

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática
y de Telecomunicación

Diseño e implementación de láseres de fibra óptica basados en reflectores pseudoaleatorios cuasidistribuidos



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Autor: Miguel Durán Escudero

Directora: Rosa Ana Pérez Herrera

Pamplona, 8 de Junio de 2022

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa



Resumen

Con la llegada de la cuarta revolución industrial y, tras las nuevas necesidades emergentes, inherentes al desarrollo cultural y tecnológico, los láseres de fibra óptica se encuentran actualmente en auge. Es por ello que interés ha aumentado y constituye una línea de investigación muy importante en la actualidad.

El presente Trabajo de Fin de Grado, ha sido realizado durante el curso 2021-22 en el laboratorio Fotónica-Teralab, perteneciente al departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de Comunicación de la Universidad Pública de Navarra.

El estudiante de Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación, Miguel Durán Escudero ha dividido este trabajo en tres temas principales.

En primer lugar, se han caracterizado una gran variedad de reflectores basados en tramos de fibras microinscritas o microperforadas (MDF según sus siglas en inglés) así como microcavidades. Seguidamente se ha diseñado y demostrado experimentalmente un láser de cavidad lineal cuyo reflector está compuesto por una estructura en serie de dos tramos de MDF. Posteriormente, dicho reflector del láser ha sido puesto a prueba como sensor ante temperatura y elongación transversal (*strain*) y comparado con sensibilidades de otros sensores.

En segundo lugar, se ha optimizado el proceso de fabricación de las estructuras de microcavidad, consiguiendo así una mejora en la calidad y reduciendo significativamente el tiempo requerido para su fabricación.

Por último, se ha diseñado y fabricado un tensor de fibra óptica para la realización de medidas de microstrain de una forma no invasiva, veloz y efectiva.



Abstract

With the arrival of the fourth industrial revolution and, following the new emerging needs inherent to cultural and technological development, fiber optic lasers are currently on the rise. This is why interest has increased and constitutes a very important line of research at present.

This work was carried out during the 2021-22 academic year in the Photonics-Teralab laboratory, belonging to the Department of Electrical Engineering and Communication Electronics of the Public University of Navarra.

Miguel Durán Escudero, student of Telecommunication Technologies Engineering, has divided this work into three main topics.

Firstly, a wide variety of reflectors based on stretches of micro-inscribed or micro-drilled fibers (MDF) and microcavities have been characterized. Next, a linear cavity laser has been designed and experimentally demonstrated whose reflector is composed of a series structure of two MDF sections. Subsequently, this laser reflector has been tested as a sensor for temperature and transverse elongation (strain) and compared with the sensitivities of other sensors.

Secondly, the manufacturing process of the micro-cavity structures has been optimized, thus achieving an improvement in quality and significantly reducing the time required for their manufacture.

Finally, a fiber optic tensor has been designed and manufactured for non-invasive, fast and effective micro-strain measurements.

Palabras clave

- Sensor de fibra óptica
- Láser de fibra óptica
- Reflector basado en una microcavidad
- Reflector basado en MDF (*Micro Drilled Fiber*)



Índice

Resumen	1
Abstract.....	2
Palabras clave	2
Índice de ilustraciones	6
Índice de tablas	9
Capítulo 1: Marco teórico.....	1
1.1. Fibra óptica.....	1
1.1.1. Tipos de fibra óptica	3
1.1.2. Fundamentos físicos de la fibra óptica	4
1.1.3. Efectos lineales	7
1.2. Amplificación óptica	9
1.2.1. Amplificadores ópticos basados en emisión estimulada mediante fibras dopadas con tierras raras.....	10
1.3. Láser de fibra óptica.....	13
1.3.1. Topologías.....	14
1.4. Sensores ópticos basados en láseres de fibra óptica	15
1.4.1. Sensores basados en reflectores aleatorios.....	15
1.4.2. Sensores basados en cavidades.....	16
1.4.3. Sensores basados en otros tipos de reflectores	18
Capítulo 2: Instrumentación.....	20
2.1. Elementos ópticos	20
2.1.1. Multiplexor por división en longitud de onda (WDM)	20
2.1.2. Fibra dopada con erbio	21
2.1.3. Acoplador óptico.....	21
2.1.4. Circulador óptico	22
2.1.5. Atenuador óptico	22
2.1.6. Controlador de polarización.....	23
2.1.7. Herramientas para trabajar con la fibra óptica	23
2.2. Herramientas de caracterización	24
2.2.1. Analizador de espectro óptico (OSA).....	24
2.2.2. Analizador espectros ópticos alta resolución (BOSA).....	24
2.2.3. Reflectómetro óptico (OBR)	24
2.2.4. Cámara climática.....	25



2.2.5. Microposicionador y presas de fibra óptica.....	25
Capítulo 3: Reflectores.....	26
3.1. Fabricación de microcavidades.....	26
3.1.1. Materiales.....	26
3.1.2. Método de fabricación.....	26
3.2. Fibras microperforadas (MDF).....	31
3.2.1. Método de fabricación.....	31
Capítulo 4: Caracterización de los reflectores.....	32
4.1. Caracterización de reflectores basados en MDF.....	32
4.1.1. Reflector MDF1.....	33
4.1.2. Reflector MDF2.....	33
4.1.3. Reflector MDF3.....	34
4.1.4. Reflector MDF4.....	34
4.1.5. Comentarios.....	35
4.2. Caracterización de reflectores basados en estructuras aleatorias MDF en línea.....	35
4.2.1. Reflector doble.....	35
4.2.2. Comentarios.....	36
4.3. Caracterización de reflectores basados en microcavidades.....	36
4.3.1. Reflector 52.8.....	37
4.3.2. Reflector 55.....	39
4.3.3. Reflector 66.....	41
4.3.4. Reflector basado en una microcavidad de EDF.....	43
4.3.5. Comentarios.....	43
Capítulo 5: Láseres y sensores basados en MDF.....	45
5.1. Selección de los reflectores basados en MDF.....	45
5.2. Diseño y montaje de la cavidad lineal del láser.....	46
5.2.1. Diseño de la configuración del amplificador.....	46
5.2.2. Diseño de las configuraciones de la cavidad láser.....	47
5.3. Caracterización de los láseres generados.....	50
5.3.1. Cavidad láser con un reflector doble.....	50
5.3.2. Láser con microcavidad de EDF.....	54
5.3.3. Láser con reflector MDF2.....	57
5.3.4. Comparativa de resultados.....	58
5.4. Caracterización del reflector doble empleado como sensor.....	59
5.4.1. Mejora del diseño de la configuración láser.....	60



5.4.2. Caracterización del sensor ante temperatura y estiramiento	67
5.4.3. Prototipo de caracterización de μ strain y software de lectura para OSA en Matlab	70
Capítulo 6: Conclusiones	73
6.1. Diseño y fabricación de presa de agarre	73
6.2. Fabricación de microcavidades	73
6.3. Sensor fibra óptica basado en reflectores pseudoaleatorios y cuasidistribuidos	74
6.4. Líneas futuras	75
Referencias y bibliografía	76
Anexo 1: Código en Matlab de lector de archivos .csv	79
Anexo 2: Planos e indicaciones de diseño.....	82

