de la respuesta del conversor modal como función de la polarización de entrada de la luz y el ángulo de polarización de un analizador a la salida. Posteriormente, un análisis similar fue

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ejecutado, solo que en esta ocasión se evaluó la capacidad que tiene nuestro sistema para ser sintonizado empleando cambios térmicos. Los resultados demuestran que efectivamente la respuesta óptica del conversor modal tiene una fuerte dependencia con la polarización y con la temperatura. Por ende, a través de una combinación de estas es posible lograr la conversión modal deseada.

Palabras clave: Redes de periodo largo, laser CO₂, índice de refracción, temperatura, tensión, fibra óptica, polarización, conversión modal, acoplamiento modal.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

RECONOCIMIENTOS

A mi familia que siempre estuvo apoyando cada paso realizado durante mi trayectoria profesional, además, agradezco sus consejos dados para asumir la elaboración de este trabajo.

A mis asesores, Erick Reyes Vera y Juan Sebastian Soto, quienes me acompañaron durante este proceso. Gracias por aportarme su experiencia y conocimiento para poder estructurar este trabajo y aplicar todos los conocimientos.

Por otro lado, agradezco a toda la comunidad académica, a mis compañeros del pregrado, semillero de investigación y demás colaboradores que siempre he tenido su apoyo para obtener los conocimientos requeridos para escribir este trabajo. A la institución por permitir hacer uso de los espacios físicos y los recursos destinados a la elaboración del trabajo, además de permitirme instruirme y educarme a lo largo de la carrera.

Finalmente, este trabajo es especialmente otorgado a mis abuelos, Alejandro Valencia y Olga Marín, que siempre fueron de gran afecto para mí a lo largo de mi carrera y que siempre creyeron en mis pasos para ser un profesional. Es de ellos y para ellos.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

ACRÓNIMOS

LPG: Redes de periodo largo

FBG: Redes de Bragg

TM: Transversal Magnético

TE: Transversal Eléctrico

MMF: Fibra multimodo

SMF: Fibra monomodo

LP: Linealmente Polarizado

TMF: Dos Modos de Fibra

FTTH: Fibra Hasta el Hogar

SRI: Índice de Refracción en el Medio Circuncidante

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

TABLA DE CONTENIDO

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	7
Objetivos generales.....	10
Objetivos específicos.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	12
Fundamentos de fibra óptica	12
Apertura numérica	17
Modos de propagación	17
Redes de Difracción.....	20
Redes de periodo corto o redes de Bragg (FBG).....	21
Redes de Periodo largo (LPG).....	24
Acoplamiento Modal.....	26
3. METODOLOGÍA.....	30
Fabricación de redes de periodo largo.....	30
Caracterización experimental del conversor modal óptico basado en LPFGs	40
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
Caracterización de temperatura	45
Caracterización de tensión.....	51
Conversión modal	53
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO	61
REFERENCIAS	63
ANEXOS.....	¡Error! Marcador no definido.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

1. INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones ópticas juegan un papel fundamental en el desarrollo de las telecomunicaciones actuales, ya que son las responsables de la transmisión de los mayores flujos de información. De hecho, los cables de fibra óptica no solo son empleados en la comunicación entre operadores y usuarios, estos cableados son los responsables de tener intercomunicados los diferentes continentes de nuestro planeta. Así mismo, las comunicaciones ópticas son las que han permitido incrementar la capacidad de transmisión de información entre usuarios en las últimas décadas permitiendo la conexión de las personas en todo el mundo. Sin embargo, en la actualidad estos sistemas están alcanzando límites en su capacidad de transmisión, principalmente debido a la alta demanda de información por parte de los usuarios particulares y empresas, como consecuencia de la fuerte incursión de las redes 5G, teletrabajo, incremento de dispositivos conectados a la red, internet de las cosas (IOT) y la digitalización de información (Botero Valencia et al., 2019; Maksimović, 2017; Reyes-Vera et al., 2018; Thomson et al., 2016). Como consecuencia, se requiere de nuevos sistemas que permitan incrementar la capacidad de los canales de transmisión o en su defecto el número de canales de transmisión de información en redes ópticas (Y. Zhao et al., 2016). Para ello, en los últimos años se ha venido explorando la posibilidad de usar la multiplexación por división espacial (SDM, por sus siglas en inglés), la cual puede ser realizada a través de dos métodos, el primero de ellos, a través del uso de fibras con múltiples núcleos (Vera, 2019) y el segundo empleado fibras multimodo, donde cada modo se comporta como un canal de transmisión (Camilo & Aristizabal, 2020). Esto permite transmitir flujos de datos independientes de forma paralela sin cambiar totalmente la infraestructura de las actuales redes, debido a que

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

comúnmente se emplean fibras de pocos modos. En este último caso se hace importante la generación de los modos, así como la forma de controlar la propagación de estos en el enlace de fibra óptica. Estos dispositivos se conocen como conversores modales y pueden ser fabricados de diversas formas, una de ellas es realizando perturbaciones externas que afecten la geometría de las guías de onda, empleado fuerza, presión, tensión, temperatura, corriente u otras como mecanismo de control (Camilo & Aristizabal, 2020; Cardona et al., 2020; Reyes-Vera et al., 2016, 2017).

Por otro lado, Kim y compañía (1987), estudiaron por primera vez fibras de dos modos, (TMF, por sus siglas en inglés) para aplicaciones en comunicaciones (B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang, 1987), así mismo demostraron, que es posible obtener un conversor modal sintonizable cuando se aplica una tensión periódica en una sección de la TMF. Recientemente, las TMF se han convertido en una excelente plataforma para la generación y multiplexación de modos en sistemas de comunicaciones ópticos (Wu et al., 2012).

En los últimos años diferentes investigaciones y procesos experimentales relacionados a la conversión modal han contribuido al crecimiento de los sistemas de comunicaciones, destacando soluciones basadas en redes de periodo largo (LPFG, por sus siglas en inglés) (Rojas et al., 2020), redes de Bragg (FBG, por sus siglas en inglés) (Wu et al., 2012), fibras de cristal fotónico (PCF, por sus siglas en inglés) (Montoya et al., 2017) y otros más (Z. Liu et al., 2020). Reyes-Vera y compañía (Montoya et al., 2017) generaron un conversor modal empleado una fibra óptica micro estructurada (MOF, por sus siglas en inglés) de doble núcleo, donde los agujeros de la MOF se llenan con un material termosensible para analizar la capacidad que este dispositivo tenía para convertir el modo LP_{01} al modo LP_{11} . Así

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

mismo, evaluaron la capacidad de dicho conversor para ser sintonizado mediante cambios térmicos y la incidencia de la estructura geométrica sobre su comportamiento.

Wu y compañía (Wu et al., 2012), demostraron experimentalmente la fabricación de un conversor modal basado en una FBG empleando un láser Excímero y una máscara de fase para generar modulaciones en el índice de refracción del núcleo en una fibra bimodal. Además, los autores obtuvieron una eficiencia de conversión entre el modo LP_{01} y el modo LP_{11} del 99%. También se presentan LPFG, fabricadas en fibras de pocos modos, empleado un láser de CO_2 para el grabado punto a punto. Con la LPFG se logra acoplar el modo LP_{01} y el modo LP_{11} con una eficiencia del 99%. Finalmente, los autores demuestran, que los conversores modales basados en LPFG ofrecen muchas ventajas, tales como la baja reflexión, menores pérdidas, alta repetibilidad en la fabricación y flexibilidad de diseño.

Le Liu y compañía (L. Liu et al., 2018) reportaron un conversor modal en una LPFG convencional operando a $1 \mu m$ de una TMF, el cual fue fabricado usando un láser de CO_2 y mediante el control del espectro de transmisión, lograron una eficiencia de conversión entre los modos LP_{01} y LP_{11} superior al 99%. Así mismo demostraron la estabilidad del patrón del campo lejano y cercano, y las propiedades de alta potencia del conversor modal. También Zhang y compañía (Zhang et al., 2016) mostraron que las redes de Bragg helicoidales (H-FBG) inducidas por rayos UV tienen un acoplamiento dependiente de la longitud de onda entre diferentes modos. La H-FBG fabricada en una fibra multimodo presentó una eficiencia de conversión aproximada al 97%, y evidenciaron que esta conversión está relacionada con la estructura helicoidal y los modos de orden superior se pueden conseguir cambiando los parámetros de la fibra para optimizar la eficiencia de conversión.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Por lo anterior, en este trabajo se plantea la fabricación de un conversor modal basado en redes de periodo largo. Para ello, se propone la fabricación de una LPFG en fibra ópticas de pocos modos empleando un láser de CO₂. Una vez fabricadas las redes de periodo largo, se demostrará la capacidad que estas tienen para la construcción de un conversor modal sintonizable. Estudiando además efectos asociados a la polarización de la luz a la entrada del dispositivo.

El trabajo de grado se divide en 4 capítulos, marco teórico, metodología, resultados y discusión y finalmente las conclusiones. Los cuales se describen a continuación. En la sección de marco teórico se presenta una descripción teórica a la solución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de las ondas electromagnéticas en las fibras ópticas, las LPFG (ecuaciones y principios de operación) y teoría de modos acoplados. En la sección de metodología se muestra el montaje empleado para visualizar el acoplamiento modal. En la sección de resultados, se hace una discusión sobre las propiedades y funcionalidad de las redes de periodo largo como acopladores modales. Finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Objetivos generales

- Desarrollar un conversor modal óptico basado en redes de periodo largo grabadas en fibras ópticas de pocos modos.

Objetivos específicos

- Fabricar un conversor modal basado en una red de periodo largo empleando la técnica de irradiación con láser de CO₂.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Caracterizar los parámetros ópticos y estructurales de la red de periodo largo.
- Caracterizar la respuesta óptica del conversor modal sintonizable basado en redes de periodo largo grabada en una fibra de pocos modos.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

2. MARCO TEÓRICO

Este capítulo se abordarán los aspectos fundamentales de las guías de onda o fibras ópticas convencionales y sus características principales, tales como, los conceptos de índice de refracción efectivo, ley de Snell y reflexión total interna. Adicionalmente, se hace una revisión general de los tipos de modos que se propagan en una fibra óptica estándar y se explican los dos tipos básicos de redes de difracción en fibra óptica cómo lo son las redes de Bragg y las redes de periodo largo (LPFGs). Finalmente, en esta sección se describen los métodos más comunes para la fabricación de redes de periodo largo y sus características principales.

Fundamentos de fibra óptica

Las fibras ópticas son uno de los tipos de guías de onda más empleados actualmente en telecomunicaciones, las cuales esta compuestas estructuralmente de tres capas concéntricas con propiedades ópticas diferentes, como se ilustra la Figura 1. Las partes de la estructura convencional consta de un núcleo, el cual es la parte central de la estructura y se caracteriza por que la luz es confinada en este. Este confinamiento se da debido a que esta región posee un índice de refracción mayor al revestimiento. En general el núcleo de estas fibras ópticas está compuesto por una mezcla de dióxido de silicio (SiO_2) dopado con germanio (Ge) u otros semiconductores (Fleming, 2002). Por otro lado, la fibra óptica presenta una segunda capa, la cual es conocida con el nombre de revestimiento, el cual en la mayoría de los casos se caracteriza por poseer un diámetro total de 125 μm el cual generalmente está compuesta por dióxido de silicio puro. Finalmente, una tercera capa conocida con el nombre de cubierta

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

(Buffer) o recubrimiento, la cual es una capa exterior de plástico (acrilato) y es la que se encarga de proteger las anteriores capas de micro curvaturas o deformación que pueda tener la fibra óptica (Abellán et al., 2007). Como se mencionó antes, índice de refracción del núcleo denotado por n_1 es un poco mayor al del revestimiento n_2 . Por lo anterior, el rayo de luz se ajusta hasta el final de la fibra y es confinado en el núcleo por el principio de reflexión total interna (Byron, 1984), fenómeno físico del cual se explicará con más detalle más adelante.

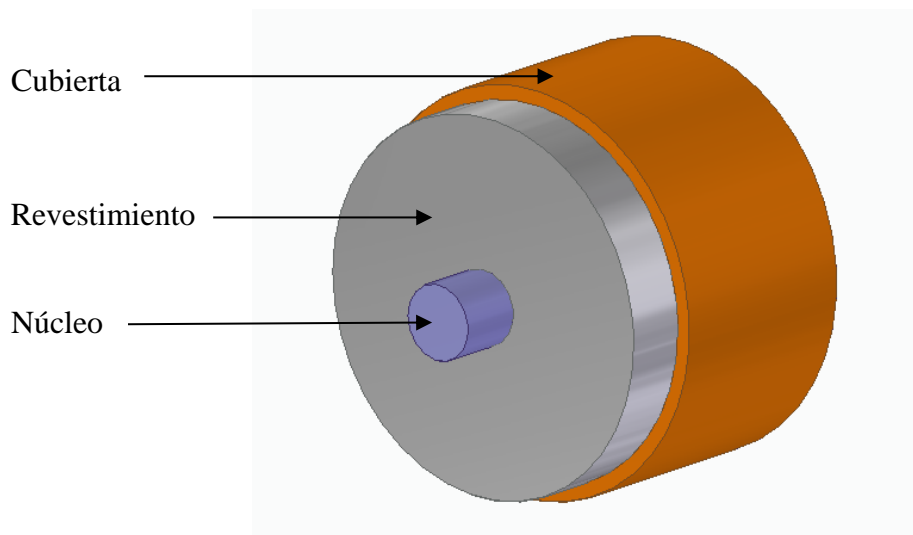


Figura 1. Esquema de la estructura física de una fibra óptica estándar (SMF 28-E).

La luz se puede propagar en una fibra óptica por reflexión o por refracción. La forma en la que esta se propague depende del modo de propagación, del diámetro del núcleo, y el índice de refracción de los materiales de la fibra. Por ejemplo, la fibra óptica monomodo (SMF, por sus siglas en inglés) tienen un núcleo con un diámetro pequeño, lo suficiente para que la luz que se está propagando por ella siga una trayectoria perpendicular durante todo el trayecto. Estas fibras tienen un núcleo cuyo diámetro oscila entre $8\ \mu\text{m}$ y $11\ \mu\text{m}$. A diferencia de la fibra multimodo, esta solo dispone de un modo de propagación, el cual puede llegar a cubrir

distancias mucho más largas. Por esta razón, las fibras monomodo son ideales para las aplicaciones en comunicaciones ópticas.

Por otro lado, la fibra multimodo (MMF, por sus siglas en inglés) tienen un núcleo cuyo diámetro esta entre $50\ \mu\text{m}$ y $62.5\ \mu\text{m}$, lo cual permite la entrada de más luz a la fibra óptica, por lo tanto, existen múltiples trayectorias para que viaje la luz. En la MMF en contraste con la SMF, permite que los haces de luz reboten en las paredes del revestimiento logrando así diferentes ángulos de propagación dentro del núcleo, por ende, se genera la excitación de mayor número de modos de propagación. Lo anterior permite que la MMF sea usada para redes de conexión locales y para Fiber To The Home (FTTH) ya que puede alcanzar velocidades hasta los 100 Gbps de Ethernet. En la Figura 2 se ilustran los dos diferentes tipos de geometrías de las fibras ópticas convencionales.