Índice de ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: TRANSMISIÓN DE LUZ A TRAVÉS DE UN FLUIDO [1]	1
ILUSTRACIÓN 2: ESTRUCTURA BÁSICA DE UNA FIBRA ÓPTICA [2]	2
ILUSTRACIÓN 3: LEY DE SNELL SOBRE EL ÁNGULO CRÍTICO [3].....	3
ILUSTRACIÓN 4: DIFERENCIA DE DIMENSIONES DE FIBRAS MONOMODO Y MULTIMODO [3]	3
ILUSTRACIÓN 5: DISTINTOS TIPOS DE FIBRA SEGÚN SU EVOLUCIÓN DEL ÍNDICE DE REFRACCIÓN [4].....	4
ILUSTRACIÓN 6: MODELO DE BANDAS DE ENERGÍA [FIGURA REALIZADA POR EL AUTOR]	5
ILUSTRACIÓN 7: FENÓMENO DE ABSORCIÓN [3]	6
ILUSTRACIÓN 8: FENÓMENO DE EMISIÓN ESPONTÁNEA [3]	6
ILUSTRACIÓN 9: FENÓMENO DE EMISIÓN ESTIMULADA [3]	6
ILUSTRACIÓN 10: ATENUACIÓN EN FIBRA ÓPTICA DE SÍLICE [5]	8
ILUSTRACIÓN 11: DISPERSIÓN INTERMODAL [6]	8
ILUSTRACIÓN 12: DISPERSIÓN CROMÁTICA [6].....	9
ILUSTRACIÓN 13: DISPERSIÓN POR MODO DE POLARIZACIÓN [6]	9
ILUSTRACIÓN 14: ESQUEMA BÁSICO DE UN AMPLIFICADOR ÓPTICO [7]	10
ILUSTRACIÓN 15: ESQUEMA AMPLIFICADOR BASADO EN FIBRA DOPADA [8]	10
ILUSTRACIÓN 16: DIAGRAMA DE LOS NIVELES DE ENERGÍA DE UN ION DE ERBIO [9]	11
ILUSTRACIÓN 17: EMISIÓN ESPONTÁNEA AMPLIFICADA (ASE: <i>AMPLIFIED SPONTANEOUS EMISSION</i>) DE UNA FIBRA DOPADA CON ERBIO [10].....	12
ILUSTRACIÓN 18: ESQUEMA DE UN AMPLIFICADOR BASADO EN SEMICONDUCTOR (SOA: <i>SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER</i>) [11].....	12
ILUSTRACIÓN 19: RETRODISPERSIÓN (<i>BACKSCATTERING</i>) PRODUCIDA EN FIBRA ÓPTICA [12]	12
ILUSTRACIÓN 20: ESQUEMA BÁSICO DE UN LÁSER DE CAVIDAD LINEAL [9]	14
ILUSTRACIÓN 21: ESQUEMA BÁSICO DE UN LÁSER DE CAVIDAD EN ANILLO [9].....	14
ILUSTRACIÓN 22: ESQUEMA BÁSICO DE UN LÁSER CONVENCIONAL FRENTE AL ESQUEMA BÁSICO DE UN LÁSER ALEATORIO O <i>RANDOM</i> [14]	15
ILUSTRACIÓN 23: IMAGEN MICROSCÓPICA DE UNA FIBRA MICRO INSCRITA.	16
ILUSTRACIÓN 24: MICROCAVIDADES CON DISTINTAS LONGITUDES [16].....	17
ILUSTRACIÓN 25: FUNCIONAMIENTO DE UNA RED DE DIFRACCIÓN DE BRAGG COMO REFLECTOR [22]	19
ILUSTRACIÓN 26: FUNCIONAMIENTO DE UNA RED DE DIFRACCIÓN DE BRAGG COMO SENSOR DE STRAIN [22]	19
ILUSTRACIÓN 27: FUNCIONAMIENTO DE UNA CAVIDAD FABRY-PEROT [3]	19
ILUSTRACIÓN 28: MULTIPLEXOR WDM / DEMULTIPLEXOR WDM [23].....	20
ILUSTRACIÓN 29: FOTOGRAFÍA DE UNA FIBRA DOPADA CON ERBIO [24]	21
ILUSTRACIÓN 30: COMBINADOR Y SEPARADOR ÓPTICO [2]	21
ILUSTRACIÓN 31: ESQUEMA DE UN <i>ADD/DROPP</i> BASADOS EN DOS CIRCULADORES DE TRES PUERTOS CONECTADOS ENTRE SÍ [25]	22
ILUSTRACIÓN 32: CONTROLADOR DE POLARIZACIÓN [26].....	23
ILUSTRACIÓN 33: ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICO (OSA) [28]	24
ILUSTRACIÓN 34: OBR 4600 DE LUNA [31].....	25
ILUSTRACIÓN 35: IMAGEN DEL SISTEMA DISEÑADO PARA LA SUJECIÓN DE LOS SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.....	25
ILUSTRACIÓN 36: FOTOGRAFÍA DE UNA FUSIÓN DE FIBRA SMF (DERECHA) Y FIBRA HCF (IZQUIERDA)	27
ILUSTRACIÓN 37: IMAGEN DE UNA FUSIÓN ENTRE HCF Y SMF TOMADA MEDIANTE LA CÁMARA DEL EQUIPO DE FABRICACIÓN DE FIBRAS ESTRECHAS [27].....	29
ILUSTRACIÓN 38: IMAGEN QUE MUESTRA EL CORTE DE LA FIBRA MEDIANTE EL EQUIPO DE FABRICACIÓN DE FIBRAS ESTRECHAS [27]	29
ILUSTRACIÓN 39: ÚLTIMA FUSIÓN MOSTRADA A TRAVÉS DEL MICROSCOPIO DE LA FUSIONADORA	30



ILUSTRACIÓN 40: FOTOGRAFÍA DE UN REFLECTOR DISTRIBUIDO DE FORMA CASI ALEATORIA A LO LARGO DEL NÚCLEO DE UNA FIBRA ESTRECHADA	31
ILUSTRACIÓN 41: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA IZQUIERDA Y DERECHA RESPECTIVAMENTE DEL REFLECTOR "MDF1"	33
ILUSTRACIÓN 42: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA IZQUIERDA Y DERECHA RESPECTIVAMENTE DEL REFLECTOR "MDF2"	33
ILUSTRACIÓN 43: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA IZQUIERDA Y DERECHA RESPECTIVAMENTE DEL REFLECTOR "MDF3"	34
ILUSTRACIÓN 44: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA IZQUIERDA Y DERECHA RESPECTIVAMENTE DEL REFLECTOR "MDF4"	34
ILUSTRACIÓN 45: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA IZQUIERDA Y AMPLIACIÓN DE LOS DOS PICOS DE IZQUIERDA A DERECHA DEL REFLECTOR DOBLE	35
ILUSTRACIÓN 46: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE LA ENTRADA DERECHA Y AMPLIACIÓN DE LOS DOS PICOS DE IZQUIERDA A DERECHA DEL REFLECTOR DOBLE	36
ILUSTRACIÓN 47: REFLEXIÓN DE "REFLECTOR 52,8" CAVIDAD CORTA	37
ILUSTRACIÓN 48: PÉRDIDAS DE RETORNO DE "REFLECTOR 52,8" CAVIDAD CORTA	37
ILUSTRACIÓN 49: FOTOGRAFÍA DE "REFLECTOR 52,8" CORTA	38
ILUSTRACIÓN 50: REFLEXIÓN DE " REFLECTOR 52,8" CAVIDAD LARGA	38
ILUSTRACIÓN 51: PÉRDIDAS DE RETORNO DE "REFLECTOR 52,8", CAVIDAD LARGA	38
ILUSTRACIÓN 52: FOTOGRAFÍA DE " REFLECTOR 52,8" CAVIDAD LARGA	39
ILUSTRACIÓN 53: REFLEXIÓN DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD CORTA	39
ILUSTRACIÓN 54: PÉRDIDAS DE RETORNO DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD CORTA	39
ILUSTRACIÓN 55: FOTOGRAFÍA DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD CORTA	40
ILUSTRACIÓN 56: REFLEXIÓN DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD LARGA	40
ILUSTRACIÓN 57: PÉRDIDAS DE RETORNO DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD LARGA	40
ILUSTRACIÓN 58: FOTOGRAFÍA DE " REFLECTOR 55" CAVIDAD LARGA	41
ILUSTRACIÓN 59: REFLEXIÓN DE " REFLECTOR 66" CAVIDAD CORTA	41
ILUSTRACIÓN 60: PÉRDIDAS DE RETORNO DE "REFLECTOR 66" CAVIDAD CORTA	41
ILUSTRACIÓN 61: FOTOGRAFÍA DE "REFLECTOR 66" CAVIDAD CORTA	42
ILUSTRACIÓN 62: REFLEXIÓN DE "REFLECTOR 66" CAVIDAD LARGA	42
ILUSTRACIÓN 63: PÉRDIDAS DE RETORNO DE "REFLECTOR 66" CAVIDAD LARGA	42
ILUSTRACIÓN 64: FOTOGRAFÍA DE "REFLECTOR 66" CAVIDAD LARGA	43
ILUSTRACIÓN 65: REFLEXIÓN Y PÉRDIDAS DE RETORNO DE "MICROCAVIDAD EDF"	43
ILUSTRACIÓN 66: ETAPA AMPLIFICADORA JUNTO A UN CIRCULADOR	47
ILUSTRACIÓN 67: ETAPA AMPLIFICADORA	47
ILUSTRACIÓN 68: ASE MEDIDO EN EL "PUNTO 2"	47
ILUSTRACIÓN 69: ASE MEDIDO EN EL "PUNTO 1"	47
ILUSTRACIÓN 70: CONFIGURACIÓN LÁSER 1	48
ILUSTRACIÓN 71: CONFIGURACIÓN LÁSER 2	48
ILUSTRACIÓN 72: CONFIGURACIÓN LÁSER 3	49
ILUSTRACIÓN 73: CONFIGURACIÓN LÁSER 4	49
ILUSTRACIÓN 74: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 1 Y "REFLECTOR DOBLE" EN ENTRADA L	50
ILUSTRACIÓN 75: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA	51
ILUSTRACIÓN 76: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 2 Y "REFLECTOR DOBLE" EN ENTRADA L	52
ILUSTRACIÓN 77: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA PARA CONFIGURACIÓN 2 CON REFLECTOR "REFLECTOR DOBLE" EN ENTRADA L (PIN VS. POUT)	52
ILUSTRACIÓN 78: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 3 Y "REFLECTOR DOBLE" EN ENTRADA L	53