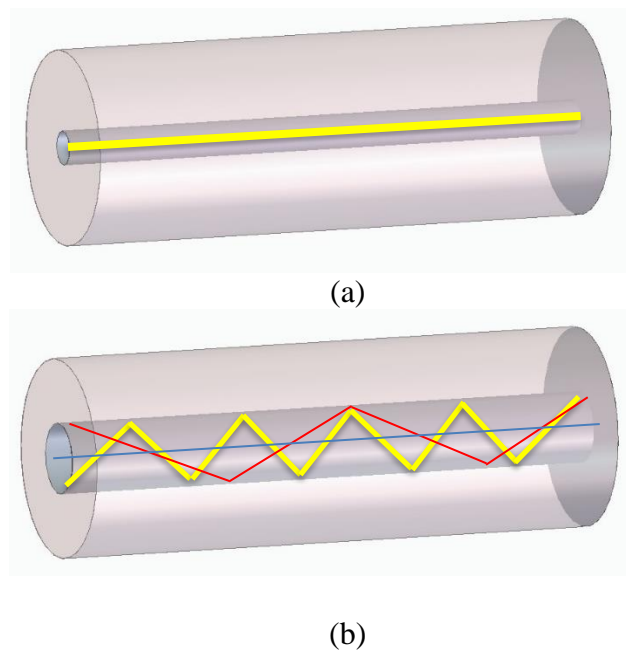
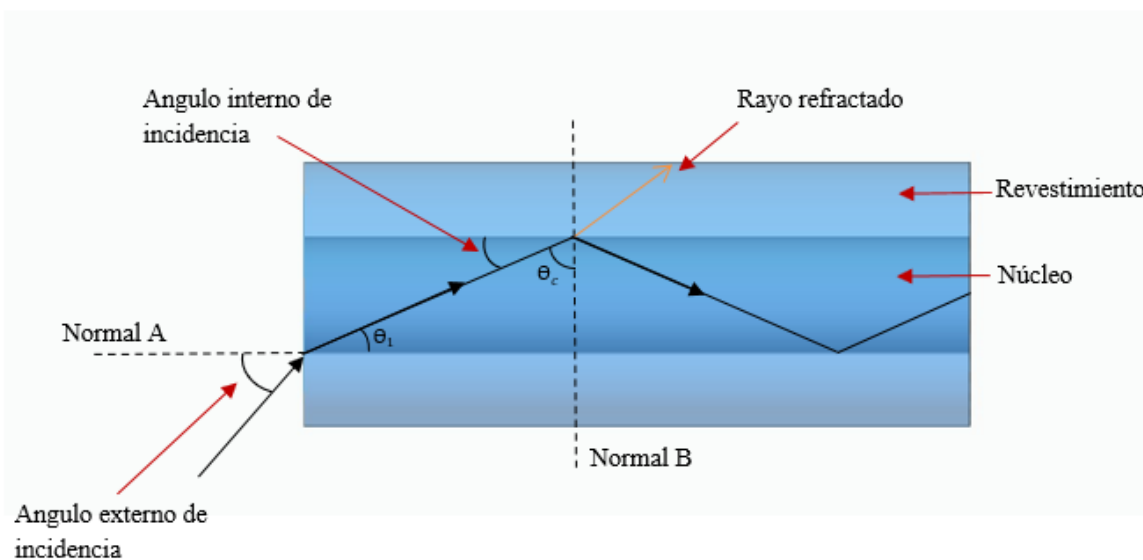


Figura 2. Estructura geométrica de una fibra óptica (a) Monomodo SMF y (b) Fibra Multimodo MMF.

Otro aspecto importante para tener en cuenta es que los diferentes medios en que se puede propagar la luz están caracterizados por su índice de refracción, y cuando la luz incide en la frontera entre dos materiales de diferentes índices de refracción, el rayo incidente se divide generando dos rayos, uno reflejado y el otro refractado como lo muestra la Figura 3. De esta manera, cada uno de los rayos se propaga a través de los dos medios existentes y formando ángulos distintos de propagación de acuerdo con la ley de Snell (Fedor Mitschke, 2009). Por otro lado, el índice de refracción es la relación de la velocidad de propagación de un rayo de luz en el espacio libre respecto de la velocidad de propagación del mismo rayo en determinado material y lo rige la ecuación 1.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Donde, c es la velocidad de la luz en el espacio libre (m/s) y v es la velocidad de la luz en determinado material (m/s).



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 3. Propagación de un rayo – reflexión total interna en una fibra óptica (Laboratorio de Comunicaciones Ópticas –Dpto. Tecnología Fotónica, 2014).

Basado en lo anterior, tenemos que la luz inyectada en el núcleo de la fibra sufre de reflexiones en las interfaces del núcleo-revestimiento debido a que ambos materiales poseen índices de refracción diferentes. Como consecuencia, parte de esta luz se refleja y otra parte entra en el núcleo de la fibra óptica. Así, el rayo de luz transmitido está contenido en el plano de incidencia, pero con un cambio de dirección, a esto le llamamos rayo refractado, el cual forma un ángulo con la normal a la superficie (Normal B en la Figura 3). Cuando el rayo que viaja por el núcleo incide en el revestimiento, pasa a un medio con un índice de refracción menor, la luz se aleja de la normal, es decir, que el ángulo de refracción es mayor que el de incidencia, de tal forma que cumpla la ley de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios (núcleo y revestimiento en nuestro caso), y θ_1 y θ_2 son los ángulos de los rayos incidentes y transmitidos. Entonces, de acuerdo con la ley de Snell, los rayos de luz se refractan acercándose a la normal A, esto hace que los rayos cambien de dirección y se propaguen diagonalmente por el núcleo con un ángulo θ_c que llamamos ángulo interno de incidencia, que es distinto a el ángulo externo de incidencia y para que un rayo de luz se propague por toda la fibra, este debe de llegar a la interfaz entre el núcleo-revestimiento formando un ángulo que sea mayor que θ_c , que es el ángulo crítico (Eugene Hecht, 2000).

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

$$\theta_c = \text{sen}^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Apertura numérica

La apertura numérica (NA, por sus siglas en inglés) se relaciona con el ángulo de aceptación y debido a la simetría circular de las fibras ópticas, se tiene que todos los rayos de luz que inciden dentro del cono con un ángulo θ se encontrarán con un ángulo mayor al crítico y por lo tanto serán guiados dentro del núcleo sin refracción. Mientras mayor sea la apertura numérica, la fibra óptica acepta mayor cantidad de luz externa. Una expresión matemática comúnmente empleada para calcular la apertura numérica en función de los índices de refracción del núcleo y el revestimiento está dada por la ecuación (4) (Eugene Hecht, 2000).

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los dos medios (núcleo y revestimiento).

Modos de propagación

La energía que se confina en el interior de la fibra se conoce teóricamente como un conjunto de ondas electromagnéticas que generan los modos en la guía de onda, y para que la luz se guíe se requiere, además, que forme en el interior una distribución de campo la cual tiene componente transversal estacionaria. A esto se le conoce como un modo de propagación de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

la luz, (Laboratorio de Comunicaciones Ópticas –Dpto. Tecnología Fotónica, 2014). Así mismo, debido a que las fibras ópticas convencionales tienen radios del núcleo y del revestimiento muy pequeños, no solo los modos se propagan en el núcleo, sino, también existen propagación en el revestimiento, que a su vez genera acoplamientos entre alguno de estos modos del núcleo y del revestimiento. Las expresiones matemáticas para la descripción completa de los modos guiados son las más complejas entre las diferentes variantes de las guías de onda, sin embargo, si se considera que la fibra es un medio lineal, isótropo, sin alteraciones de corriente, ni cargas libres, se puede obtener las ecuaciones de onda 5 y 6 en el campo eléctrico y magnético para una guía de onda cilíndrica:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + q^2 E_z = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \phi^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + q^2 H_z = 0 \quad (6)$$

donde $q^2 = \omega^2 \epsilon \mu - \beta^2 = K^2 - \beta^2$, y ω es la frecuencia angular de la onda, K es la magnitud del vector de propagación y β es la componente en z del vector de propagación en el vacío (Nanza, 2009).

Para las guías de onda cilíndricas, estas comparten la existencia de modos transversales eléctricos (TE) y transversales magnéticos (TM), sin embargo, las fibras ópticas también soportan modos híbridos EH y HE, que son aquellos que tienen componentes axiales tanto del campo eléctrico como del campo magnético. Ahora bien, las fibras ópticas satisfacen la condición de guiado débil y esto implica que los ángulos de aceptación serán pequeños, y, por lo tanto, los rayos en el interior de la fibra tendrán un ángulo pequeño respecto al eje de

la fibra. Todo esto hace que haya modos que tengan constantes de propagación tan próximas que podamos considerarlos casi iguales, lo que se conoce en lenguaje técnico como modos degenerados. La superposición de modos degenerados corresponde a los modos linealmente polarizados (LP) como lo muestra la Figura 4, donde se muestran las configuraciones de los primeros modos de propagación linealmente polarizados.

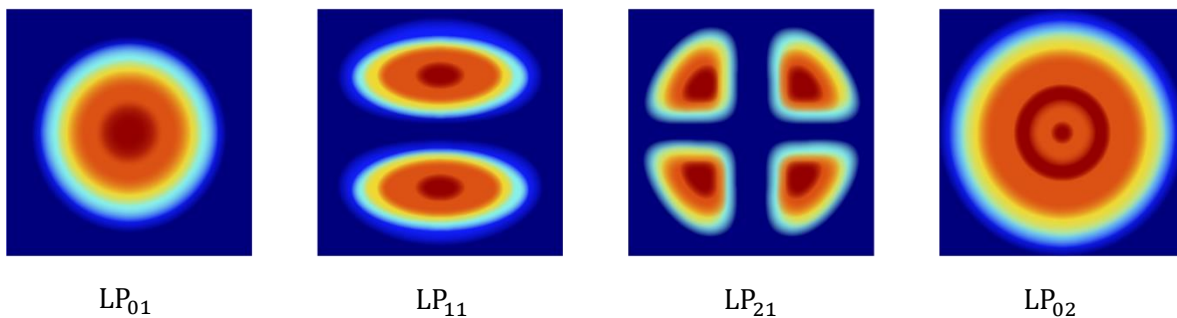


Figura 4. Esquema de los principales modos de propagación linealmente polarizados.

Entonces, las fibras ópticas pueden propagar diferentes tipos de modos. Una vez que la luz entra en la fibra óptica, esta se propaga de una forma uniforme llamada modo, que no es más que el camino que sigue a través de la guía de onda, sin embargo, en algunas fibras ópticas la trayectoria de la luz no siempre es uniforme debido a la fabricación de algunas de ellas y a factores externos que puedan cambiar los modos que no están confinados ni guiados en el núcleo. Esos modos no confinados en el núcleo son producto de que cierta radiación incidente en la fibra se encuentra fuera del cono de aceptación o apertura numérica (Nanza, 2009).

Dentro de los modos LP, se destaca el modo LP_{01} , el cual se denomina como el modo fundamental porque se propaga siempre en la fibra óptica y es el que mayor energía posee, por ende, son modos que más distancia recorren al interior de una fibra óptica. Sin embargo, dependiendo de las condiciones geométricas o factores externos que puedan perturbar la fibra óptica podemos encontrar diferentes modos de propagación, y todas estas formas de propagación las podemos asociar a los diferentes rayos o ángulos en los que se propaga la fibra como se mostró en las Figura 3 y 4.

A nivel simplemente descriptivo en la tabla 1 podemos ver las correspondencias entre algunos de los modos LP y los modos TM, TE, HE y EH.

Tabla 1. Correspondencia entre los modos linealmente polarizados y los modos vectoriales

Linealmente polarizados	Vectoriales
LP_{01}	HE_{11}
LP_{11}	$HE_{21}, TE_{01}, TM_{01}$
LP_{21}	HE_{31}, EH_{11}
LP_{02}	HE_{12}

Redes de Difracción

Una red de difracción es una estructura repetitiva como consecuencia de introducir una perturbación periódica del índice de refracción del núcleo a lo largo del eje de propagación de la fibra, que se forma al exponerla un patrón de interferencia óptico intenso. Este tipo de

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

redes trabaja como filtros ópticos que reflejan unas longitudes de onda específicas y dejan pasar ciertas longitudes de onda particulares, las cuales cumplen cierta condición de resonancia (Alejandro Carballar Rincón, 1999). Los orígenes de este descubrimiento se remontan al año 1978, Kenneth O. Hill y sus colaboradores, lograron la formación de una red de difracción al introducir una onda continua de luz azul, proveniente de un láser de argón en un tramo de la fibra óptica. Estas redes de difracción así creadas se denominaron “redes de difracción de Hill” y presentaban muchas limitaciones ya que el periodo de dicha red dependía de la longitud de onda de la fuente láser que se utilizara para el grabado de la red.

En 1989 G. Meltz y colaboradores (Meltz et al., 1989), propusieron otra técnica de fabricación para redes de fibra la cual llamaron “técnica holográfica” y se basa en la interferencia entre dos haces de laser de luz ultravioleta que producen el patrón de interferencia que incide sobre la fibra óptica. Las redes de difracción también se pueden clasificar según el periodo del cambio de índice de refracción del núcleo, de modo que se les denomina: redes de periodo corto o redes de Bragg (FBG, por sus siglas ingles) y redes de periodo largo (LPG, por sus siglas en ingles). En este trabajo nos centraremos en las redes de periodo largo y sus propiedades debido a que serán esta las que se emplean en la construcción de la conversión modal.

Redes de periodo corto o redes de Bragg (FBG)

Son nombradas de esta manera porque su funcionamiento es basado en la ley de reflexión de Bragg, estos dispositivos fueron las primeras redes grabadas en fibras ópticas, y la característica principal de este tipo de redes es reflejar en transmisión un parte de la banda

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de longitudes de onda. Para cumplir esta condición de Bragg es necesario que el periodo de la red (Λ) sea pequeño, es decir que sea de unos cuantos micrómetros o inferior ($\Lambda \leq 100 \mu\text{m}$). En la ecuación 7 se representa la condición para el funcionamiento de una red de Bragg.

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{\text{eff}} \quad (7)$$

donde, λ_B es la longitud de resonancia de Bragg, que depende del índice de refracción efectivo (n_{eff}) que ve el modo fundamental y dos veces el periodo de la red (Λ).

Bajo la condición de las redes de difracción, las redes de Bragg consisten en perturbaciones periódicas del índice de refracción a lo largo de la fibra, generalmente en una fibra monomodo (Imas et al., 2021). Como lo muestra la Figura 5, al tratarse de una estructura resonante y simétrica, la FBG siempre refleja luz a la longitud de onda de la red de Bragg, independientemente de la dirección de incidencia. La red de Bragg inscrita en la fibra actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda; en otras palabras, es un filtro de banda estrecha. Eso significa que, si se inyecta en la fibra óptica luz procedente de una fuente de banda ancha, la red solo refleja luz con una anchura espectral muy estrecha, centrada en torno a la longitud de onda de la red de Bragg. El resto de la luz se transmite a través de la fibra óptica sin ninguna pérdida, hasta la siguiente red de Bragg inscrita en la fibra.

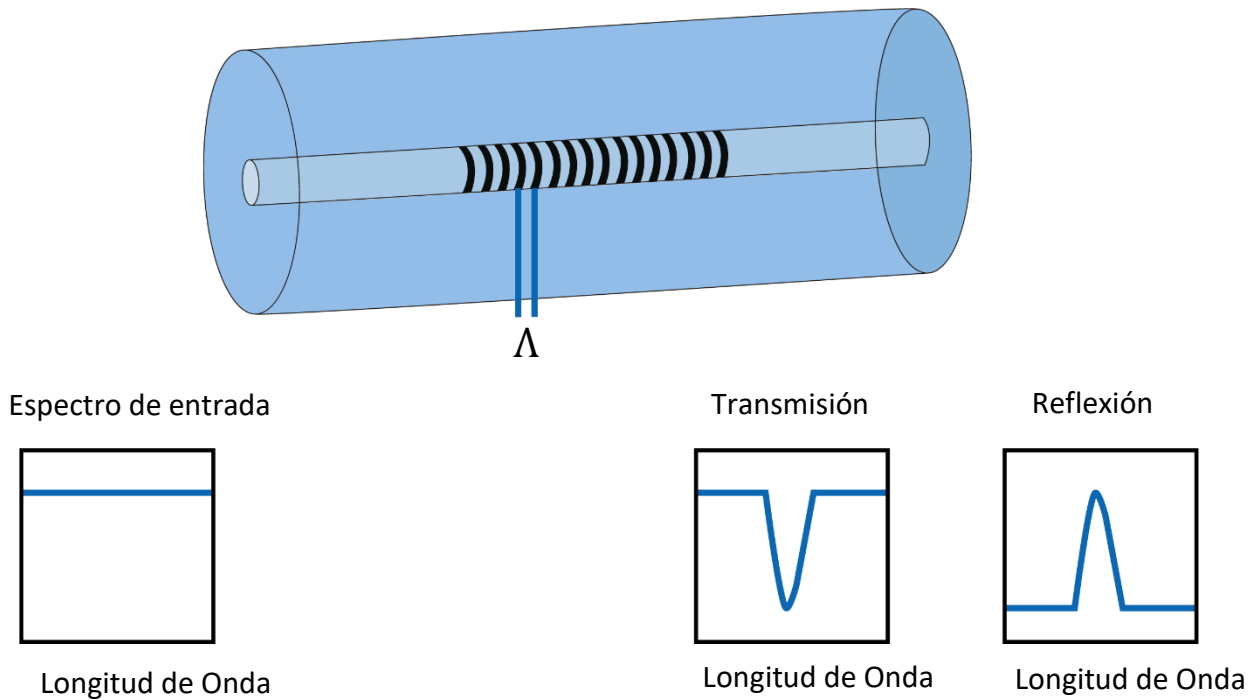


Figura 5. Esquema y representación de respuesta espectral de una FBG.

Las FBG han sido el tipo de redes más utilizadas comercialmente, ya que desempeñan un papel fundamental en el monitoreo estructural, lo que ha permitido medir diferentes variables físicas, como la deformación y la temperatura de estructuras, como túneles, presas, aeronaves, etc.(Imas et al., 2021) mediante la medición de longitud de onda de resonancia. Sin embargo, este tipo de redes son sensibles a los cambios de índice de refracción en el medio circuncidante (SRI, por sus siglas en inglés), por lo que el acoplamiento solo ocurre entre los modos del núcleo que no se ven afectados por el medio.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Redes de Periodo largo (LPG)

Las redes de periodos largo (LPG, por sus siglas en inglés) son una extensión de las redes de Bragg y lo que las hace distintas es que su periodo de red es más largo ($100 \mu\text{m} \leq \Lambda \leq 1\text{mm}$) y que solo trabajan en transmisión (Ignacio Flores Llamas et al., 2007). En la Figura 6 se representa el esquema de las LPG y su respuesta espectral; donde el periodo de la red es tal que permita el acoplamiento de luz del modo fundamental en el núcleo de la fibra hacia los modos de propagación en el revestimiento de la fibra y en virtud de esta característica de funcionamiento las redes LPG se suelen emplear como filtros ópticos con baja reflexión (Valencia et al., 2022). Las redes LPG también cumplen con la condición de Bragg de igual fase entre el modo fundamental guiado por el núcleo y los modos guiados por el revestimiento, esta condición es dependiente de la longitud de onda y está dado por la ecuación 8 y la ecuación 9 que representa la red de periodo largo uniforme.

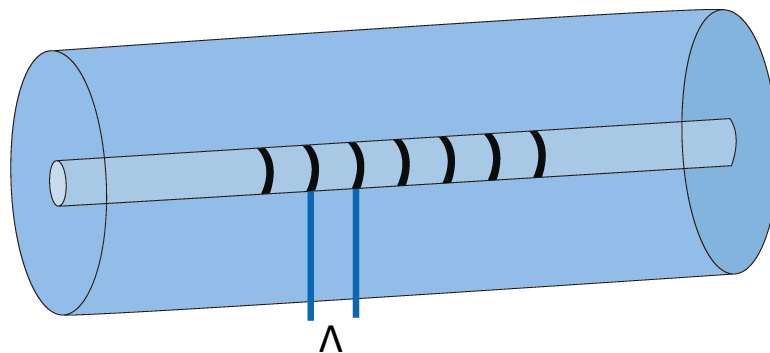
$$\beta_0 - \beta_1 = \Lambda * \beta_1 = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (8)$$

Donde, β_0 y β_1 son las constantes de propagación de los modos (Ignacio Flores Llamas et al., 2007).

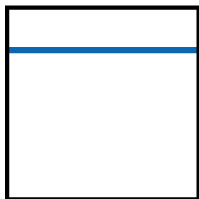
$$\lambda_B = (n_{\text{effnucleo}} - n_{\text{effrevestimiento}}) \Lambda \quad (9)$$

En la actualidad existen diferentes tipos de redes de periodo largo, una de las más comunes es la red de periodo largo uniforme, está red se graba de manera perpendicular al eje

longitudinal de la fibra óptica y tiene un periodo constante, su comportamiento como filtro de banda es similar a la redes de periodo largo inclinadas (X. Zhao et al., 2017) y de periodo variable en donde el acoplamiento se obtiene entre el modo del núcleo y los modos del revestimiento, lo que resulta en un espectro de transmisión con varias bandas de atenuación.



Espectro de entrada



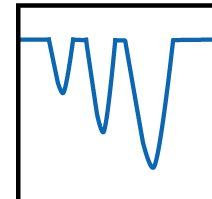
Longitud de Onda

Reflexión



Longitud de Onda

Transmisión



Longitud de Onda

Figura 6. Esquema y representación de respuesta espectral de una LPG.

Por otra parte, la fabricación de este tipo de redes de difracción fue presentada por primera vez dos décadas después de las redes de Bragg, en 1996 Ashish M. y compañía (Lin et al., 2000) donde utilizaron la técnica de máscara de amplitud con luz a una longitud de onda de 248 nm, lo que para su época facilitó la técnica del grabado con UV. Con el tiempo, se fueron desarrollando diferentes técnicas de fabricación alternativas a el grabado UV, como lo son;

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

técnicas térmicas, de carga mecánica, de desbaste químico y técnicas de absorción de dos fotones (Ignacio Flores Llamas et al., 2007). Para este trabajo se usará la técnica térmica usando un láser de CO₂, la cual se utilizó como fabricación y caracterización de una red de periodo largo por Rojas y compañía en el 2020 (Rojas et al., 2020; Valencia et al., 2022) y que constaba de un juego de lentes cilindros que enfoca el haz de laser de CO₂ sobre el eje de propagación de la fibra, el cual se desplaza de manera perpendicular y logra exponer todo el eje expuesto al rayo del láser. Con este método se logra modificar el índice de refracción inducido en el núcleo, pero en algunos casos el daño del láser provoca ablación (deformación en toda la fibra).

Acoplamiento Modal

Como complemento a la sección del marco teórico, los aspectos referidos a la propagación de la luz en una fibra óptica, sabemos que cuando la luz es introducida en la fibra óptica, la energía transmitida pertenecerá a algunos de los modos guiados. Sin embargo, solo hemos tenido en cuenta las guías de onda perfectas, una condición que no se cumple para la mayoría de los estudios experimentales, ya que se pueden llegar a presentar variaciones en el diámetro del núcleo, irregularidades entre el núcleo y/o el revestimiento o variaciones en los índices de refracción, debido a cambios externos que perturben la fibra óptica (Ghatak & Thyagarajan, 2013). Estas variaciones pueden influir en el acople de energía transmitida entre los mods que se propagan a través de la fibra, dependiendo del tipo de perturbación que se aplique en esta.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Por tanto, el acoplamiento modal; es un aspecto importante y relevante en las comunicaciones, que generalmente se analiza de manera teórica a través de las ecuaciones de un acoplador simétrico, o de la teoría para un acoplamiento modal con respecto a las redes de periodo largo, ya que las ecuaciones son las mismas, solo cambia el valor de los parámetros de cada fibra. En este caso cuando se elige un periodo Λ de la red mayor al periodo mínimo, habrá un valor de periodo que tendrá correspondencia a dos longitudes de onda de resonancia. A esto se le conoce como acoplamiento de doble resonancia entre dos modos del núcleo que puede aplicar a cualquier modo de tipo vectorial LP_{11} , e independientemente de la fracción de tiempo de las ondas electromagnéticas, el campo eléctrico de LP_{01} , y LP_{11} , en las fibras ópticas de pocos modos puede expresarse como las ecuaciones 10 y 11.

$$\vec{E}_{01}(\vec{r}) = A_{01}(z)\vec{E}_{01}(x,y)\exp(-i\beta_{01}z) \quad (10)$$

$$\vec{E}_{11}(\vec{r}) = A_{11}(z)\vec{E}_{11}(x,y)\exp(-i\beta_{11}z) \quad (11)$$

donde, $\vec{E}_{01}(x,y)$ y $\vec{E}_{11}(x,y)$ corresponden a la distribución de campo eléctrico transversal, $A_{01}(z)$ y $A_{11}(z)$ representan la variación de la amplitud del campo óptico longitudinal a lo largo del eje z . $\exp(-i\beta_{01}z)$ y $\exp(-i\beta_{11}z)$ denotan la variación de fase del campo óptico a lo largo del eje z .

Para una fibra óptica ideal, en este caso una fibra óptica de pocos modos, no hay acoplamiento modal entre dos modos ortogonales LP_{01} y LP_{11} . $A_{01}(z)$ y $A_{11}(z)$ son las amplitudes

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

longitudinales del campo eléctrico de los modos. Cuando se realiza la fabricación de la LPFG para imponer una modulación periódica del índice de refracción en la fibra, la energía entre los modos LP_{01} y LP_{11} y la respectiva amplitud del campo óptico a lo largo del eje z cambiarán. Según la teoría de modos acoplados la amplitud entre LP_{01} y LP_{11} transmitiendo con la misma dirección cumple con las siguientes condiciones de las ecuaciones 12 y 13:

$$\frac{dA_{01}(z)}{dz} = -ik * A_{11}(z)e^{-i2\delta z} \quad (12)$$

$$\frac{dA_{11}(z)}{dz} = -ik * A_{01}(z)e^{+i2\delta z} \quad (13)$$

donde el parámetro de desajuste de fase se denota por la ecuación 14:

$$\delta = \frac{1}{2} [\beta_{01} - (\beta_{11} + G)] \quad (14)$$

donde $G = \frac{2\pi}{\Lambda}$, $\beta = n_{\text{eff}} * \frac{2\pi}{\lambda}$ y la constante de acoplamiento k para las LPFGs se denota como la ecuación 15:

$$k = \frac{w}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \vec{E}_{01}(x, y) \cdot \Delta\epsilon(x, y) \cdot \vec{E}_{11}(x, y) dx dy \quad (15)$$

Entonces la contribución significativa proviene de los términos que hacen a δ pequeño o cero. Así, el intercambio de energía proviene solo de los modos con una combinación particular para los que $\beta_{01} - (\beta_{11} + G) = 0$. Por lo tanto, expresando las constantes de propagación en términos de los índices de refracción efectivos se obtiene la ecuación (16)

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{res}}}{n_{\text{eff},01} - n_{\text{eff},11}} \quad (16)$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Esta ecuación permite determinar cuál es el valor del periodo de la red a fabricar, a partir de los índices de refracción efectivos de los modos y la longitud de onda de operación del dispositivo.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

3. METODOLOGÍA

Fabricación de redes de periodo largo

Como se mencionó en la sección del marco teórico, existen diferentes técnicas para la fabricación de las LPFG, entre las más destacadas podemos mencionar las técnicas con láser UV, con máscara de fase, a través de un arco eléctrico y con láser de CO₂. En este trabajo se ha empleado la técnica de fabricación basada en grabación con láser de CO₂, y el montaje experimental empleado en la fabricación se ilustra en la Figura 7. En este montaje se han empleado un láser de CO₂ cuya longitud de onda de emisión es de 10.6 μm y cuyos pulsos pueden ser controlados durante el proceso de fabricación para modificar la intensidad del disparo. Además, un juego de lentes es usado para enfocar el haz del láser de CO₂ sobre la fibra óptica, mientras dicha fibra se desplaza de forma perpendicular al haz del láser usando un par de motores lineales con paso micrométrico como se ilustra la Figura 7. En la Figura 8 se detalla cómo es la irradiación del spot del láser de CO₂ sobre la fibra óptica. Los disparos sobre la fibra óptica inducen cambios en el índice de refracción a partir del fenómeno de ablación láser sobre el núcleo de la fibra óptica.

Como se mencionó antes, los parámetros del láser tales como, la potencia, frecuencia y tiempo de exposición permiten modificar el proceso de grabación en las LPFG, es decir, a partir del ajuste de estos parámetros se puede controlar la variación del índice de refracción, y, por ende, la profundidad del pico de resonancia de la LPFG. Un aspecto importante a tener en cuenta durante el proceso de fabricación es que antes de iniciar el proceso de grabado es necesario eliminar el acrilato de la fibra (Grado, 2019).

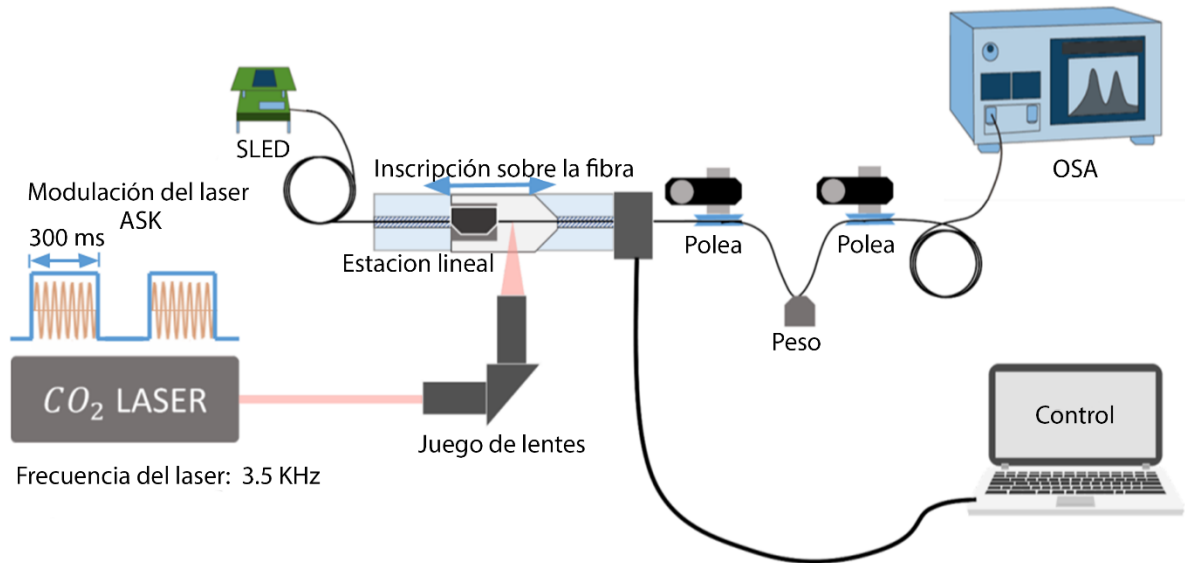


Figura 7. Esquema técnico de fabricación de LPFGs empleando la técnica basada en láser de CO₂.

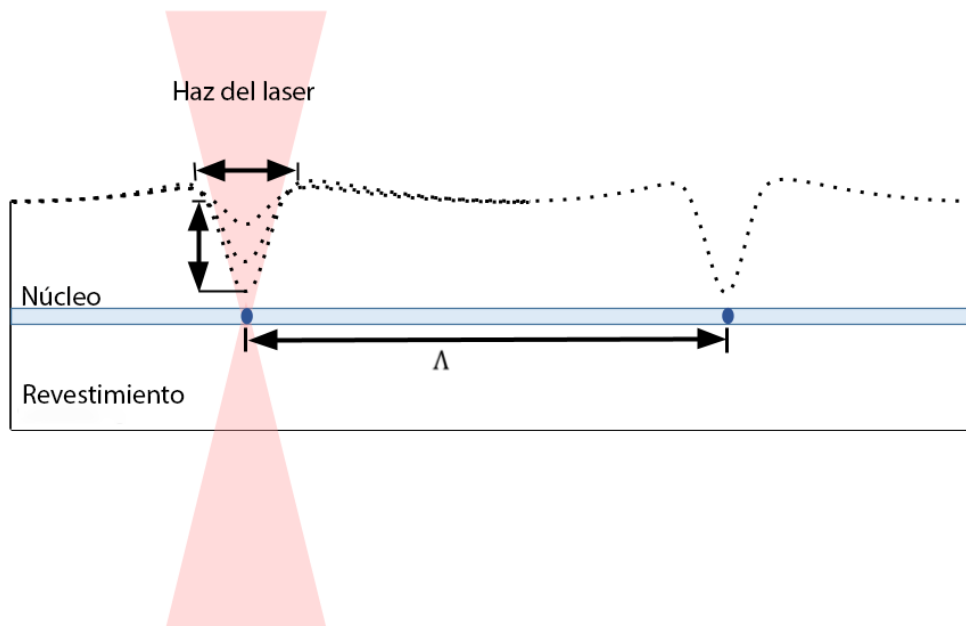


Figura 8. Esquema técnico de fabricación con láser de CO₂ ampliado en la región de inscripción punto a punto.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados en el proyecto, se elaboró una metodología experimental que permite fabricar redes de periodo largo en fibra óptica, la caracterización experimental de ellas mismas para validar la capacidad que estas tienen para ser controladas térmicamente para finalmente, emplearlas en el desarrollo de conversores modales ópticos.

Inicialmente se configuro el sistema de grabación de LPFGs basado en el láser de CO₂ para grabar las redes punto a punto. Para ello, fue necesario optimizar el sistema, pues en el intervenían diversos grados de libertad tales como frecuencia del láser, potencia del láser, tipo de fibra, etc. Posteriormente, fueron grabadas LPFGs empleando fibra óptica convencional (SMF-28E+) y se verifico a través de pruebas basadas en microscopia la calidad del sistema de grabación, allí se evaluaron factores como la repetibilidad del sistema. Dicha optimización requirió la calibración de los componentes, en especial la plataforma del sistema de desplazamiento lineal. Para ello, el software comercial LabVIEW fue empleado para controlar todos los elementos del sistema de grabación, es decir, de controlar el láser y los motores sobre los cuales está ubicada la fibra óptica. La interfaz del software desarrollado es ilustrada en la Figura 9. El entorno grafico del software LabVIEW permite el control de diferentes parámetros, como lo es el control de la estación lineal, la velocidad de desplazamiento, cantidad de desplazamientos y la separación espacial entre cada periodo o pulso emitido por el láser. Además, este permite la sincronización del número de pulsos emitidos por el láser y el tiempo de BURST o tiempo de exposición de láser sobre la fibra óptica, el cual nos ayudó a caracterizar los parámetros de barrido de frecuencia, PWM y tiempo de exposición del láser BURST para caracterizar los parámetros con los que se

realizan la inscripción punto a punto de las redes de periodo largo. El periodo es de 620 μm para todos los casos y con un numero de periodos de 80-100 con un pulso de láser por cada periodo.