ILUSTRACIÓN 79 : RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA EN CONFIGURACIÓN 3 CON "REFLECTOR DOBLE" EN ENTRADA L (PIN VS. POUT)	54
ILUSTRACIÓN 80: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 1 Y MICROCAVIDAD EDF.....	55
ILUSTRACIÓN 81: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DEL LÁSER EN CONFIGURACIÓN 1 CON REFLECTOR MICROCAVIDAD DE EDF	55
ILUSTRACIÓN 82: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 2 Y REFLECTOR "BURBUJA + EDF"	56
ILUSTRACIÓN 83: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DEL LÁSER EN CONFIGURACIÓN 2 CON REFLECTOR MICROCAVIDAD DE EDF	56
ILUSTRACIÓN 84: ESPECTRO DEL OSA PARA CONFIGURACIÓN 4 Y REFLECTOR MDF2	57
ILUSTRACIÓN 85: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DEL LÁSER EN CONFIGURACIÓN 4 CON REFLECTOR "MDF2" (PIN VS. POUT)	58
ILUSTRACIÓN 86: ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN FINAL + PC1	60
ILUSTRACIÓN 87: ESPECTRO MEDIDO CON EL OSA DE CONFIGURACIÓN FINAL + PC1.....	61
ILUSTRACIÓN 88: ZONA DE INTERÉS DE UNA LA FIGURA ANTERIOR.....	61
ILUSTRACIÓN 89: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA DEL PICO PRINCIPAL DEL LÁSER (PIN VS. POUT) EN CONFIGURACIÓN FINAL + PC1	61
ILUSTRACIÓN 90: ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN FINAL + PC2	62
ILUSTRACIÓN 91: ESPECTRO MEDIDO CON EL OSA DE LA CONFIGURACIÓN FINAL + PC2.....	62
ILUSTRACIÓN 92: ZONA DE INTERÉS DE LA FIGURA ANTERIOR	63
ILUSTRACIÓN 93: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA DEL PICO PRINCIPAL DEL LÁSER (PIN VS. POUT) DE CONFIGURACIÓN FINAL + PC2	63
ILUSTRACIÓN 94: ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN FINAL + ATENUADOR (VOA)	64
ILUSTRACIÓN 95: ESPECTRO MEDIDO CON OSA DE CONFIGURACIÓN FINAL + VOA	64
ILUSTRACIÓN 96: ESPECTRO DE INTERÉS OSA DE CONFIGURACIÓN FINAL + VOA.....	64
ILUSTRACIÓN 97: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA DE BOMBEO Y LA POTENCIA DE SALIDA DEL PICO PRINCIPAL DEL LÁSER (PIN VS. POUT) DE CONFIGURACIÓN FINAL + VOA	65
ILUSTRACIÓN 98: CONFIGURACIÓN FINAL DE LA CAVIDAD LINEAL [33]	65
ILUSTRACIÓN 99: ESPECTRO MEDIDO CON EL OSA DE LA CONFIGURACIÓN FINAL DE LA CAVIDAD LÁSER.....	66
ILUSTRACIÓN 100: CARACTERIZACIÓN MEDIANTE EL ANALIZADOR DE ESPECTRO ÓPTICOS DE ALTA RESOLUCIÓN (BOSA)	66
ILUSTRACIÓN 101: DETALLE DE LA ILUSTRACIÓN ANTERIOR.....	67
ILUSTRACIÓN 102: EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA DE EMISIÓN LÁSER RESPECTO A LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA A LA QUE HA SIDO SOMETIDA EL REFLECTOR.....	68
ILUSTRACIÓN 103: EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DE ONDA CENTRAL DEL LÁSER AL SOMETER AL REFLECTOR A VARIACIONES DE ESTIRAMIENTO LONGITUDINAL	69
ILUSTRACIÓN 104: EVOLUCIÓN DEL ESPECTRO DEL LÁSER AL SOMETER AL REFLECTOR A UN BARRIDO DE ESTIRAMIENTO LONGITUDINAL.....	69
ILUSTRACIÓN 105: ENTORNO GRÁFICO DEL SOFTWARE "OSAGRAPHER"	71
ILUSTRACIÓN 106: MONTAJE UTILIZADO ANTERIORMENTE MEDIANTE TORNILLERÍA Y SILICONA.....	72
ILUSTRACIÓN 107: MONTAJE MEDIANTE EL PROTOTIPO DISEÑADO	72
ILUSTRACIÓN 108: A LA IZQUIERDA, EL INTERIOR DE UNA PRESA CON EL POLÍMERO ANTIDESLIZANTE, A LA DERECHA LA PRESA GEMELA MONTADA.....	72



Índice de tablas

TABLA 1: RELACIÓN ENTRE TIPO DE DOPANTES Y EL RANGO DE LONGITUDES DE ONDA QUE AMPLIFICAN [3].....	11
TABLA 2: PARÁMETROS DE FUSIONADORA EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE NÚCLEO DE LA FIBRA HCF.....	27
TABLA 3: VALORES NUMÉRICOS DE LOS PARÁMETROS DE "SYSTEM CONTRON" DEL OBR.....	32
TABLA 4: VALORES NUMÉRICOS DE LOS PARÁMETROS DE "DATA PORCESSING" DEL OBR.....	32
TABLA 5: RESULTADOS DEL REFLECTOR DOBLE.....	58
TABLA 6: RESULTADOS DEL REFLECTOR MICROCAVIDAD EDF.....	58
TABLA 7: RESULTADOS DEL REFLECTOR MDF2.....	59
TABLA 8: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS TRES SENSORES BASADOS EN REFLECTORES MDF.....	74

Capítulo 1: Marco teórico

En este capítulo, se realiza un breve resumen de todos los conceptos teóricos involucrados en este trabajo fin de grado y que, se consideran indispensables para la comprensión del mismo.

1.1. Fibra óptica

La historia de la fibra óptica comienza a cobrar forma en el siglo XIX cuando John Tyndall descubrió que la luz es capaz de viajar a través del agua (ver ilustración 1). Más tarde en 1953, el físico Narinder Singh Kapany, basándose en los estudios realizados hasta el momento, desarrolló un cable de vidrio capaz de transportar luz al que denominó como fibra óptica. Pero no fue hasta después de unos años, tras la invención del láser, cuando se comienza a observar su gran potencial en comunicaciones basadas en transmisores de vidrio.

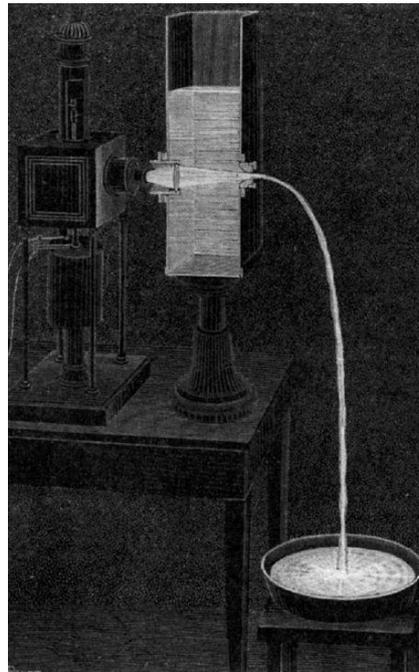


Ilustración 1: Transmisión de luz a través de un fluido [1]

En la actualidad, se denomina fibra óptica a una guía de onda dieléctrica y cilíndrica altamente flexible, capaz de guiar ondas electromagnéticas que se encuentran en el rango de las comunicaciones ópticas.

Su estructura fundamental consta de dos zonas concéntricas, el núcleo interior, donde el índice de refracción se hace máximo y, la cubierta que rodea al núcleo. De esta forma la potencia óptica se propaga mayoritariamente por la región del núcleo generando así, un guiado.

Los parámetros físicos fundamentales que rigen la fibra óptica son, entre otras, las dimensiones de su estructura y el índice de refracción que posee el material de fabricación, de los cuales dependen principalmente el número de modos que se propagan.

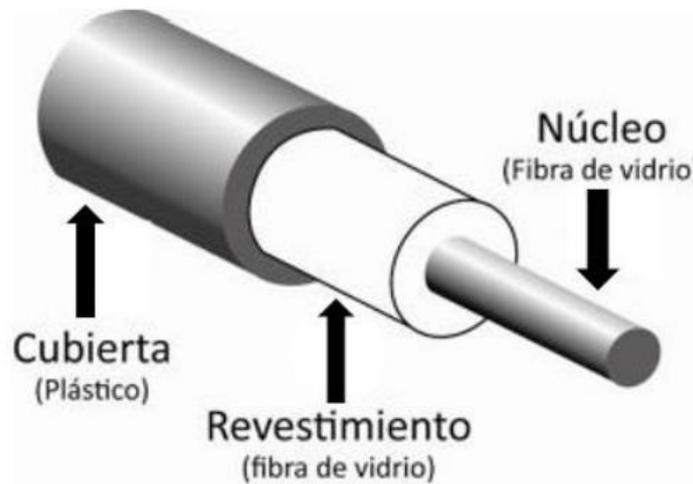


Ilustración 2: Estructura básica de una fibra óptica [2]

Si se desea realizar un análisis riguroso sobre los fundamentos de propagación, se debe recurrir a la teoría electromagnética de Maxwell, aunque la fibra óptica se diseñó considerando el efecto de la reflexión de la luz basado en la óptica geométrica y las leyes de Snell, lo que es una aproximación muy certera con la que todavía se opera. Gracias a la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y la cubierta, cuando la luz (descrita como un rayo) incide en una interfaz entre dos medios distintos, parte de este rayo incidente se refleja y parte se difracta.

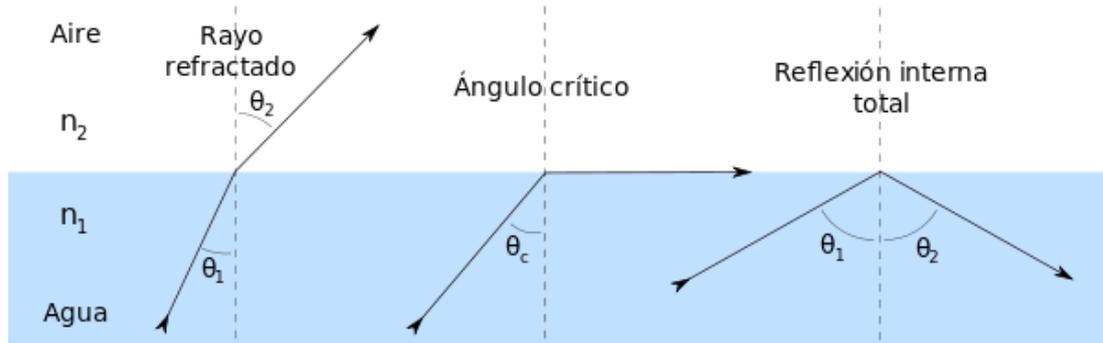


Ilustración 3: Ley de Snell sobre el ángulo crítico [3]

Es la alta capacidad de transmisión de información y, su inmunidad ante interferencias electromagnéticas externas, lo que han convertido a la fibra óptica en el medio ideal de transmisión en el mundo actual de las comunicaciones a larga distancia.

1.1.1. Tipos de fibra óptica

Existen principalmente dos tipos de fibra óptica que son diferenciados por el número de modos guiados que se propagan por la misma. Se definen entonces las fibras ópticas monomodo o SMF según sus siglas en inglés (Single Mode Fiber) por las que únicamente se transmite un modo (típicamente el fundamental) y, las fibras ópticas multimodo o MMF (Multi Mode Fiber) por las que se transmiten varios modos.

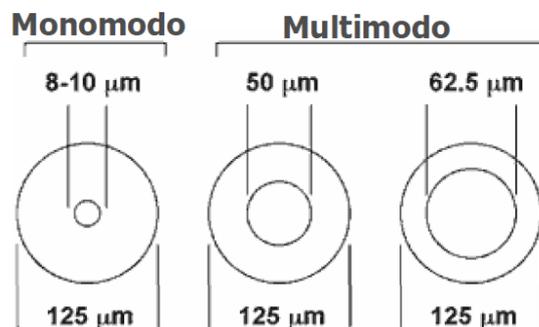


Ilustración 4: Diferencia de dimensiones de fibras monomodo y multimodo [3]

El índice de refracción que posee el núcleo de la fibra, fija la constante de propagación de la luz. Por lo tanto, según la evolución de este índice de

refracción en el eje transversal, se pueden diferenciar también otros tipos de fibra como las fibras de salto de índice o las fibras de índice gradual.