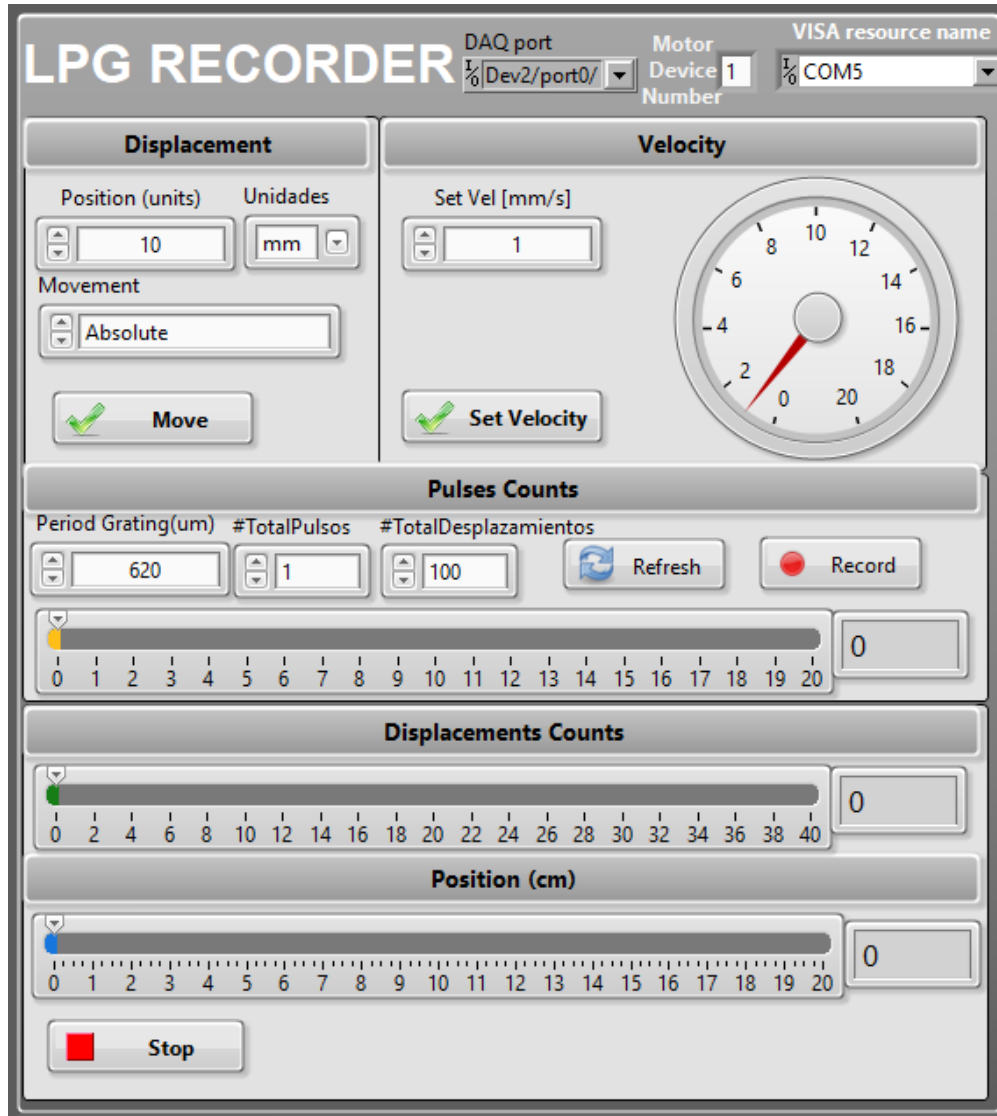


Figura 9. Entorno grafico del software LPG RECORDER empleado para controlar el láser de CO₂ y estación lineal..

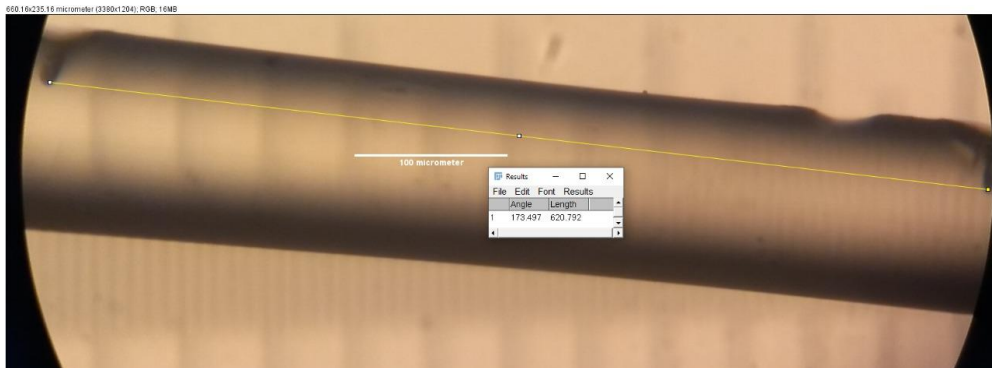
	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Teniendo en cuenta que cada proceso debe ser optimizado, en esta fase experimental se tomaron algunos datos para verificar que los parámetros de control del LPG RECORDER estén sincronizados con los datos ingresados, es decir, que se puede tener un control de cada parámetro (periodo de grabación, longitud de grabación, etc) debido a que las variables de nuestro sistema están en el orden de los micrómetros, por ende, es vital garantizar la exactitud de las variables responsables al momento de la fabricación de la LPFG. Con ello, además se busca asegurar que este sistema de grabación de LPFGs tenga, alta repetibilidad y este calibrado.

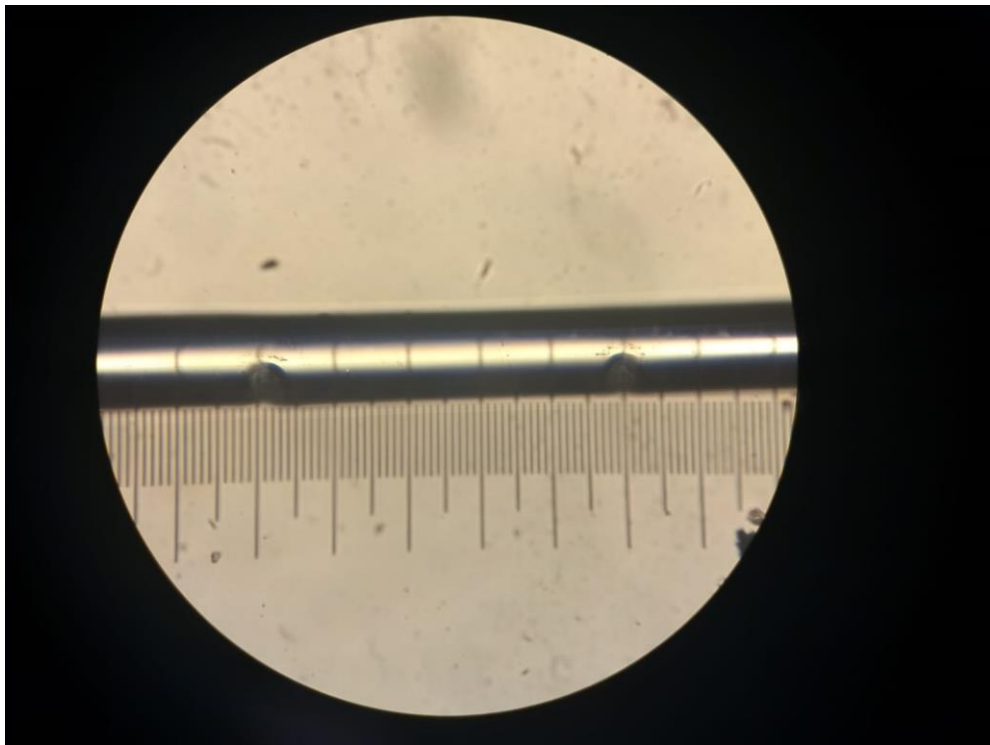
La interfaz ilustrada en la Figura 9, tiene la opción Displacement (desplazamiento) que permite controlar el desplazamiento de la estación lineal, las unidades y el tipo de movimiento (relativo o absoluto), el parámetro Velocity (velocidad) facilita el control de la velocidad de ejecución de la estación lineal. La opción Pulse Counts (Contador de pulsos) asigna la separación espacial entre periodo “Period Grating” Λ de cada pulso en μm y el total de pulsos. (Rojas et al., 2020). En Displacement Counts (contador de desplazamientos) y Position (posición), indica en el transcurso y al final de la ejecución de la inscripción punto a punto, cuantos pulsos se realizaron y la posición en centímetros en tiempo real.

Para la toma de estos datos se grabaron algunas redes de periodo largo de prueba, teniendo en cuenta que el control del periodo de la red en LABVIEW tiene un factor de conversión de 124 μm , por lo que se grabaron a 496 μm y 620 μm (Rojas et al., 2020; Stancălie et al., 2017; Valencia et al., 2022) con frecuencia 5 kHz y un PWM del láser igual a 8.5 %. De esta manera, las perturbaciones ocasionadas por el láser en las fibras ópticas de prueba tuvieron una mayor visibilidad al analizarlas en una vista microscopia con un Microscopio Nikon Eclipse Ti (se usaron los objetivos de 20x y ocular 10x) como lo podemos ilustrar en la Figura

10a y 10b. Con esto garantizamos que el periodo espacial de la estación lineal configurado en el LPG RECORDER fuera preciso.



(a)



(b)

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 10. Vista microscopia en Nikon Eclipse Ti de la red de periodo largo de prueba. Procesamiento de imágenes en IMAGEJ (a) $\Lambda = 620 \mu\text{m}$. (b) $\Lambda = 496 \mu\text{m}$.

A partir de las imágenes ilustradas en la Figura 10, se realizaron mediciones como se mencionó antes. Para ello, se midieron las características físicas de la LPFG con un microscopio digital (Quick Scope) de Mitutoyo facilitado por el Instituto Nacional de Metrología de Colombia (INM). La Figura 11 presenta las imágenes tomadas con el Quick Scope para la longitud medida l_i , la profundidad del punto S_d y el ancho del punto S_w . Es importante notar que debido a la modulación de la alta frecuencia de los pulsos del láser de CO_2 , la LPFG no muestra ninguna deformación o micro curvaturas incluso cuando se utiliza una alta potencia óptica (Valencia et al., 2022).

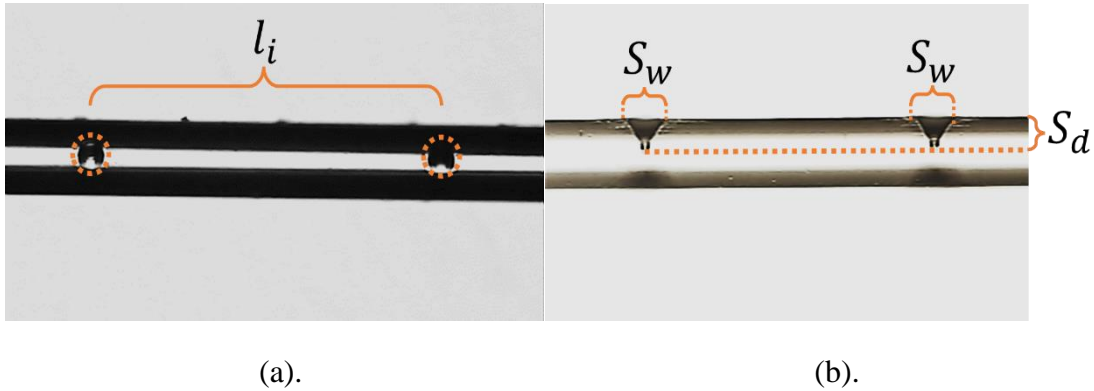


Figura 11. (a) Puntos de medición de las redes de fibra, el período de la red se extrae del plano focal observado. (b) la anchura de la superficie del punto grabado y la profundidad de penetración se extrajeron del perfil a la derecha.

Las primeras fibras muestreadas fueron las grabadas con ablación para mostrar la profundidad máxima alcanzada por el punto focal del láser, y las segundas muestreadas fueron las LPFG, para validar las longitudes medidas. En total se midieron 80 puntos

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

grabados entre las muestras (20 puntos cada una). Los resultados de la caracterización pueden verse en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la medición de la penetración láser, con microscopio digital (Quick Scope).

Valor programado (μm)	l_i (μm)	Error (μm)	U (μm)
620.0	619.0	-1.0	4.0

Donde el valor programado para la inscripción punto a punto fue de 620 μm y el valor obtenido fue de 619 μm . El valor del error indica que este, esta por encima o por debajo del valor esperado, en este caso es un micrometro por debajo del valor esperado. Finalmente, la incertidumbre estandar puede expresarse como U, este proceso fue realizado en base a los 80 puntos grabdos en las fibras ópticas y se obtiene un valor de 4.0 μm . Como se observa, el error es mucho menor a la incertidumbre del sistema, por ende, podemos afirmar que nuestro sistema es confiable en el proceso de grabación de redes de periodo largo (Valencia et al., 2022).

Tabla 3. Resultados de la medición del punto láser.

Geometría del punto	Media (μm)	U (μm)
S_d	49.4	1.2
S_w	50.3	3.0

En la tabla 3 se presentan los resultados obtenidos para la profundidad del punto láser S_d y la anchura S_w , cabe destacar que la profundidad está muy cerca del núcleo de la fibra

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

óptica durante todo el desplazamiento de la estación lineal, lo que significa que la configuración para la alineación óptica garantiza la repetibilidad de la fabricación de los LPFGs.

Este proceso experimental tuvo inicialmente 3 etapas de alineación y calibración: primero se configuraron los componentes lógicos, luego se realizó la calibración de los componentes físicos tales como lo son la estación lineal, el láser de CO₂ y el juego de lentes. Finalmente, se calibraron los parámetros de salida del láser tales como, frecuencia, potencia y tiempo de exposición (BURST).

Para la calibración de los componentes físicos, se optó por una implementación de un sistema lineal optimizado, a diferencia de la estación lineal de (Rojas et al., 2020) nuestra nueva propuesta fue elaborar un montaje más estable como lo muestra la Figura 12. Este sistema consta de un láser de CO₂ (Infinity Series: Models 155 through 1512) con una potencia máxima de 50 W y una frecuencia variable, la cual puede ser modificada desde 0.1 kHz hasta 140 kHz, el arreglo de lentes cuenta con una lente menisco positivo (lente convexa-cóncava), la cual es empleada para para minimizar la aberración esférica. El sistema también cuenta con una estación lineal, esta estación es controlada por un motor de paso ZABER TECHNOLOGIES (incertidumbre de paso de 1 μm), también se cuenta con un SLED como fuente espectral de luz blanca en un rango de 1500 a 1600 nm, y un analizador de espectros ópticos (YOKOGAWA, AQ-6370B) .

La inscripción punto a punto se realizó en una fibra óptica convencional SMF-28E+. Los parámetros del láser fueron: 8% de la potencia del láser y una frecuencia de 5 kHz. El tiempo

de BURST o tiempo de exposición es de 350 ms. La LPFG se grabó punto a punto con un periodo de grabado de $620 \mu\text{m}$ y una longitud total de la red igual a 62 mm. Los resultados espectrales de estas redes se analizan en la siguiente sección de resultados.

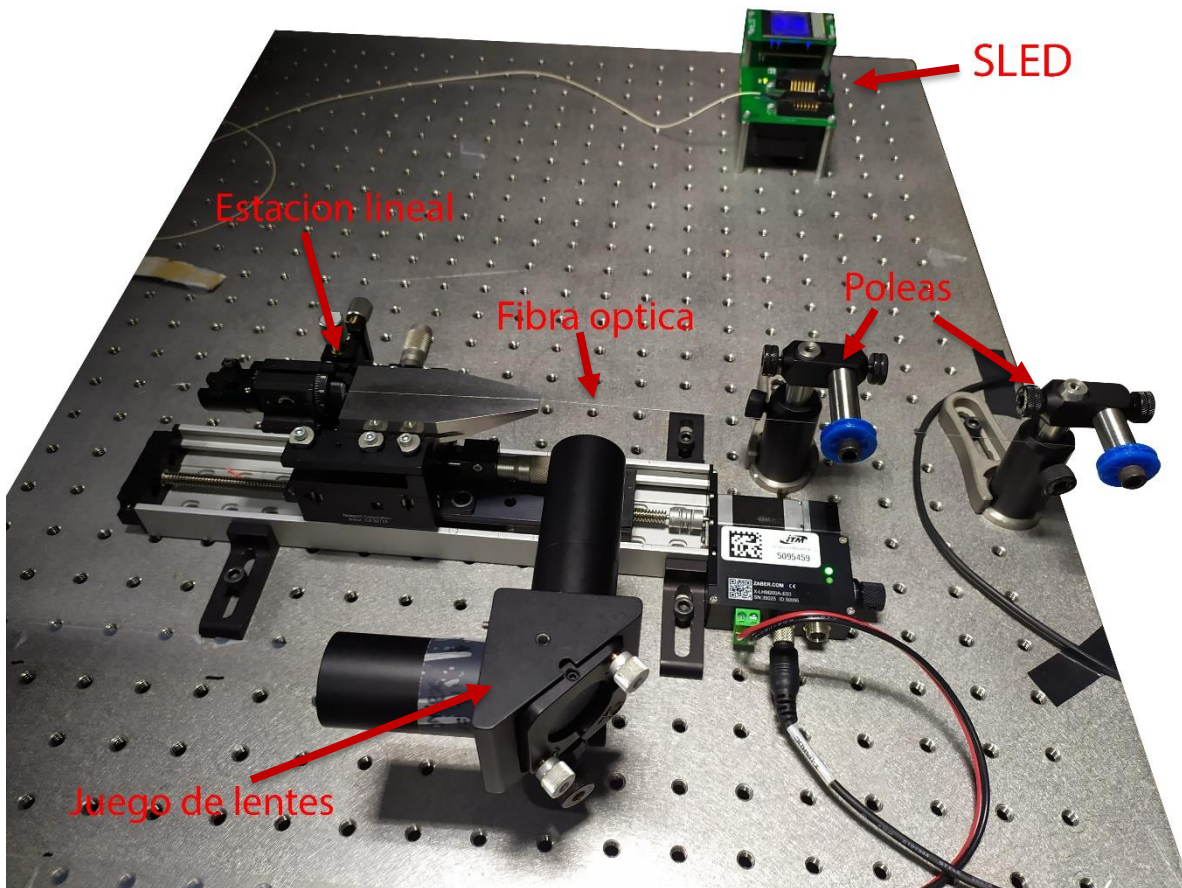
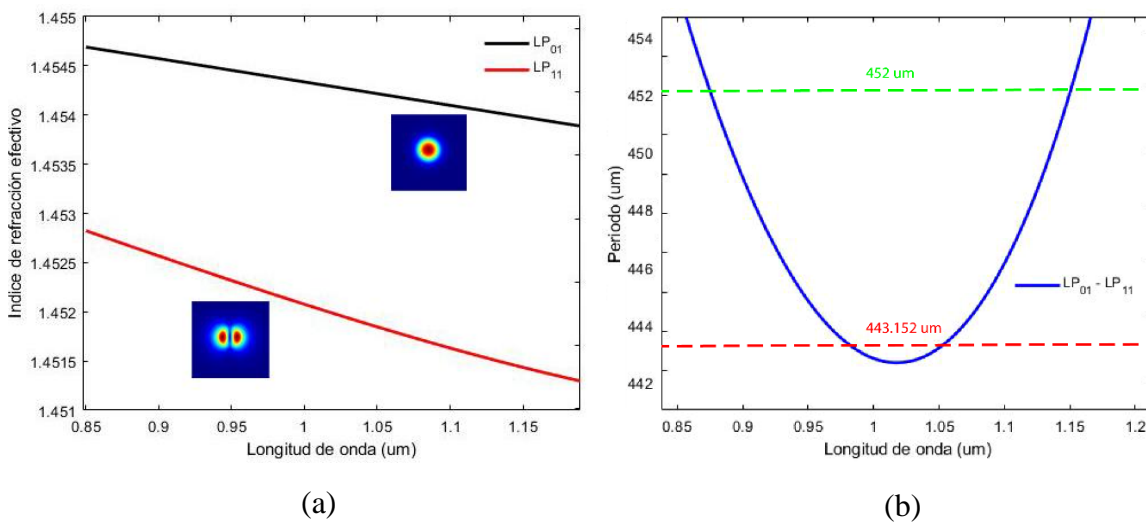


Figura 12. Montaje experimental para la fabricacion de las redes de periodo largo con laser de CO_2 .

Caracterización experimental del conversor modal óptico basado en LPFGs

Como se explico en la seccion anterior, las LPFG puede fabricarse imponiendo una modulación periódica del índice de refracción en la fibra optica, logrando el acoplamiento de modos entre el LP_{01} y LP_{11} . De acuerdo con la condición de coincidencia de fase presentada en la ecuación (14).

La TMF utilizada en nuestro estudio es la fibra Corning SMF-28E+. El radio del núcleo y del revestimiento es de $4.07 \mu\text{m}$ y $62.5 \mu\text{m}$ respectivamente. La cual se comporta como una fimra bimodal a ciertas longitudes de onda, como en este caso en el cual a 980 nm la fibra puede soportar dos modos en el nucleo y comportarse como un conversor modal a esa longitud de onda.. Realizamos la simulación utilizando el software FIMMWAVE para calcular el período de la LPFG en función de diferentes longitudes de onda, presentando una tendencia de variación parabólica, que se ilustra en la Figura 13b.



	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Figura 13. a. Curva de dispersion de la TMF b. Tendencia de variación parabólica del periodo de la LPFG con el aumento de la longitud de onda.

En la Figura 13a. se evidencia la curva de dispersion para la TMF de los modos LP_{01} y LP_{11} , mientras que en la Figura 13 b, se muestra la tendencia de variación parabólica del periodo de la LPFG con el aumento de la longitud de onda, donde se pueden evidenciar como se calcula el periodo para diferentes longitudes de onda, en este caso la línea punteada de color verde corresponden al periodo de grabado experimental y la línea punteada de color rojo a los simulados para el periodo deseado a una longitud de onda a 980 nm. En los resultados experimentales el periodo fue de 452 μm , cuya diferencia con la simulación es de aproximadamente 9 μm , esta variedad puede ser inducida por los parámetros de la fibra óptica al momento de ser simulada (Guo et al., 2019).

Una vez fabricadas las LPFGs y dada su capacidad para ser sintonizadas a través de agentes externos como tensión o temperatura, se optó por emplearlas como plataforma en la construcción de un conversor modal óptico. En el esquema experimental propuesto de la Figura 14, se optó por una configuración que permita realizar cambios extrínsecos en la sección donde se encuentra la LPFG y visualizar a la salida la distribución modal al cambiar las propiedades iniciales en las que encuentra la LPFG. Con esto, es posible evidenciar la conversión modal a partir del análisis de la distribución espacial del modo, y como este depende de diversos factores tales como temperatura y polarización.

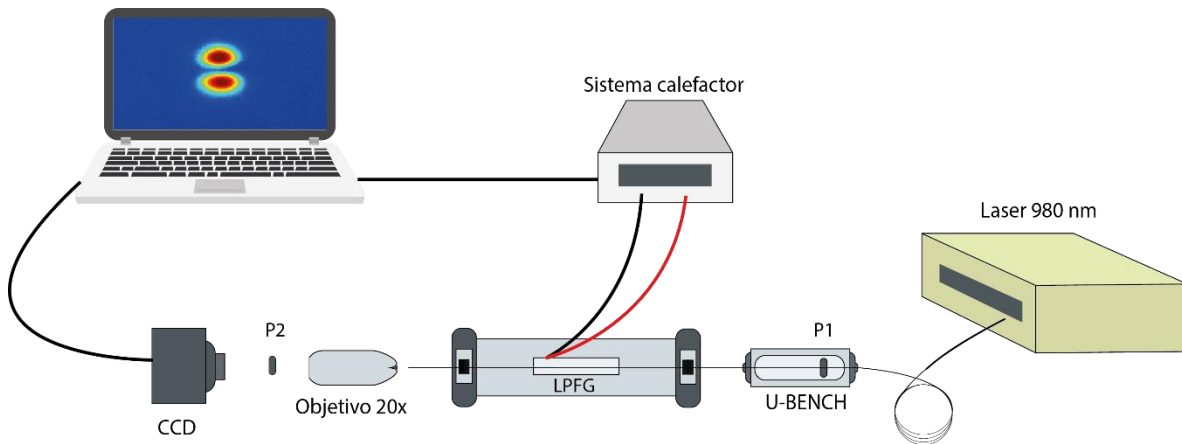


Figura 14. Esquema experimental para la caracterización del convertor modal basado en las redes de periodo largo fabricadas con laser de CO_2 .

Como se muestra en la Figura 14, el montaje experimental empleado en la caracterización del convertor modal basado en una LPFG está compuesto por: un láser a 980 nm (Optilab, FP-B-980-150), el cual se encarga de inyectar luz en el sistema mediante una fibra óptica SMF-28 para garantizar a la entra el modo fundamental. Se empleó un U-BENCH entre la LPFG y el diodo laser, esto con el fin de controlar la polarización de la luz, antes de que esta ingrese al convertor. En nuestro caso optamos por emplear solo polarización lineal a 0° , 45° y 90° . Después de polarizar el haz de luz, este ingresa a la red de periodo largo (LPFG), la cual a su vez está en contacto con un sistema de calentamiento, empleado para inducir cambios térmicos sobre la LPFG y así, poder inducir cambios sobre esta, lo cual generara una modificación en el sistema de conversión modal. Finalmente, en el otro extremo la luz es recogida y colimada con un objetivo 20X, y finalmente una cámara WIDY SWIR 640 VS es usada para registrar en tiempo real la distribución espacial de los modos. El segundo polarizador P2 se introduce antes de la cámara WIDY SWIR 640 para discriminar el modo de salida, como se explica en la sección de resultados. Los dos extremos de la fibra fueron

fijados mediante soportes para evitar vibraciones y desplazamientos. En la Figura 15 se muestra el montaje experimental realizado.

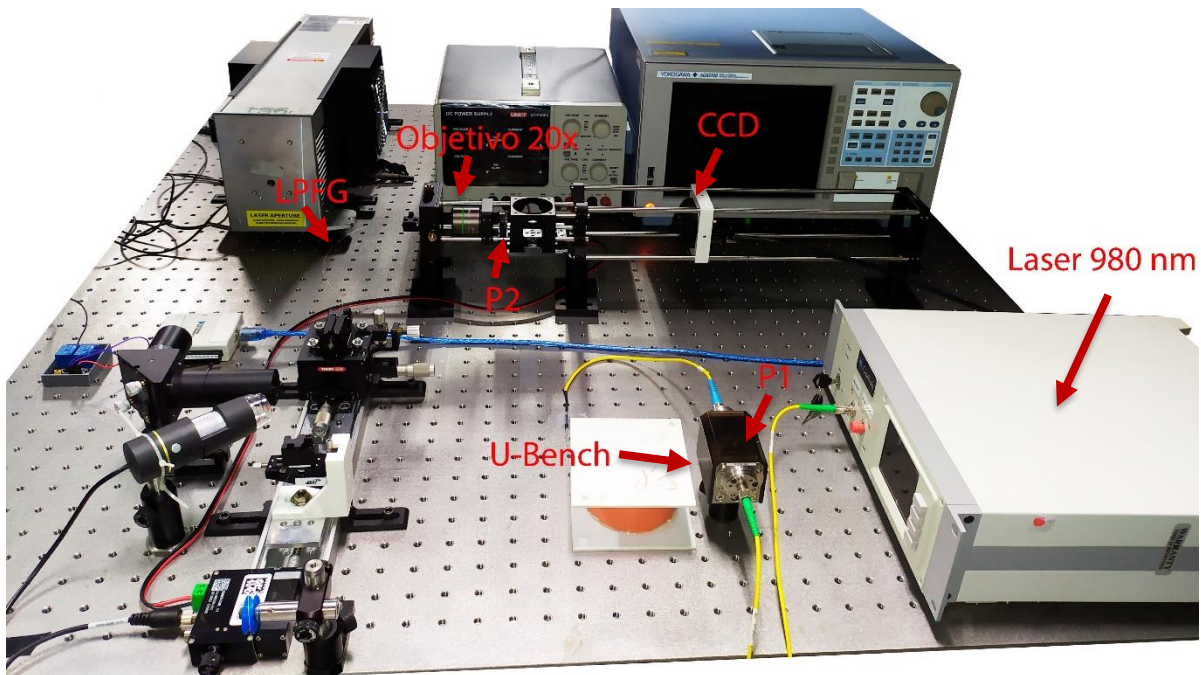


Figura 15. Montaje experimental para la caracterización del convertor modal basado en las redes de periodo largo fabricadas con laser de CO₂.

La captura de las imágenes que realiza la cámara es controlada por el software WIDY VISION – NIT. Inicialmente se adquirieron imágenes mientras la temperatura se mantenía constante a 25°C. En este caso, solo se realizó una variación de los ángulos de polarización de entrada (P1) y salida (P2), esto con el fin de evidenciar como la polarización puede afectar el proceso de conversión modal óptico en este tipo de sistemas. La configuración de la cámara WIDY SWIR 640 e realizó con una escala normalizada (la intensidad más baja representada con el color azul, y la más alta con tonalidades rojas), esto con el fin de

evidenciar si caída en la potencia del modo al rotar el polarizador. Finalmente, para cada una de las polarizaciones de entrada se configuró el polarizador de salida de 0° a 180° en pasos de 10° tal proceso se puede ilustrar en la Figura 16. Por lo tanto, el experimento para cualquiera de las polarizaciones se puede realizar en las mismas condiciones y ayuda a comprender que el cambio que se puede afectar a la respuesta del conversor modal.

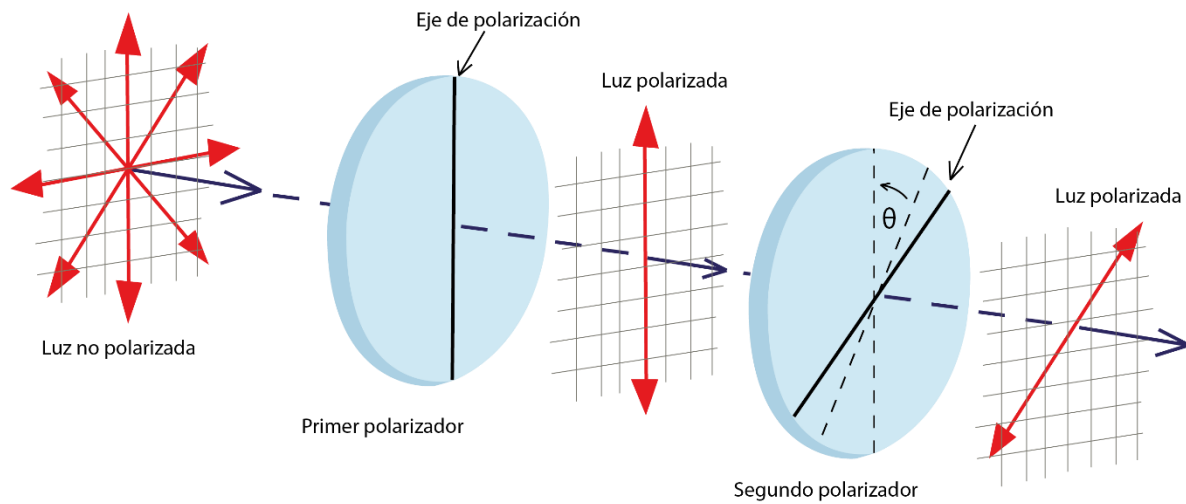


Figura 16. Esquema de polarización de la luz.

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se analizó la respuesta en transmisión del resultado obtenido al inscribir punto a punto una fibra óptica estándar con láser de CO₂ y su respuesta espectral cuando están sometidas a cambios físicos externos como temperatura y tensión. Finalmente, se analizó el resultado de la fabricación de la LPFG como conversor modal a 980 nm.

Caracterización de temperatura

Una vez las LPFGs fueron fabricadas y sus características físicas fueron evidenciadas de forma experimental, se procedió a realizar una caracterización óptica de las LPFGs fabricadas y se logró evidenciar los modos del revestimiento que se están excitando (Erdogan, 1997). La Figura 17 muestra el espectro de transmisión de la red de periodo largo inscrita sobre una fibra óptica SMF-28E+. En este caso, la LPFG fue grabada con un periodo de 620 μm , una potencia de 8.0 % y frecuencia del láser de 5 kHz. Como se puede observar, este espectro presenta tres picos de resonancia, los cuales corresponden a los modos LP₀₂, LP₀₃ y LP₀₄ a 1525 nm, 1541 nm y 1555 nm, respectivamente. Allí, además podemos evidenciar que solo los picos LP₀₃ y LP₀₄ presentan niveles de pérdidas en la transmitancia significativas, lo cual implica que solo a estas dos longitudes de onda se logró un buen acople de energía entre el modo del núcleo y los respectivos modos del revestimiento. Por esta razón, estas dos resonancias serán las que analizaremos en el resto de los experimentos.