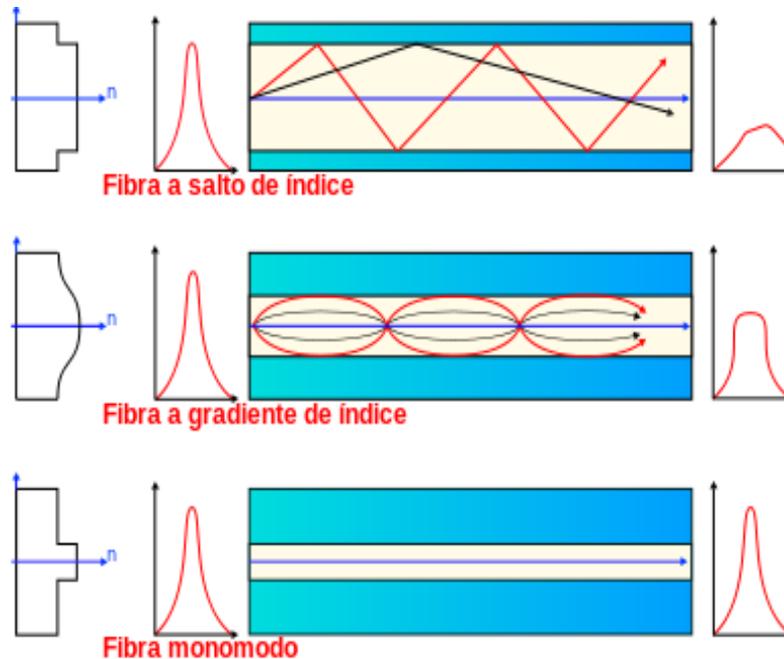


Ilustración 5: Distintos tipos de fibra según su evolución del índice de refracción [4]

En este trabajo fin de grado se han utilizado dos tipos de fibra óptica: fibras SMF y fibras MMF de núcleo hueco o HCF según sus siglas en inglés (Hollow Core Fiber), que poseen un índice de refracción en su núcleo igual a 1 (aire).

1.1.2. Fundamentos físicos de la fibra óptica

En aras de una comprensión más estricta sobre los fundamentos físicos que subyacen en el fenómeno de emisión, se comentarán a continuación una serie de aspectos básicos.

La clave de este fenómeno se encuentra en la interacción luz-materia. Se debe tomar para ello la teoría corpuscular, la cual dice que la luz está compuesta por una serie de corpúsculos llamados fotones.

Dichos fotones no poseen masa y son los encargados de transportar la energía electromagnética. Esta energía está asociada a la constante de Planck y la frecuencia de onda del fotón y, por lo tanto, se es capaz de cuantizar la energía de las distintas emisiones posibles y con ello, discretizar en niveles energéticos la energía de la luz.

Ahora bien, resulta que los átomos y moléculas al igual que la energía de la luz, también presentan niveles de energía discretos. Estos se unen para formar estructuras más complejas que interactúan entre sí y los niveles de energía más altos forman bandas de energía separadas por zonas prohibidas denominadas “gaps”.

El “*band-gap*” es la separación entre la última banda que contenga todos los electrones que la física le permita (denominada banda de valencia) y, la banda superior de mayor energía que no posea todos los electrones posibles (denominada banda de conducción), esta separación determinará las propiedades eléctricas del material pudiendo clasificarlo como conductor, semiconductor o aislante.

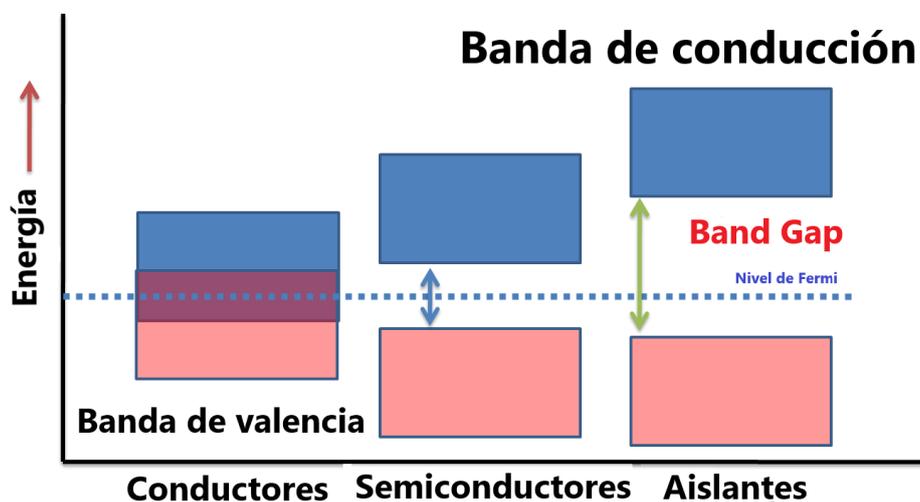


Ilustración 6: Modelo de bandas de energía [figura realizada por el autor]

La interacción entre fotones y materia dentro de estas separaciones generadas entre bandas energéticas para el caso de semiconductores se rige por tres mecanismos básicos:

- Mecanismo de absorción: Se produce cuando un fotón incide sobre el material semiconductor. Dicho material absorbe la energía del fotón quedando en un estado de mayor energía. El material en busca de equilibrio pasará un electrón que se encuentre en la banda de valencia a la banda de conducción.

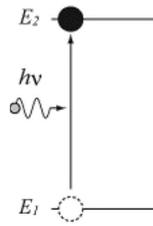


Ilustración 7: Fenómeno de absorción [3]

- Mecanismo de emisión espontánea: Se produce cuando un electrón cae de la banda de conducción a la banda de valencia en busca de un estado energético menor recombinándose de este modo con un hueco. Este proceso libera energía en forma de fotón cuya fase y dirección de propagación es arbitraria.

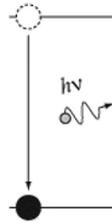


Ilustración 8: Fenómeno de emisión espontánea [3]

- Mecanismo de emisión estimulada: Se produce cuando energía en forma de fotón incide sobre el material. El desequilibrio energético producido estimula la caída de un electrón de la banda de conducción a la banda de valencia recombinándose con un hueco. A diferencia de la emisión espontánea, el fotón generado tendrá una fase y dirección de propagación idénticas al fotón incidente.

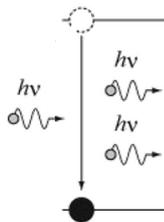


Ilustración 9: Fenómeno de emisión estimulada [3]

Es este último mecanismo del que depende la emisión de luz coherente (fotones de igual fase y dirección de propagación). El efecto láser se puede producir mediante distintos procesos/configuraciones en las que se consigue que domine la emisión estimulada frente a la emisión espontánea. Dicho mecanismo será fundamental e indispensable para llevar a cabo este proyecto fin de grado.



1.1.3. Efectos lineales

Existen ciertas aplicaciones en las que resulta necesario recurrir a la teoría electromagnética y a la resolución de las ecuaciones de Maxwell para la geometría concreta de la fibra óptica.

Como en todas las guías electromagnéticas, cada modo que se propaga está caracterizado por un patrón de variación espacial en el plano transversal a la dirección de propagación y por una constante de propagación.

Resulta entonces que la fibra posee dos limitaciones principales dependientes de su longitud: la reducción de potencia ocasionada por las pérdidas energéticas producidas por el medio de transmisión (atenuación) y la distorsión en el dominio temporal (dispersión).

En cuanto a la atenuación, esta puede ser de dos tipos. El primero de ellos es la atenuación intrínseca, que es inherente al material utilizado para la fabricación de la fibra óptica, en este caso la sílice. Cada material posee zonas de absorción localizadas y estas son invariantes e inalterables.

El otro tipo de atenuación es la atenuación extrínseca. Dicha atenuación es ocasionada por el proceso de fabricación de la fibra óptica y posterior manipulación. Típicamente en las fibras de sílice, los errores más comunes han sido la gran cantidad de humedad, que genera pérdidas en torno a 1380 nanómetros y, los posibles errores en su manipulación, lo que generaba imperfecciones y curvaturas que se traducían en atenuaciones.

Estas pérdidas pueden ser reducidas de forma considerable mejorando el proceso de producción y fabricación de la fibra.