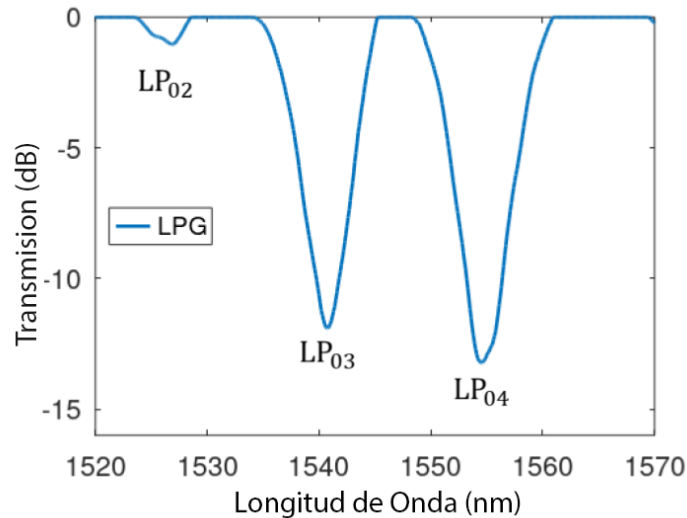


Figura 17. Respuesta espectral de los dos espectros LPG más atípicos, el modo principal de revestimiento a 1541 nm está presente en ambos.

Se utilizó el programa FIMMWAVE (Photon Design) para encontrar los modos que correspondían a nuestra LPFG. En primer lugar, se implementó esta herramienta para simular un LPFG bajo las mismas circunstancias experimentales, permitiendo calcular el índice de refracción efectivo de los modos del núcleo y del revestimiento. Como resultado, se obtiene el espectro del LPFG propuesto y se representa en la Figura 18. En ella, podemos evidenciar tres picos de resonancia a 1526,5 nm, 1539 nm y 1561 nm, que se aproximan bastante a lo observado experimentalmente. Por otro lado, FIMMWAVE nos permite ver la distribución espacial de los modos en cada lugar de resonancia (la Figura 18 los representa). De estas imágenes se desprende que los tres picos de resonancia que corresponden a los modos LP₀₂, LP₀₃ y LP₀₄.

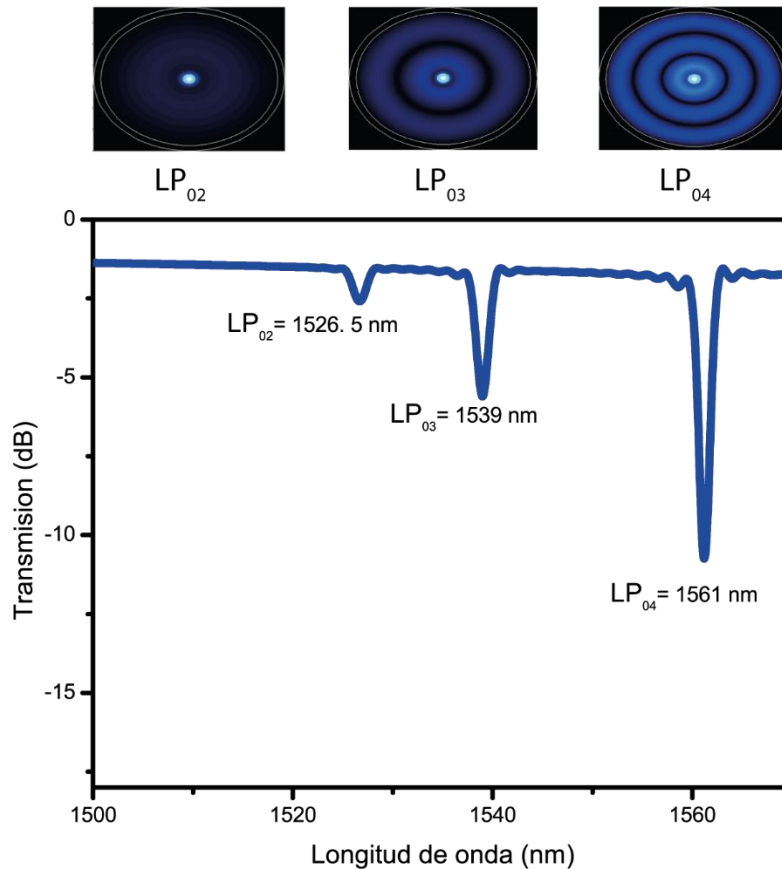


Figura 18. Espectro de transmisión inicial numérico para un LPFG de período 620 μm en una SMF28e.

Una vez realizada la caracterización espectral básica de la LPFG, confirmamos que la metodología propuesta nos permite realizar la grabación de LPFGs. Por ende, a continuación de evaluó la capacidad de estas para ser controladas a través de efectos térmicos y mecánicos. En primer lugar, se evaluó como el espectro de la LPFG varia cuando la LPFG es sometida a cambios de temperatura. Para ello, se empleó un esquema experimental como el ilustrado en la Figura 19. En este caso, se empleó una fuente SLED (Exalos, 1520-2111), la cual es empleada para inyectar el haz de luz dentro de la LPFG. Para realizar las variaciones térmicas se empleó una celda Peltier (25 mm x 25 mm, 12V – 4A), la cual a su vez es controlada con una fuente de corriente. Finalmente, la LPFG es empalmada en su extremo de salida a un

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Patch Core y llevada a un analizador de espectros ópticos (Yokogawa, AQ-6370B). Es importante mencionar, que para evitar que se generen errores en la medición, la fibra fue mantenida a tensión constante con la ayuda de unas pesas y un arreglo de poleas, es decir, aislamos mecánicamente nuestra LPFG, con el fin de garantizar que los cambios en las frecuencias de resonancia se den solo por cambios térmicos.

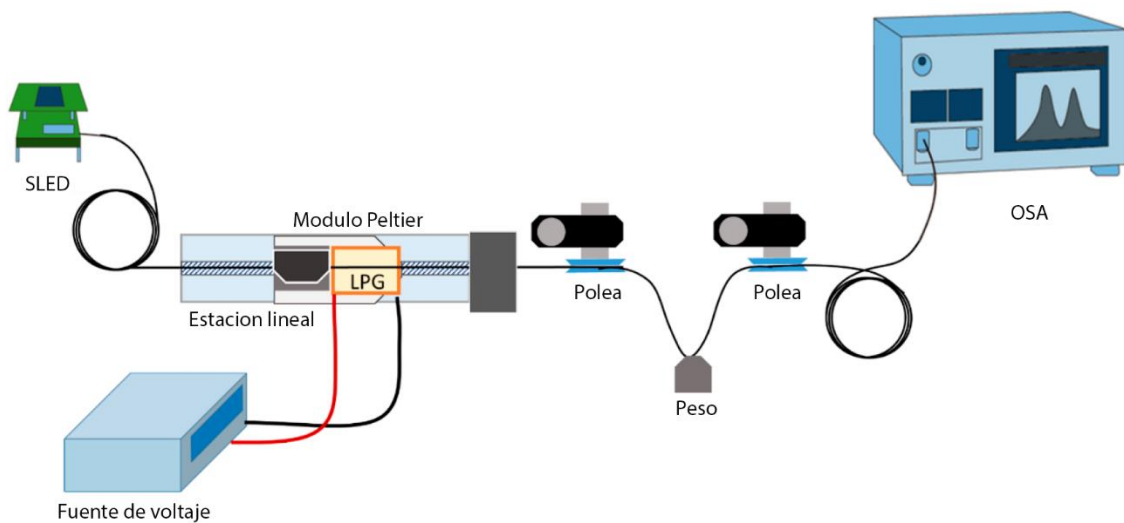


Figura 19. Montaje experimental para la caracterización de temperatura de las redes de periodo largo fabricadas

La Figura 20(a) muestra los espectros de transmisión de la (LPFG) a diferentes valores de temperatura para los modos LP_{03} y LP_{04} . Es evidente que el espectro de transmisión de la LPFG presenta un corrimiento hacia longitudes de onda más largas cuando la temperatura es incrementada de 20°C a 97°C . Adicionalmente, se logra evidenciar como el pico de resonancia correspondiente al modo LP_{03} presenta una caída en el nivel de transmitancia, esto implica que es probable que al cambiar la temperatura se modifica el índice de refracción

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

efectivo del modo del revestimiento, acercándolo más al modo del núcleo, como consecuencia hay mayor acople de energía entre estos. Por otro lado, para el modo LP₀₄ ocurre el efecto inverso. Las Figura 20(b) y 20(c) muestran las curvas de sensibilidad térmica de la LPFG fabricada para los modos LP₀₃ y LP₀₄ respectivamente. De allí, podemos evidenciar que los corrimientos espectrales de ambas resonancias presentan un comportamiento lineal. De hecho, se logra evidenciar que estos modos tienen sensibilidades iguales a 56 pm/°C y 58 pm/°C, para los modos LP₀₃ y LP₀₄, respetivamente. El modo LP₀₃ presenta una mayor sensibilidad que el LP₀₄, el modo LP₀₄ tiene una alta dispersión y una menor repetibilidad. Debido a lo anterior, para futuras aplicaciones como sensor de temperatura es recomendable utilizar el modo de revestimiento LP₀₃ debido a su repetibilidad y estabilidad.

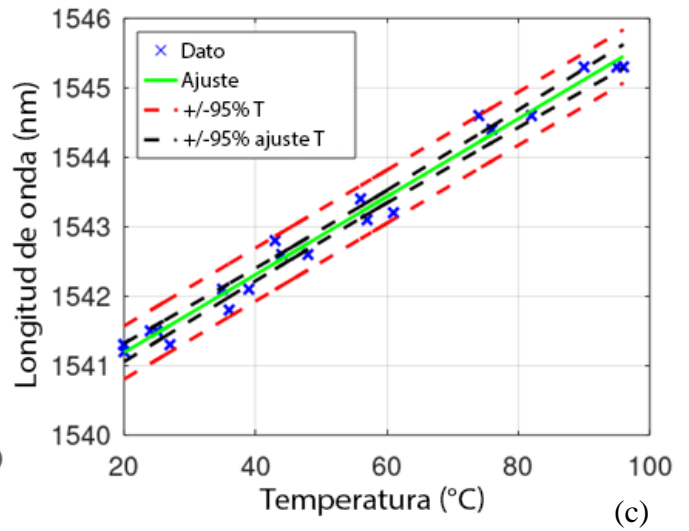
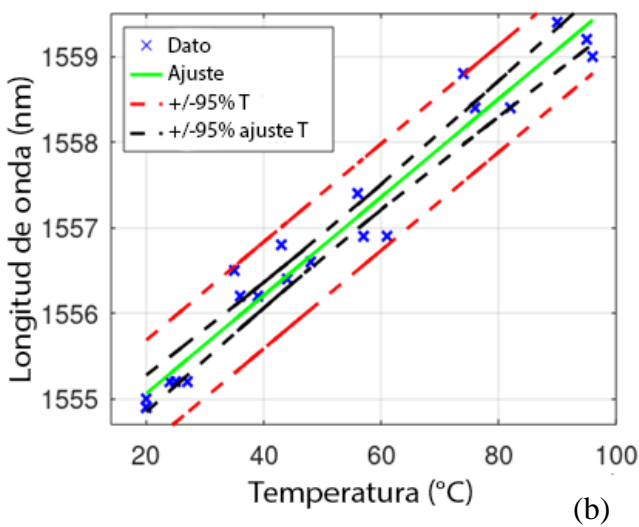
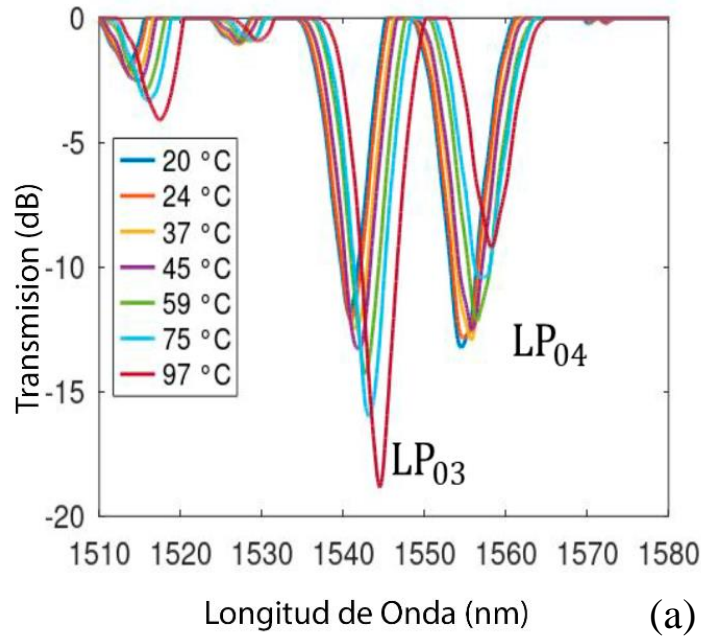


Figura 20. (a) Espectro de transmisión del LPFG fabricado a diferentes temperaturas. (b) Respuesta a la temperatura del modo LP_{03} del LPFG en función de los cambios térmicos. (c) Respuesta de la temperatura del modo LP_{04} del LPFG en función de los cambios térmicos.

Caracterización de tensión

Como es bien conocido, las LPFGs no solo son sensibles a los cambios de temperatura, estas también presentan una alta sensibilidad a los cambios de tensión, es decir, a la deformación. Por esta razón, se caracterizó la LPFG cuando es sometida a cambios de tensión axial entre $5.59 \mu\epsilon$ y $24.82 \mu\epsilon$. Para llevar a cabo este experimento, se implementó un montaje experimental como se ilustra en el esquema de la Figura 21, donde se emplea un contrapeso para evitar las microcurvaturas al momento de la inscripción láser se agregaron diferentes pesos para variar la tensión ejercida sobre la fibra óptica. Como en el caso anterior, la LPFG fue aislada térmicamente usando un disipador, y la temperatura del laboratorio fue mantenida constante a 25°C .

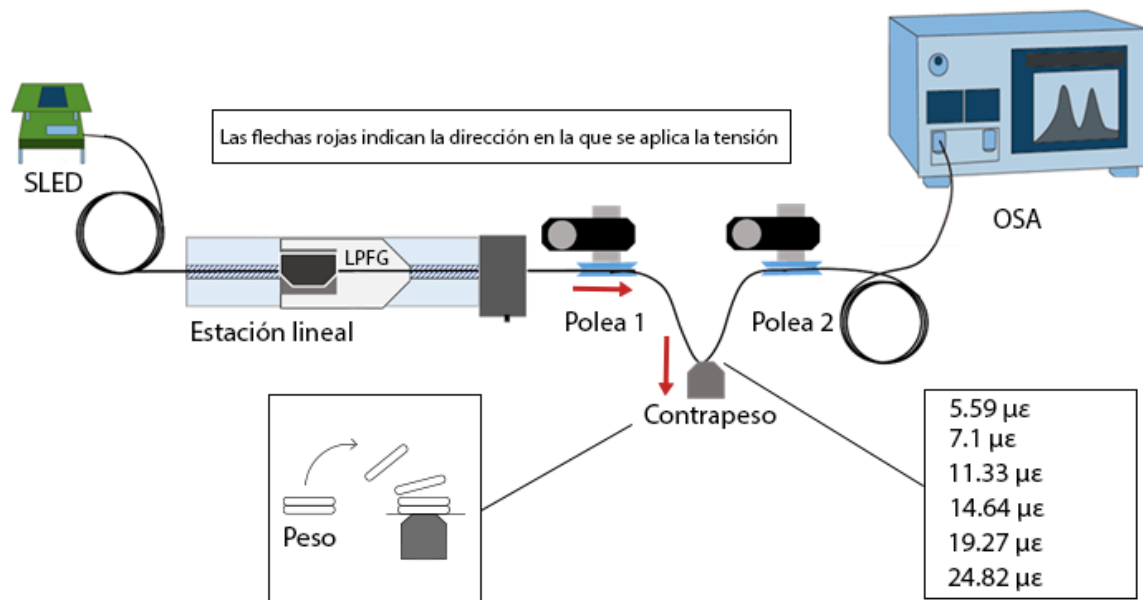


Figura 21. Montaje experimental para la caracterización de la LPFG bajo efectos de tensión axial.

En la Figura 22 (a), se muestra el espectro de transmisión de la LPFG al ser sometida a diferentes tensiones, el cual evidencia un corrimiento del modo LP_{03} hacia longitudes de onda mas largas. La Figura 22(b) muestra la curva de sensibilidad de la LPFG cuando es evaluada a diferentes cambios de tensión axial para el modo LP_{03} , el cual presento una mayor sensibilidad y repetibilidad. De allí, podemos evidenciar que el corrimiento espectral de esta resonancia presenta un comportamiento lineal. De hecho, se logra evidenciar que este tiene una sensibilidad igual a $43 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Las líneas punteadas negra y roja líneas representan el intervalo de cobertura para la curva ajustada y los datos experimentales, respectivamente. La baja sensibilidad a la deformación axial es un efecto de la utilización de altas frecuencias para grabar los redes de periodo largo que causan las mínimas afectaciones físicas sobre la fibra.

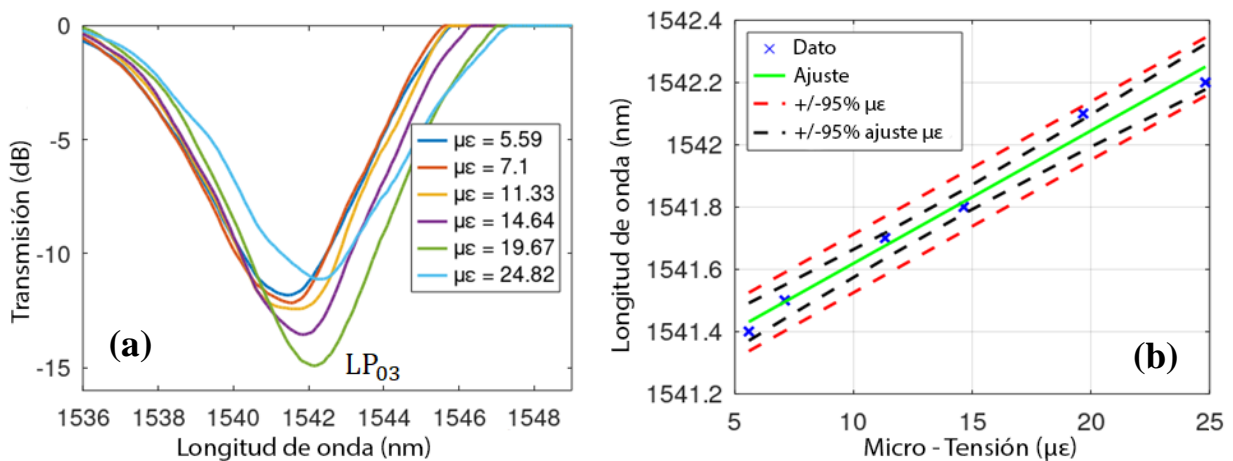


Figura 22. (a) Respuesta espectral a una prueba de micro tensión (b) El desplazamiento de la longitud de onda del modo LP_{03} .

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Conversión modal

En el primer experimento, se realizó un análisis de como los estados de polarización influyen en la respuesta del conversor modal a temperatura constante de 25°C, utilizando el montaje de la Figura 15, el cual cuenta dos polarizadores P1 y P2 montados en celdas giratorias. Inicialmente, se posiciono P1 orientado a 0°, mientras que el analizador P2 fue rotado de 0° a 180° con pasos de 10° respecto a P1; esta prueba se repitió ajustando P1 a 45° y 90°.

Las imágenes de la distribución espacial de los modos obtenidos se presentan en la Figura 23. La primera fila de la Figura 23 muestra los resultados obtenidos cuando P1 permite el paso de la luz a 0°; al situar P2 orientado entre 0° y 40°, se observa que el dispositivo propaga solamente el modo fundamental y no realiza conversión modal. Cuando P2 es orientado entre los 50° y 120°, se empieza acoplar el modo LP₁₁. Al momento de orientar P2 cercano a los 90° con respecto al polarizador P1, se obtiene regiones de alta eficiencia de conversión, esto se debe a que las LPFGs son estructuras asimétricas, lo cual permite el intercambio de energía entre modos con polarizaciones ortogonales. Posteriormente, el acople comienza a decrecer nuevamente, deformándose el modo LP₁₁ hasta volver a obtener el modo LP₀₁ cuando P2 se orienta a 180°.

Este mismo análisis se repitió cuando la luz a la entrada estaba orientada a 45° y 90°, los resultados se evidencian en la segunda y tercera fila de la Figura 23 respectivamente. Se observa, que al orientar P1 a 45°, solo permite el paso del modo fundamental para P2 desde 0° hasta 80° y de 170° hasta 180° sin embargo, al continuar girando P2 se presenta una deformación de este modo, desde los 90° hasta llegar a 160° donde se empieza a notar un perfil de intensidad similar al LP₁₁. Análogamente con el polarizador P1 en 90°, se obtiene

el modo LP_{11} entre las orientaciones de P2 a 130° y 170° , para el resto de las configuraciones, solo deja pasar el modo LP_{01} .

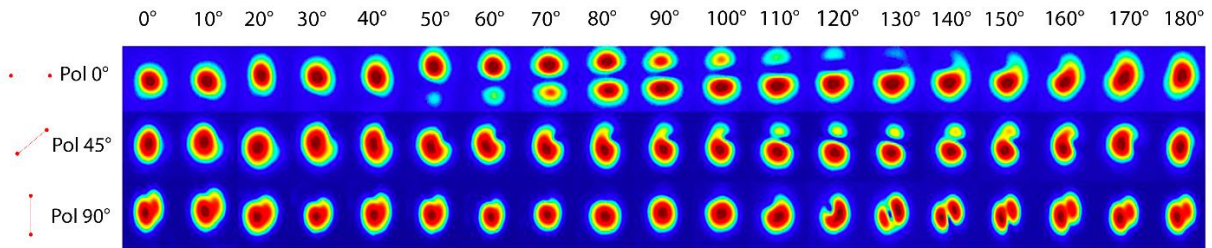


Figura 23. Distribuciones modales sin aplicar ningún tipo de cambio externo en la LPFG a 0° , 45° y 90° . En este caso se hace un análisis de como la polarización afecta el proceso de conversión modal usando LPFGs.

A continuación, se mostrará el mismo procedimiento aplicando temperatura en la LPFG, con el fin de evidenciar estos cambios en la distribución modal, como se muestran en las Figuras 24, 24 y 26. La distribución de los modos obtenida a la salida de la LPFG, depende de factores como la polarización de la luz de entrada, el ángulo de polarización a la salida y la temperatura aplicada.

En la Figura 24 se presentan la distribución espacial de los modos cuando el conversor modal es sometido a cambios térmicos entre 25 y 75°C , mientras la luz a la entrada es polarizada sobre el eje horizontal, es decir, P1 se ubica a 0° con respecto a la horizontal. Se observa que para P2 orientado a 80° y 100° comienza a deformarse el modo y aparece el modo LP_{11} . Además de estudiar el comportamiento del conversor en el eje de polarización de entrada a 0° , se analizó que la LPFG actúa como un buen conversor modal a cambios pequeños de temperatura, ya que algunas de las transiciones entre los modos que se propagan y los que se generan, son a cambios significativos de temperatura y ángulo de polarización de la salida P2, ajustando la polarización entre en 50° y 150° . Así mismo, se logra evidenciar que a través

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

de efectos térmicos es posible inducir un cambio en los modos propagantes, corroborando que se logró construir un conversor modal sintonizable a través de cambios térmicos. Así mismo, se nota que para ciertas combinaciones de temperatura y polarización es más eficiente y rápida la conversión. Por ejemplo, cuando $P1=0^\circ$, y $P2=150^\circ$, solo se requiere un ΔT de 20°C sobre la LPFG para pasar del modo LP_{01} al LP_{11} . Por otro lado, cuando $P1=0^\circ$, y $P2=50^\circ$, en la cual se requiere un ΔT de 50°C sobre la LPFG para lograr la transición deseada, mientras que en algunos casos no se logra dar la conversión modal en el rango de estudio.

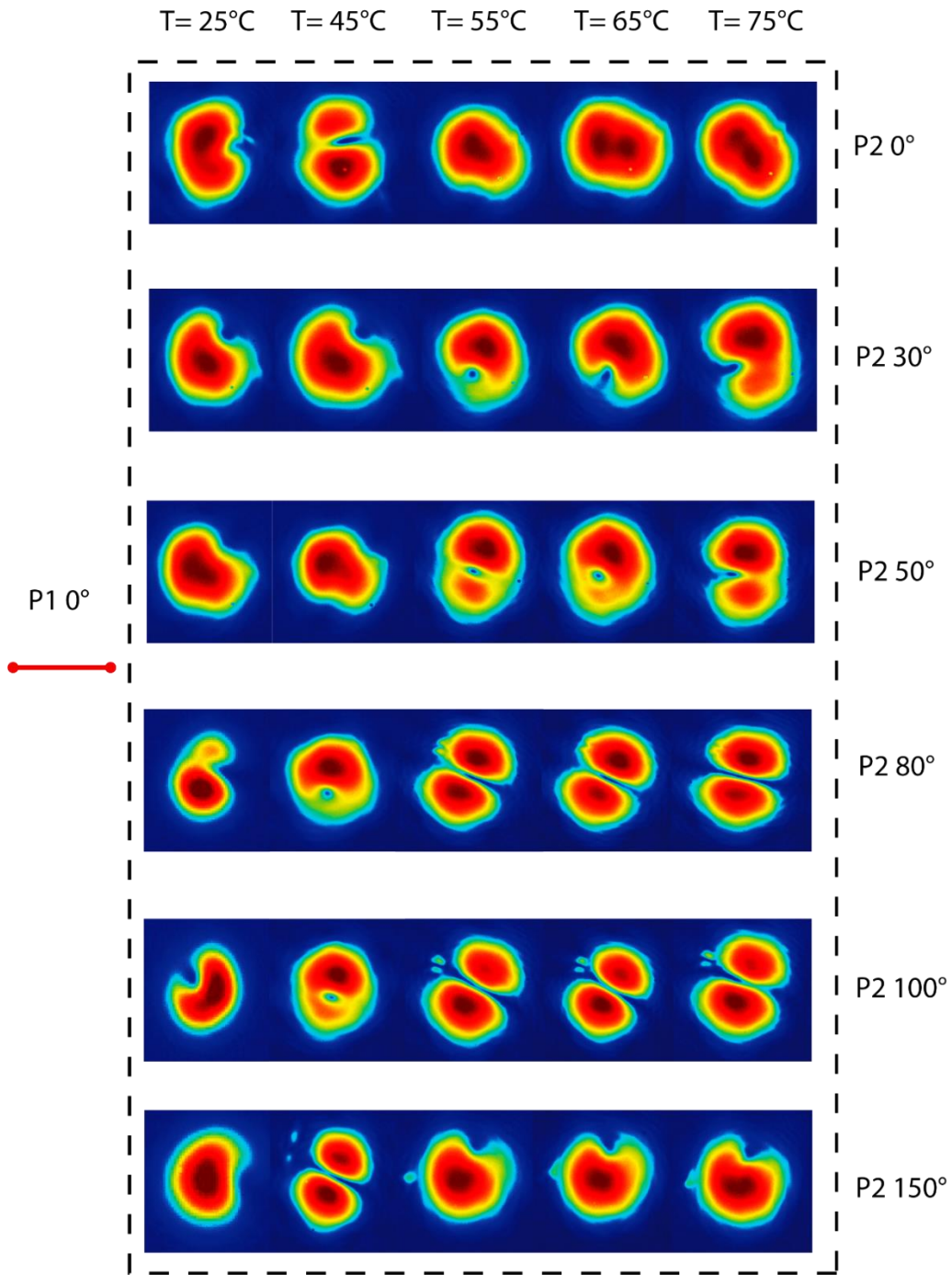


Figura 24. Distribuciones modales aplicando temperatura a la LPFG con polarización de entrada P1 a 0° y a distintos ángulos del polarizador de salida P2

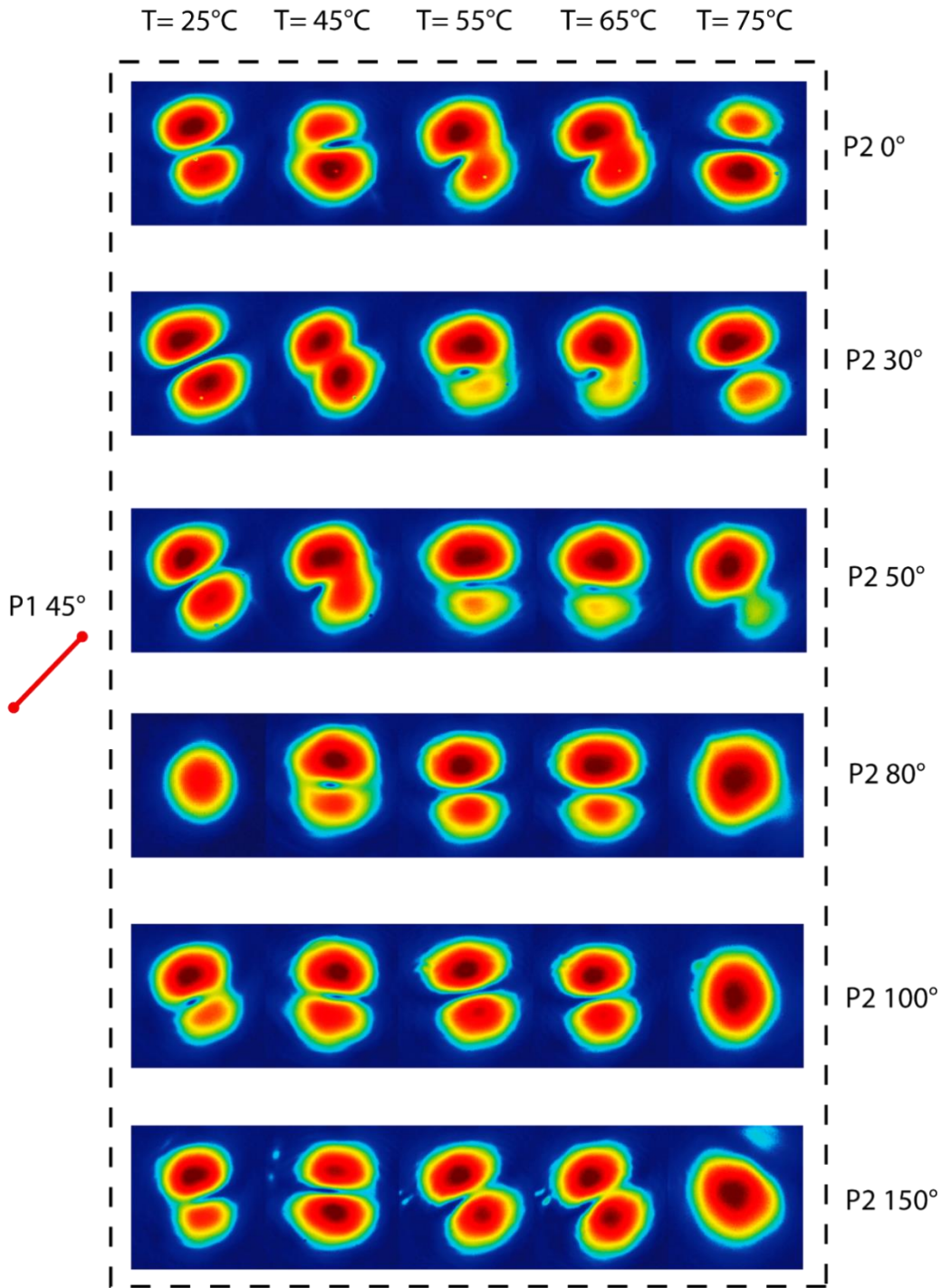


Figura 25. Distribuciones modales aplicando temperatura a la LPFG con polarización de entrada P1 a 45° y a distintos ángulos del polarizador de salida P2

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

La Figura 25 muestra la distribución espacial de los modos, cuando la luz a la entrada esta linealmente polarizada a 45° con respecto a la horizontal. En la primera columna se ilustran los registros a una temperatura de 25°C , la cual es la temperatura ambiente en el momento de realizar las mediciones. Como se logra apreciar, modo a la entrada es el LP_{11} , en 0° , 30° , 50° , 100° y 150° debido a que la red de periodo largo no ha sido sometida a cambios temperatura, al momento de comenzar a aplicar cambios graduales en la temperatura y rotar los ángulos del polarizador P2, se deforma este modo y en algunos ángulos se logra transferir más energía al modo fundamental.