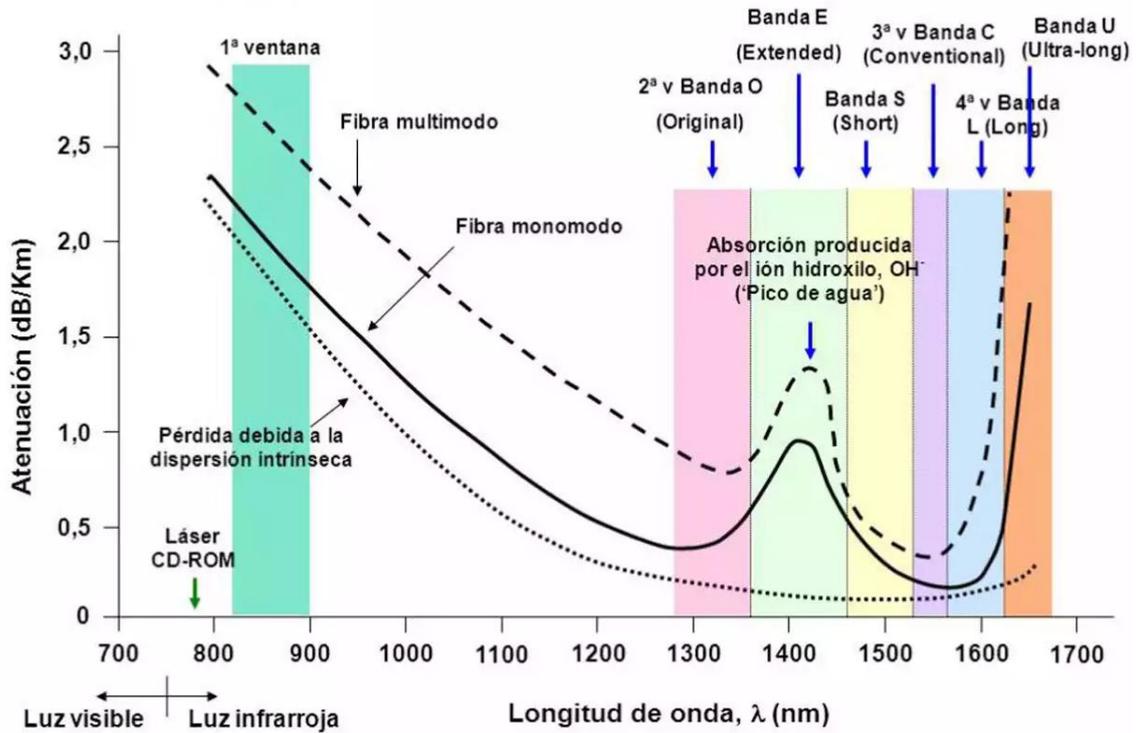


Ilustración 10: Atenuación en fibra óptica de sílice [5]

En cuanto a la dispersión, se pueden diferenciar tres tipos fundamentales. La dispersión intermodal o dispersión multicamino: los distintos rayos recorren diferentes distancias a la misma velocidad por lo que sufren retardos de propagación.

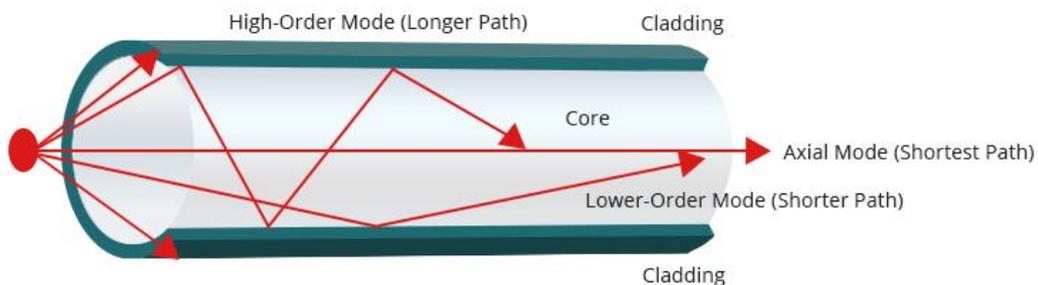


Ilustración 11: Dispersión intermodal [6]

La dispersión intramodal o dispersión cromática: las diferentes longitudes de onda que componen el rayo recorren distancias iguales a diferentes velocidades por lo que sufren distintos retardos de propagación.

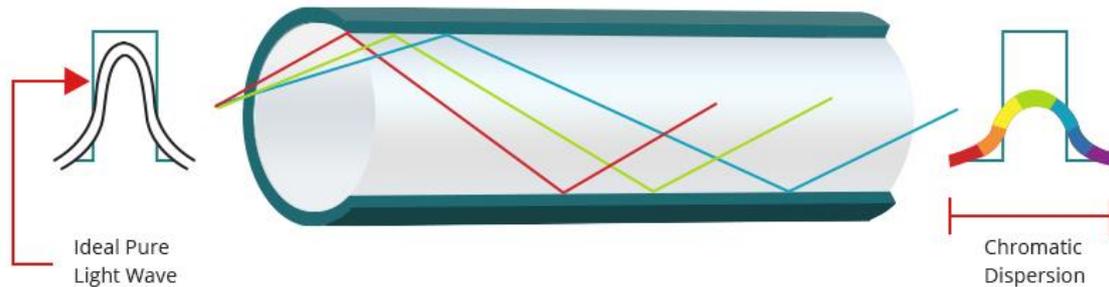


Ilustración 12: Dispersión cromática [6]

Por último, la dispersión por modo de polarización, que ocurre cuando la energía de un pulso se acopla a las dos polarizaciones lineales posibles del modo fundamental. Como cada polarización viaja a diferentes velocidades debido a la birrefringencia, sufren distintos retardos de propagación.

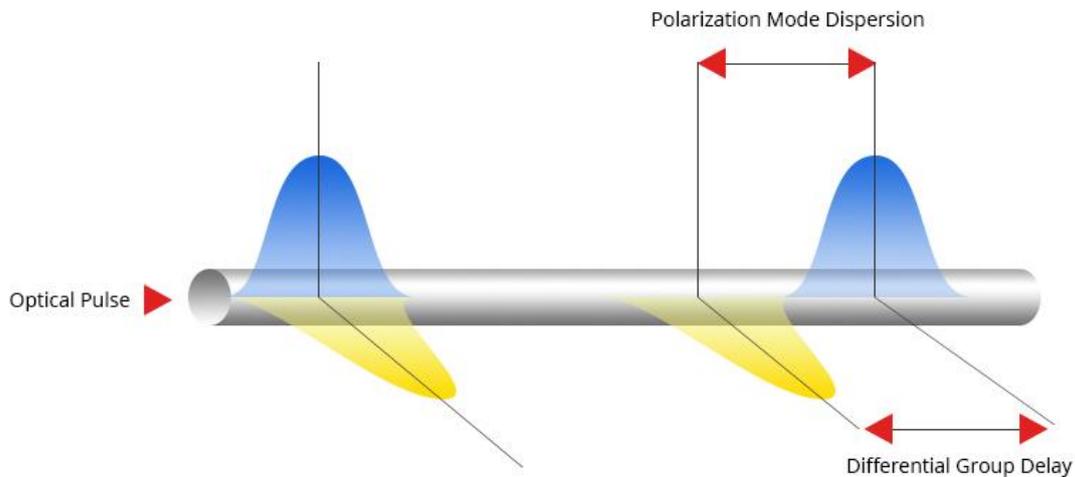


Ilustración 13: Dispersión por modo de polarización [6]

Como todos estos fenómenos son lineales, desde el punto de vista de transmisión, la fibra óptica se puede modelar como un filtro de amplitud (debido a las atenuaciones) y de fase (debido a la dispersión).

1.2. Amplificación óptica

Un amplificador óptico es un sistema capaz de suministrar una ganancia a las señales ópticas de entrada sin necesidad de recurrir al dominio eléctrico. Se comenzaron a comercializar sobre los años 90 y han cambiado de forma significativa los diseños de sistemas ópticos.

Existen diferentes tipos de amplificadores ópticos, aunque este trabajo fin de grado se ha centrado únicamente en los amplificadores basados en emisión estimulada mediante fibras dopadas con tierras raras. Otros tipos de amplificadores ópticos están basados en efectos ocasionados por los efectos no lineales.

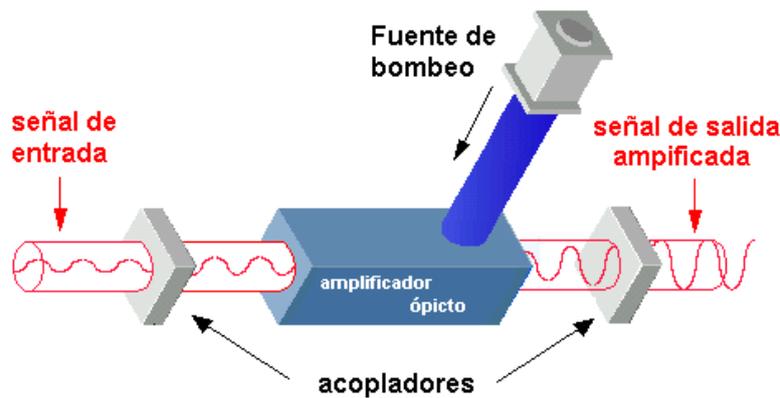


Ilustración 14: Esquema básico de un amplificador óptico [7]

1.2.1. Amplificadores ópticos basados en emisión estimulada mediante fibras dopadas con tierras raras

Existe una forma de conseguir amplificación en una fibra de sílice que consiste en doparla en el proceso de fabricación con iones de tierras raras.

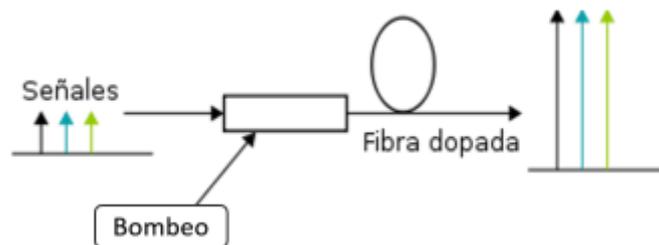


Ilustración 15: Esquema amplificador basado en fibra dopada [8]

El bombeo óptico a longitudes de onda concretas, que se introduzca a este tramo de medio activo, dará lugar a una inversión de población en la fibra. Los iones del medio activo pasarán del estado fundamental a un estado excitado y de esta forma se generará emisión estimulada. Esta inversión se puede producir a lo largo de todo el tramo dopado. Si la atenuación del tramo de fibra dopada es superior a la ganancia que produzca, el medio amplificador no será muy útil por

lo que se define el término de longitud óptima que será, aquella longitud en la que la amplificación será superior a la atenuación introducida.

La elección de los iones de tierras raras con los que se dope la fibra será dependiente de la longitud de onda que se pretenda amplificar. En la siguiente tabla se muestran las tres principales tierras raras utilizadas en comunicaciones.

Dopante	Rango de longitudes de onda amplificada [nm]
Praseodimio	1280-1340
Tulio	1450-1520
Erbio	1500-1600

Tabla 1: Relación entre tipo de dopantes y el rango de longitudes de onda que amplifican [3]

En este trabajo fin de grado se han utilizado fibras ópticas dopadas con erbio, o EDF según sus siglas en inglés (Erbium Doped Fiber). Esta amplificación, basada en iones de erbio, es la más común en sistemas de comunicaciones y posee una excelente relación entre la potencia de bombeo y la amplificación obtenida. Las longitudes de onda adecuadas para bombear estas fibras están centradas en torno a 980 nm y 1480 nm.

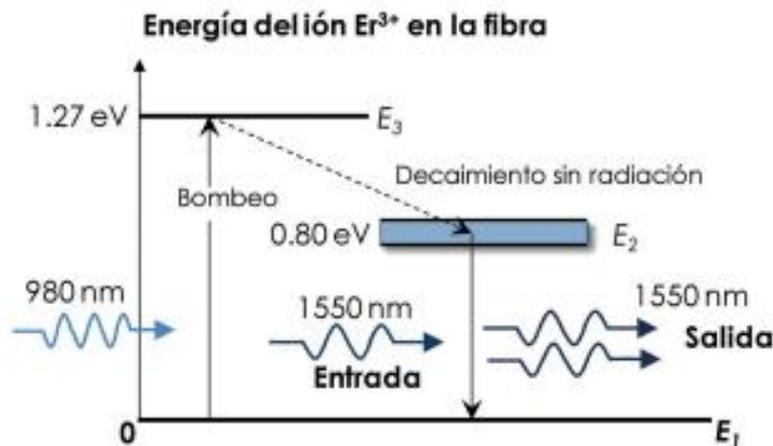


Ilustración 16: Diagrama de los niveles de energía de un ion de erbio [9]

La curva típica de ganancia obtenida al bombear este tipo de fibras dopadas con erbio se puede ver en la ilustración 17. Como esta figura muestra, la curva presenta un máximo en torno a 1530 nm y tiene una respuesta plana en torno a los 1550 nm.

Dependiendo del tipo de fibra dopada con erbio que se bombee, se obtendrán diferentes curvas de ganancia. En este trabajo fin de grado se utilizará como medio amplificador una sección de fibra dopada por erbio del tipo I25 de la compañía “Fibercore”.

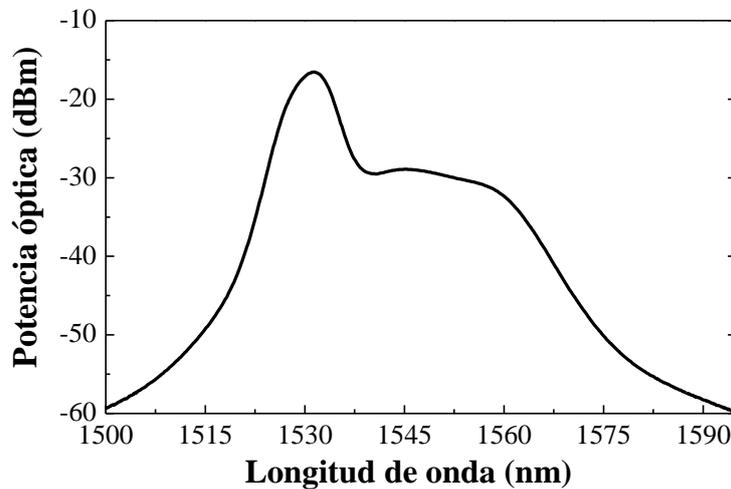


Ilustración 17: Emisión espontánea amplificada (ASE: *Amplified Spontaneous Emission*) de una fibra dopada con erbio [10]

Existen, además, aunque no se utilizarán dentro de este trabajo fin de grado, otros tipos de amplificadores ópticos como son los basados en semiconductores (ver ilustración 18) o los basados en no linealidades (ver ilustración 19, donde se muestra un ejemplo de un amplificador basado en la retrodispersión producida dentro del núcleo de una fibra óptica).

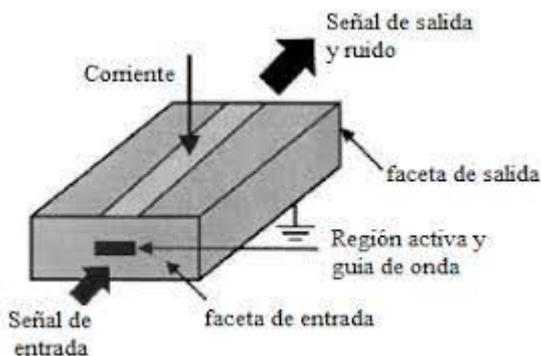


Ilustración 18: Esquema de un amplificador basado en semiconductor (SOA: *Semiconductor Optical Amplifier*) [11]

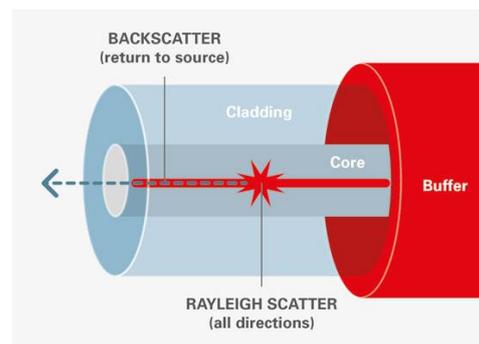


Ilustración 19: Retrodispersión (*backscattering*) producida en fibra óptica [12]



1.3. Láser de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica aportan frente a otros láseres una serie de ventajas tanto económicas como técnicas para su aplicación industrial. Las características técnicas que los hacen competitivos son su menor tamaño, su mayor eficiencia y la simplicidad de sus sistemas de enfriamiento [9].

Un láser de fibra óptica es un dispositivo en el que el medio activo que proporciona la ganancia es habitualmente una fibra óptica dopada con algún tipo de elemento de las denominadas tierras raras. Las más usadas son el erbio (Er^{3+}), el neodimio (Nd^{3+}), el yterbio (Yb^{3+}), el tulio (Tm^{3+}), o el praseodimio (Pr^{3+}). Todos estos elementos usados como dopantes en el interior de una fibra óptica sirven para realizar amplificadores de fibra dopada, que son los elementos esenciales de un láser de fibra.

Existen igualmente una serie de efectos no lineales tales como la dispersión estimulada Raman (stimulated Raman scattering), la amplificación estimulada Brillouin (stimulated Brillouin scattering) o el mezclado de cuatro ondas (Four-Wave Mixing) que pueden también proporcionar ganancia en una fibra óptica sin necesidad de usar dopantes y, de ese modo, servir como medio de ganancia para un láser de fibra óptica. Los láseres de fibra óptica pueden usarse bien para generar radiación de onda continua (CW) o como generadores de pulsos ópticos ultracortos [9].

Los láseres de fibra óptica suponen una innovación tecnológica muy importante que está pasando rápidamente de los laboratorios de investigación a distintas aplicaciones en la industria, gracias a los numerosos productos ya comercializados.

Estos dispositivos representan una nueva generación de láseres relativamente compactos, es decir, de menor peso y tamaño que los convencionales; además, puede alcanzar niveles de potencia de decenas, centenas e incluso miles de vatios. Las aplicaciones de láseres con tal potencia son muy variadas, incluyendo procesos industriales, mecanizado de piezas, soldadura, medida remota y control de contaminantes en la atmósfera (monitorización ambiental) [13].

En este trabajo fin de grado se ha utilizado un láser de fibra óptica cuya cavidad está basada en fibra dopada con erbio capaz de operar en torno a los 1550 nm, ventana de trabajo de gran interés. Esta estructura se explicará en detalle en el apartado 1.3.2.

1.3.1. Topologías

Existen diferentes topologías a la hora de diseñar una estructura láser de fibra óptica, algunas de ellas se muestran a continuación:

- Topología lineal: se trata de un láser que posee una cavidad lineal. Este sistema consta principalmente de dos reflectores situados en los extremos de la cavidad, formando una estructura de interferometría denominada Fabry-Perot.



Ilustración 20: Esquema básico de un láser de cavidad lineal [9]

- Topología en anillo: se trata de un láser en el que la realimentación de la cavidad se genera en forma de anillo por lo que no son necesarios los reflectores para conseguir amplificación.



Ilustración 21: Esquema básico de un láser de cavidad en anillo [9]

- Topología aleatoria o *random*: son láseres de fibra que utilizan reflectores que poseen una localización espacial distribuida y aleatoria en los que tienen lugar las reflexiones. No utilizan una cavidad láser convencional como en los dos casos anteriores y están basados en la amplificación mediante dispersión que generan dichos reflectores aleatorios, como se puede ver en la ilustración 22.

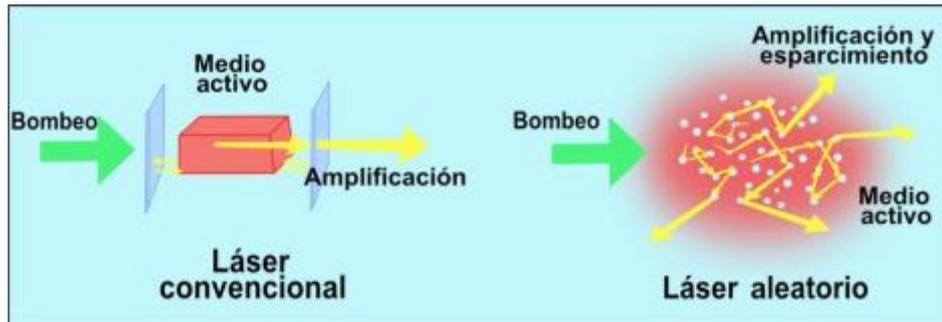


Ilustración 22: Esquema básico de un láser convencional frente al esquema básico de un láser aleatorio o *random* [14]

1.4. Sensores ópticos basados en láseres de fibra óptica

En esta sección se describen los tipos de sensores que emplean tecnologías ópticas más destacados, así como su principio físico de funcionamiento y su uso en este trabajo fin de grado. Una de las principales ventajas del uso de los sensores ópticos para medir magnitudes físicas es su compacto tamaño en comparación con otros sensores no ópticos de sensibilidades similares. Su principal cualidad es la inmunidad a las interferencias electromagnéticas, dado que la luz circulante por una fibra hace caso omiso de cualquier interferencia electromagnética sea cual sea su potencia [3].