Al orientar el polarizador P2 a 80° se logran los mejores resultados de conversión modal. De hecho, en este caso particular se evidencia que el modo fundamental es excitado a $T=25^\circ\text{C}$, pero se empieza a dar la conversión al modo LP_{11} desde $T=45^\circ\text{C}$, sin embargo, la mejor conversión se logra cuando la LPFG ha sido sometida a una temperatura de 55°C . Posteriormente, se logra volver al modo fundamental cuando la temperatura alcanza un valor igual a 75°C . Otros casos, en los cuales se evidencia el proceso de conversión es cuando el analizador (P2) se orienta a 100° y a 150° . Por otro lado, hay varios casos en los cuales se evidencia la excitación de los modos LP_{11} y LP_{01} , pero la conversión modal no se alcanza a evidenciar de forma clara, como por ejemplo cuando P2 se orienta a 0° , 30° , y 50° . Lo interesante en esta polarización de entrada a 45° , es que en comparación con los resultados arrojados por el conversor cuando P1 estaba orientado a 0° , se puede ver que el conversor es altamente sensible, sintonizable en la mayoría de sus ángulos de salida cuando se genera la transición del modo LP_{01} , al modo LP_{11} .

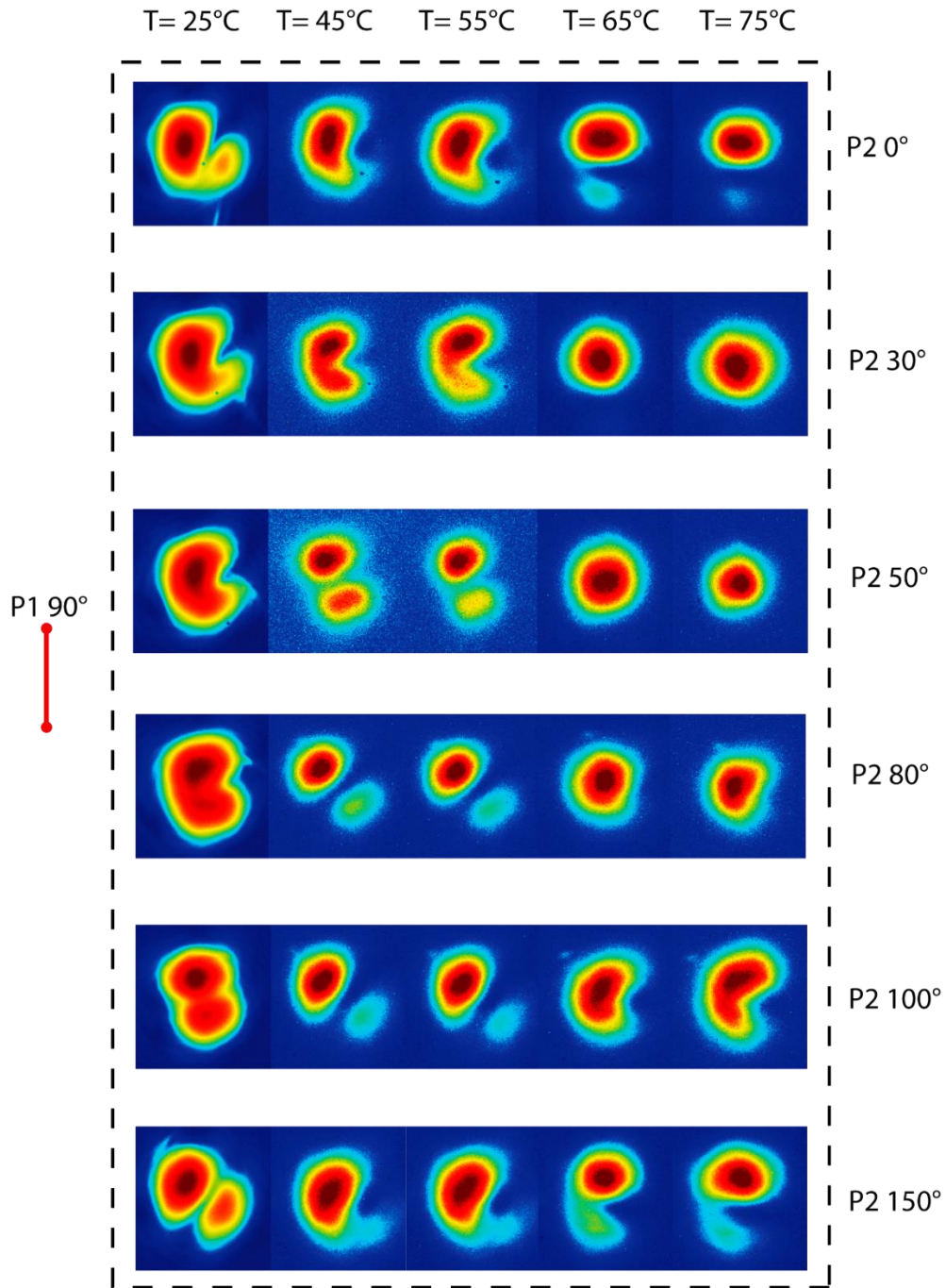


Figura 26. Distribuciones modales aplicando temperatura a la LPFG con polarización de entrada P1 a 90° y a distintos ángulos del polarizador de salida P2

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

Finalmente, la Figura 26 muestra otro caso experimental, donde se quiere analizar el comportamiento del conversor con la polarización de entrada a 90° . Conforme a lo anterior, el procedimiento es igual, tomando como base que los cambios y aumentos de temperatura son los mismos como en las Figuras 23 y 24, en este caso, la conversión que se genera al realizar los cambios de temperatura no es muy visible, y se evidencia la temperatura 45°C y 55°C se pierde mucha potencia por lo que el modo se atenúa bastante. En las siguientes variaciones de temperatura se observa que solo permite formar el modo fundamental LP_{01}

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se caracterizó una configuración de grabado de redes de periodo largo en fibra óptica (LPFGs) basado en la técnica de laser de CO₂ para garantizar los requisitos de repetibilidad y reproducibilidad. Así mismo, se logró comprobar las características físicas de los grabados con la colaboración del Instituto Nacional de Metrología, específicamente se empleó un Mitutoyo Quickscope, el cual nos permitió confirmar el periodo de grabación de las LPFG, la anchura de la superficie del punto grabado y la profundidad de penetración. Con ello, se evidenció que el montaje experimental nos permite llegar a obtener un periodo deseado y con un error mínimo. Por su parte, la anchura y la profundidad de cada punto de grabado en la ablación del material se utiliza para comprobar la uniformidad del daño laser causado en la fibra, obteniendo valores cercanos a los reportados en la literatura

Adicionalmente, se demostró experimentalmente la viabilidad de las aplicaciones de las LPFG como sensores de tensión y temperatura. Así, cuando se investigaron los modos de revestimiento LP₀₃ y LP₀₄, los resultados muestran que las LPFG construidos pueden utilizarse para detectar cambios de temperatura con sensibilidades optimas y comparables con las reportadas en la literatura. Por otro lado, las LPFGs fabricación fueron empleadas en la medición de tensión axial, logrado unas sensibilidades muy estables.

Una vez fabricadas las LPFGs, y evidenciado que su respuesta óptica puede ser sintonizada con variaciones de temperatura o presión, estas fueron empleadas en la construcción de un conversor modal óptico sintonizable. Para lograrlo, se realizó la grabación de una LPFG en

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

una fibra óptica de pocos modos y se realizó la caracterización de dicho conversor a 980 nm, evidenciando que la respuesta de dicho conversor depende fuertemente de la polarización de la luz a la entrada. Así mismo, se demostró que, empleando un analizador a la salida, se puede descomponer la luz y por ende filtrar y dejar pasar un modo deseado. Finalmente, se evidencio de forma experimental que es posible lograr sintonizar la respuesta de dicho conversor modal a través de cambios de temperatura, pues la excitación de los modos propagantes cambia con este parámetro externo.

Lo anterior, abre la puerta a desarrollar sistemas de multiplexación por división espacial sintonizables, los cuales pueden ser empleados para la construcción e implementación de redes ópticas flexibles, es decir, redes que puedan ser adaptadas por las empresas prestadoras de servicio según las necesidades de los usuarios. Así mismo, este trabajo se convierte en la base para desarrollar nuevas técnicas de multiplexación que en un futuro permitan incrementar las tasas de transmisión de información a través de las redes ópticas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

REFERENCIAS

- Abellán, D. P., Ramos Pascual, F., & Capmany Francoy, J. (2007). *Sistemas de comunicaciones ópticas*. 307. <http://books.google.com/books?id=zhFu4jZ1h4oC&pgis=1>
- Alejandro Carballar Rincón. (1999). *ESTUDIO DE REDES DE DIFRACCIÓN EN FIBRA PARA SU APLICACIÓN EN COMUNICACIONES ÓPTICAS*.
- B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang, and H. J. S. (1987). Use of highly elliptical core fibers for two-mode fiber devices. *IEEE Photonics Journal*, 12.
- Botero Valencia, J., Castaño Londoño, L., & Marquez Viloria, D. (2019). Trends in the Internet of Things. *Tecnológicas*, 22(44), I-II. <https://doi.org/10.22430/22565337.1241>
- Byron, K. (1984). Optical Waveguide Theory. In *Physics Bulletin* (Vol. 35, Issue 9). <https://doi.org/10.1088/0031-9112/35/9/029>
- Camilo, J., & Aristizabal, V. (2020). *Desarrollo de conversor modal sintonizable controlado por esfuerzos laterales en una fibra birrefringente*. June. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20126.15685>
- Cardona, J. A. M., Cardona, N. D. G., Valencia, E. G., Trujillo, P. T., & Vera, E. R. (2020). Tunable mode converter device based on photonic crystal fiber with a thermo-responsive liquid crystal core. *Photonics*, 7(1). <https://doi.org/10.3390/PHOTONICS7010003>
- Erdogan, T. (1997). Fiber grating spectra. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8). <https://doi.org/10.1109/50.618322>
- Eugene Hecht. (2000). *OPTICA* (Nuñez de Balboa, Ed.; 3rd ed.).
- Fedor Mitschke. (2009). Fiber Optics Physics and Technology. In *Optics Communications* (Vol. 80, Issue 1). [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(90\)90498-I](https://doi.org/10.1016/0030-4018(90)90498-I)
- Fleming, J. W. (2002). *Dispersion in GeO₂-SiO₂ glasses*. 8.
- Ghatak, A., & Thyagarajan, K. (2013). Single-mode optical fiber sensors. In *Introduction to fiber optics* (pp. 397–410). <https://doi.org/10.1017/cbo9781139174770.019>
- Grado, T. D. E. (2019). *Fabricación y caracterización de redes de periodo largo*.
- Guo, Y., Liu, Y. ge, Wang, Z., Zhang, H., Mao, B., Huang, W., & Li, Z. (2019). More than 110-nm broadband mode converter based on dual-resonance coupling mechanism in long period fiber gratings. *Optics and Laser Technology*, 118, 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.039>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Ignacio Flores Llamas, En, Y. D., Las, S. D. E., Periodo, R. D. E., En, L., Por, O., Un, M. D. E., Genetico, A., Ingenieria, D. E. N., & Llamas, I. F. (2007). *SINTESIS DE LAS REJILLAS DE PERIODO LARGO EN FIBRA OPTICA POR MEDIO DE UN ALGORITMO GENETICO*.
- Imas, J. J., Zamarreño, C. R., Villar, I. del, & Matías, I. R. (2021). Optimization of fiber bragg gratings inscribed in thin films deposited on d-shaped optical fibers. *Sensors*, 21(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21124056>
- Laboratorio de Comunicaciones Ópticas –Dpto. Tecnología Fotónica. (2014). *Fibras Ópticas*. 16, 16–24.
- Lin, C. Y., Wang, L. A., & Wang, L. A. (2000). Corrugated long period fiber gratings as band-rejection filters. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, 1(1), 20–22. <https://doi.org/10.1109/ofc.2000.868359>
- Liu, L., Wang, M., Xi, X., & Wang, Z. (2018). Mode Converters Based on LPFGs at 1 μ m. In *2018 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, CLEO-PR 2018*.
- Liu, Z., Zhao, X., Mou, C., & Liu, Y. (2020). Mode Selective Conversion Enabled by the Long-Period Gratings Inscribed in Elliptical Core Few-Mode Fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 38(6), 1536–1542. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.2968134>
- Maksimović, M. (2017). The roles of nanotechnology and internet of nano things in healthcare transformation. *TecnoLógicas*, 20(40), 139–153. <https://doi.org/10.22430/22565337.720>
- Meltz, G., Morey, W. W., & Glenn, W. H. (1989). Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters*, 14(15), 823. <https://doi.org/10.1364/ol.14.000823>
- Montoya, J. A., Gomez, N., & Valencia, E. (2017). Tuneable liquid crystal asymmetric dual-core photonic crystal fiber mode converter. *Universidad Nacional de Colombia, Colombia Universidad, March*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1547/1/012008>
- Nanza, E. (2009). *Revision y analisis experimental de modos LP nm en fibras opticas*. 55(1), 15–20.
- Reyes-Vera, E., Senior, D. E., Luna-Rivera, J. M., & López-Giraldo, F. E. (2018). Advances in electromagnetic applications and communications. *TecnoLógicas*, 21(43), 9–13. <https://doi.org/10.22430/22565337.1052>
- Reyes-Vera, E., Úsuga, J., Acevedo-Echeverry, J., Gómez-Cardona, N., & Varón, M. (2017). Performance analysis of a modal converter based on an asymmetric dual-core photonic crystal fiber. *Optica Pura y Aplicada*, 50(3), 251–257. <https://doi.org/10.7149/OPA.50.3.49023>

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

- Reyes-Vera, E., Úsuga, J., Gómez-Cardona, N., & Varón, M. (2016). Mode selective coupler based in a dual-core photonic crystal fiber with non-identical cores for spatial mode conversion. *Optics InfoBase Conference Papers, April 2018*, 1–4. <https://doi.org/10.1364/LAOP.2016.LTu3C.1>
- Rojas, J. F., Valencia, S., Montoya-Cardona, J. A., Galvis, J. L., & Gomez-Cardona, N. D. (2020). Long-period fiber grating sensors fabrication at high-frequency carbon dioxide laser pulses. *Journal of Physics: Conference Series*, 1547(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1547/1/012005>
- Stancălie, A., Esposito, F., Ranjan, R., Bleotu, P., Campopiano, S., Iadicco, A., & Sporea, D. (2017). Arc-induced Long Period Gratings in standard and speciality optical fibers under mixed neutron-gamma irradiation. *Scientific Reports*, 7(1), 2–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16225-4>
- Thomson, D., Zilkie, A., & Bowers, J. E. (2016). Roadmap of optical communications. *Journal of Optics*, 18, 0–40. <https://doi.org/10.1088/2040-8978/18/6/063002>
- Valencia, S., Vera, E., Galvis, J., Montoya, J., & Cardona, N. (2022). Metrological Characterization of a CO2 Laser-Based System for Inscribing Long-Period Gratings in Optical Fibers. *MDPI*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/instruments6040079>
- Vera, E. R. (2019). *Few-mode photonic crystal fibers for mode-converter devices and sensing applications Mode Multiplexer based on Few-Mode Photonic Crystal Fibers View project Micro-fabrication of antennas and microwave filters in flexible materials and electromagnetic Metamaterials View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28701.05607>
- Wu, C., Liu, Z., Chung, K. M., Tse, M. L. V., Chan, F. Y. M., Lau, A. P. T., Lu, C., & Tam, H. Y. (2012). Strong LP 01 and LP 11 mutual coupling conversion in a two-mode fiber Bragg grating. *IEEE Photonics Journal*, 4(4), 1080–1086. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2012.2204735>
- Zhang, X., Wang, A., Chen, R., Zhou, Y., Ming, H., & Zhan, Q. (2016). Generation and Conversion of Higher Order Optical Vortices in Optical Fiber with Helical Fiber Bragg Gratings. *Journal of Lightwave Technology*, 34(10), 2413–2418. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2536037>
- Zhao, X., Liu, Y., Liu, Z., Zhao, Y., Wang, T., Shen, L., & Chen, S. (2017). Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the six-mode fiber. *ICOON 2017 - 16th International Conference on Optical Communications and Networks, 2017-Janua*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICOON.2017.8121432>
- Zhao, Y., Liu, Y., Zhang, L., Zhang, C., Wen, J., & Wang, T. (2016). Mode converter based on the long-period fiber gratings written in the two-mode fiber. *Optics Express*, 24(6), 6186. <https://doi.org/10.1364/oe.24.006186>

 Institución Universitaria	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

	INFORME FINAL TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	04
		Fecha	24-02-2020

FIRMA ESTUDIANTES Sebastian Valencia G.

FIRMA ASESORES Erick Reyes Vera

Juan Sebastian Soto

FECHA ENTREGA: 18/10/2022