A continuación, se pretende explicar el funcionamiento básico de los dos tipos de reflectores con los que se va a trabajar en este proyecto.

1.4.1. Sensores basados en reflectores aleatorios

Un reflector aleatorio, como los que se utilizarán en este trabajo, está basado en una microestructura que posee una variación aleatoria de su índice de refracción ocasionada por micro inscripciones pseudoaleatorias y cuasidistribuidas en el eje longitudinal del núcleo de la fibra. Esta sección de fibra microperforada se realiza mediante un láser de fibra óptica comercial de femtosegundo (CALMAR Laser Inc.) [15]. Sin entrar en detalle, la pseudoaleatoriedad en la inscripción se logra mediante la correcta modulación de la tasa de repetición de pulsos del láser, que no de un gravado en sí mismo aleatorio, quedando la técnica empleada ampliamente detallada en [16].

La ilustración 23 muestra una imagen realizada con un microscopio de una de las fibras micro inscritas utilizadas en el desarrollo del presente trabajo.



Ilustración 23: Imagen microscópica de una fibra micro inscrita.

1.4.2. Sensores basados en cavidades

El segundo tipo de reflector con el que se ha trabajado está basado en microcavidades fabricadas con fibras huecas junto con fibras SMF. Su construcción está descrita al detalle en el capítulo 3 del presente documento.

Las microcavidades huecas fabricadas en este trabajo fin de grado funcionan como un interferómetro Fabry-Perot, de forma que cuando la señal óptica las atraviesa, ésta sufre múltiples reflexiones con diferente fase cada una. Así, se forma un conjunto de valles y picos característico de cada microcavidad. Dicho conjunto se puede desplazar en función de la elongación aplicada, ya que esta modifica la longitud de la microcavidad, de modo que se puede determinar la tensión aplicada en función del desplazamiento producido [3].

Recientemente, se ha demostrado que los sensores basados en microcavidades pueden mostrar una sensibilidad a la elongación mayor que los sensores tradicionales basados en FBGs [18], [19]. En este proyecto, se han fabricado dichas microcavidades para su uso como sensores, y para ello, se ha estudiado su funcionamiento teórico y experimental.

En este proyecto se han fabricado microcavidades mediante fibra HCF. Los parámetros de las microcavidades son altamente dependientes de su tamaño, de forma que es importante conocer la relación entre su longitud y dichos parámetros.

$$FSR = \frac{\lambda_m * \lambda_{m+1}}{2 * L * n_0} \quad (1)$$

La ecuación (1) muestra la relación entre el FSR (*Free Spectral Range*) y la longitud de la microcavidad [20].

Donde L corresponde con la longitud de la microcavidad, n_0 con el índice de refracción del aire en el interior de la microcavidad (que equivale a 1), m con el orden del pico estudiado, y λ_m con la longitud de onda de resonancia, que se obtiene de la siguiente fórmula.

$$\lambda_m = \frac{2L}{m} * n_0 \quad (2)$$

Relacionando las ecuaciones (1) y (2), es posible determinar el tamaño exacto de la microcavidad conociendo el FSR, dato que corresponde con la distancia que hay entre los valles consecutivos del espectro obtenido con el interrogador.

Además, la longitud de la microcavidad también determina si ésta se comportará como un interferómetro Fabry-Perot o como una guía reflectante antirresonante (AR). En el primer caso, la microcavidad será únicamente sensible a la elongación, mientras que, si se comporta como una guía reflectante AR, será también sensible a la temperatura.

Para que la microcavidad se comporte como un interferómetro FP, su longitud deberá ser inferior a la denominada Longitud crítica (L_c), que se calcula mediante la ecuación (3). En caso de que la longitud de la microcavidad sea superior a esta longitud crítica, esta se comportará como una guía reflectante AR.

$$L_c = \sqrt{n_0^2 + n_2^2 - n_1^2} \left(\frac{r}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}} + \frac{2d}{\sqrt{n_1^2 - n_0^2}} \right) \quad (3)$$

En dicha ecuación (3), d corresponde con el espacio entre el límite del núcleo de la fibra hueca y el límite de su la cubierta, r es el radio del núcleo de la fibra hueca y n_0 , n_1 y n_2 son los índices de refracción del aire, el núcleo y la cubierta de la fibra, que corresponden con los valores 1, 1.449 y 1.443 respectivamente.

El esquemático mostrado en la ilustración 24 muestra dos microcavidades de distinta longitud en serie, una mayor a la longitud crítica y otra menor.

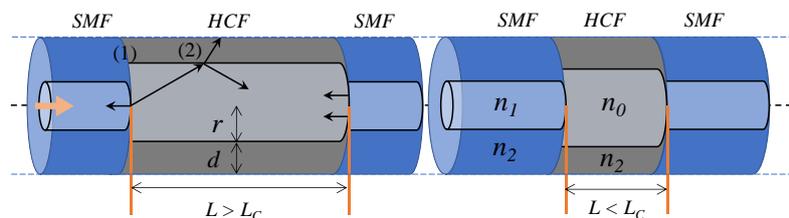


Ilustración 24: Microcavidades con distintas longitudes [16]



Debido a la reflexión de Fresnel, se genera una interferencia Fabry-Perot (FP) cuando la luz introducida es parcialmente reflejada en el punto (1) (ver ilustración 24), o lo que es lo mismo, entre las interfaces entre las fibras SMF y HCF. Después el haz de luz se propaga con un cierto ángulo y, si la microcavidad es suficientemente larga, entra en la cubierta de la fibra hueca (indicado en el punto (2) de la ilustración 24). En este punto la estructura puede verse como un interferómetro FP a lo largo de la dirección longitudinal, debido a que las interferencias entre el aire y la sílice se comportan como dos superficies reflectantes [20].

Después del primer interferómetro Fabry-Perot, las ondas de luz cuyas longitudes de onda no cumplan la condición de resonancia serán guiadas hasta el segundo interferómetro, el de mayor longitud. Aquí, la interferencia obtenida es la correspondiente a una estructura clásica SMF-MMF-SMF [21]. En nuestro caso, el guiado de la reflexión antirresonante (AR) ocurre en la fibra hueca, actuando como una sección de fibra multimodo (MMF).

1.4.3. Sensores basados en otros tipos de reflectores

Existen otros tipos de sensores, aunque prácticamente todos obedecen a los mismos principios físicos que los anteriores. Un caso muy importante son los sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBG).

Una red de difracción de Bragg es una microestructura que tiene una variación espacial de su índice de refracción, de forma que generalmente este aumenta conforme avanzamos espacialmente [3]. Dado su reducido tamaño, de unos pocos milímetros, es fácilmente integrable en una fibra óptica, de forma que en cierto punto de su longitud varíe gradualmente el índice de refracción de su núcleo.

Una red de Bragg es, en resumidas cuentas, un filtro de banda estrecha, pues dada su estructura resonante actúa como un espejo selectivo en función de la longitud de onda (ver ilustración 25). Esto significa que si se inyecta una fuente de luz de banda ancha en una fibra con una red de difracción integrada la red solo reflejará luz con una anchura espectral muy reducida, centrada en torno a la longitud de onda correspondiente al periodo e índice de difracción de la red de difracción. Esta longitud de onda se conoce como longitud de onda de Bragg, λ_b . Si se somete a esta FBG a una variación de *strain* o de temperatura, estos reflectores se comportan además como un sensor capaz de detectar y cuantificar dichas variaciones (ver ilustración 26).

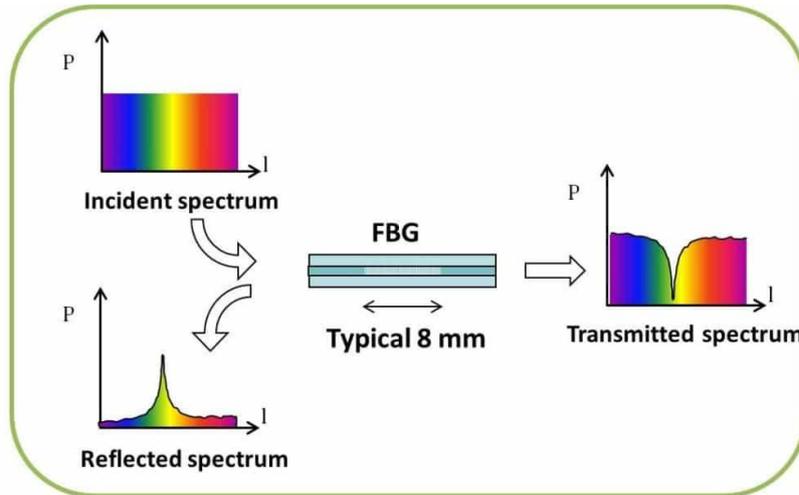


Ilustración 25: Funcionamiento de una red de difracción de Bragg como reflector [22]

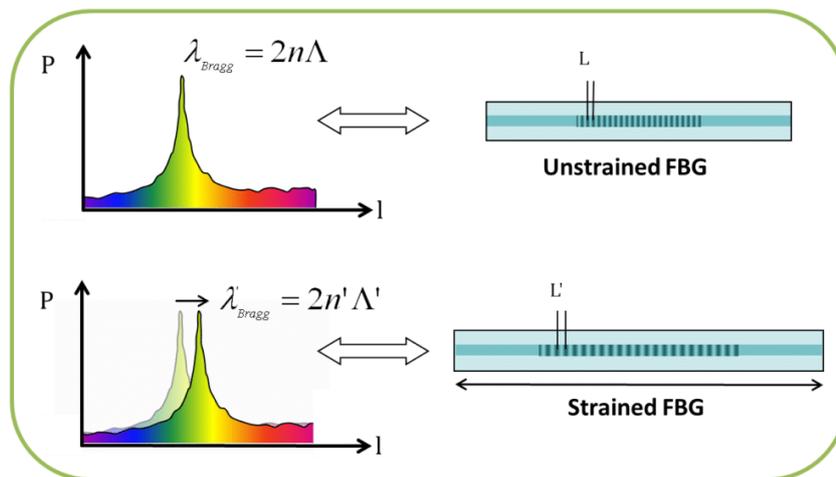


Ilustración 26: Funcionamiento de una red de difracción de Bragg como sensor de strain [22]

También existen sensores basados en interferómetros. Hay de varios tipos como por ejemplo el interferómetro Mach-Zhender, el interferómetro Sagnac, el Fizeau o el Fabry-Perot. Estos han sido de gran importancia dada su gran estabilidad y facilidad de implementación. Están basados en el mismo principio físico que los reflectores de microcavidad y, por lo tanto, será con este tipo de sensores con los que se compararán los resultados.



Ilustración 27: Funcionamiento de una cavidad Fabry-Perot [3]

Capítulo 2: Instrumentación

Una vez puestos en contexto gracias al marco teórico, se procede a recopilar en este segundo capítulo la instrumentación más importante que ha sido necesaria para llevar a cabo este proyecto, así como, una breve explicación teórica de la misma cuando sea necesario.

2.1. Elementos ópticos

Los fundamentos que rigen la transmisión de luz a través de una guía onda de sílice se conocen desde hace años, pero su implementación en las comunicaciones tuvo que esperar al diseño y desarrollo de elementos electro-ópticos que permitiesen manejar la señal óptica sin convertirla al dominio eléctrico.

Existen en la actualidad un gran número de ellos y cada vez más complejos, aunque en este capítulo solo se pretende mencionar los que han sido necesarios para realizar el montaje del láser de fibra óptica.

2.1.1. Multiplexor por división en longitud de onda (WDM)

Al igual que el funcionamiento de un multiplexor eléctrico, es el elemento pasivo capaz de multiplexar y demultiplexar una señal óptica (ya que son bidireccionales). Esta tecnología permite la multiplexación de distintas longitudes de onda en el interior de una misma fibra óptica y la demultiplexación, que es el proceso inverso donde se descompone la señal principal en función de sus componentes espectrales.

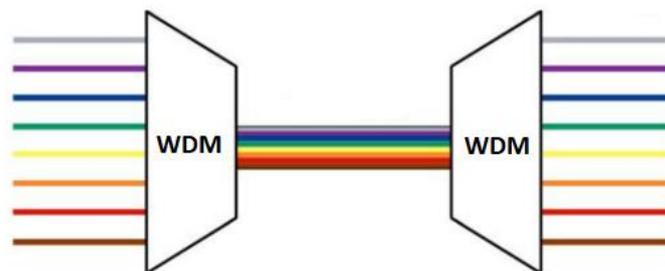


Ilustración 28: Multiplexor WDM / Demultiplexor WDM [23]

2.1.2. Fibra dopada con erbio

Como se ha explicado en el capítulo anterior, se trata de una fibra en la que durante el proceso de fabricación se han introducido iones de tierras raras, dopando así el material. En este caso se realiza un dopaje con iones de erbio, aunque se puede realizar con otras tierras raras. Se genera entonces un elemento de amplificación óptica que se colocará como medio activo del láser de fibra óptica.

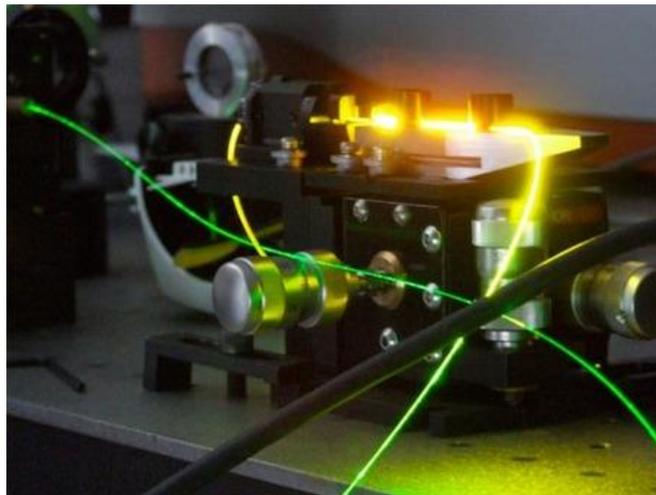


Ilustración 29: Fotografía de una fibra dopada con erbio [24]

2.1.3. Acoplador óptico

Los acopladores ópticos son dispositivos pasivos que permiten dividir o combinar la potencia óptica. Pueden tener un número variable de puertas de entrada o de salidas. En el caso de que tengan varias entradas y una sola salida, se denominan combinadores ópticos, y si por el contrario tienen una sola entrada, se denominan separadores (splitter), como se muestra en la ilustración 30.

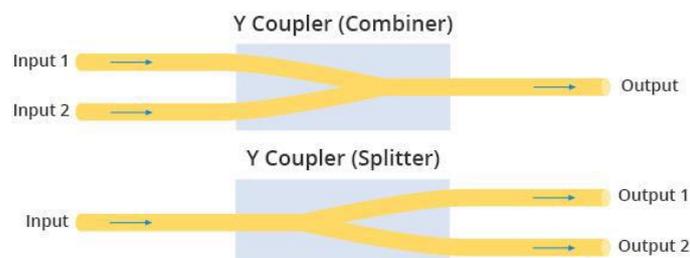


Ilustración 30: Combinador y separador óptico [2]

Se pueden utilizar como multiplexores o divisores de polarización entre otras muchas configuraciones gracias a ser bidireccionales.

Se basa en el fenómeno óptico de acoplamiento de campos evanescentes. El campo modal del pulso guiado se extiende más allá del propio núcleo por lo que aproximándolo a otro tramo de fibra, este campo modal se acoplará a dicho tramo.

En el caso de este trabajo fin de grado, este dispositivo se ha utilizado para desviar un porcentaje de la potencia óptica al exterior de la estructura donde se conectarán los instrumentos de medida y caracterización.

2.1.4. Circulador óptico

Este elemento pasivo está basado en rotadores de Faraday cuya funcionalidad es dirigir la luz entre los distintos puertos que constituyen el circulador. En un circulador de tres puertos (como el que se ha utilizado en este proyecto), la luz introducida en el puerto uno será redirigida hacia el puerto dos y, la introducida por este, se redirigirá hacia el puerto tres. El puerto uno y el puerto tres se encuentran aislados entre sí.

Se trata de un dispositivo muy útil en sistemas “Add/Drop”, permitiendo añadir y extraer componentes espectrales sin que estas interactúen entre ellas.

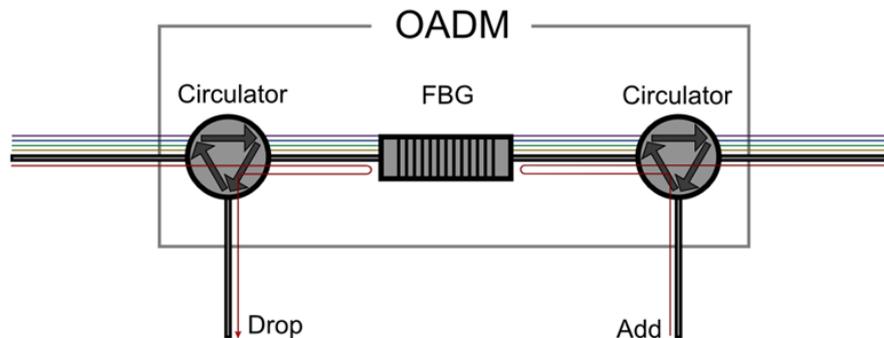


Ilustración 31: Esquema de un *add/drop* basados en dos circuladores de tres puertos conectados entre sí [25]

2.1.5. Atenuador óptico

Los aisladores ópticos son dispositivos pasivos que transmiten la luz en una sola dirección y son realmente útiles para evitar que la luz alcance elementos altamente sensibles, como las fuentes o detectores ópticos, debido a reflexiones

indeseadas o niveles de potencia demasiado altos [3]. Pueden ser de dos tipos: los de atenuación fija o de atenuación variable.

2.1.6. Controlador de polarización

Un controlador de polarización es un elemento pasivo cuyo ajuste es típicamente manual. El objetivo principal del mismo es el de cambiar la polarización de la señal de entrada. Estos elementos se definen mediante los grados de libertad necesarios de sus anillos para variar el valor de la polarización.

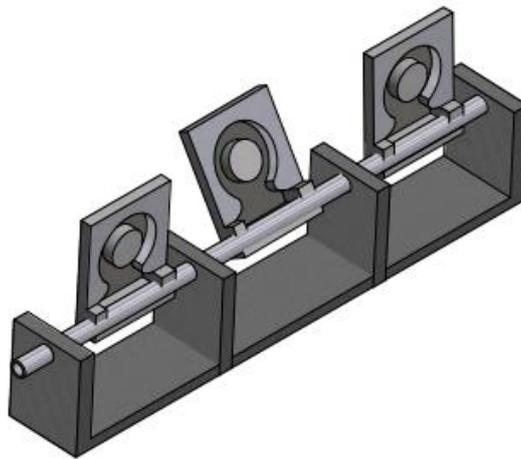


Ilustración 32: Controlador de polarización [26]

2.1.7. Herramientas para trabajar con la fibra óptica

A la hora de trabajar con las diferentes fibras, se utilizó el siguiente equipamiento:

- Fusionadora de fibra óptica. Se utilizó la fusionadora View 7 arc fusión splicer, tanto con los modos de operación que esta ofrecía de serie como con algunos parámetros modificados.
- Cortadora de fibra óptica. Necesaria para aplicar un corte preciso a las fibras y con el menor ángulo de inclinación posible, ya que puede afectar de forma muy negativa a la fusión de éstas, provocando unas pérdidas por encima de lo recomendado. La cortadora de fibra óptica usada ha sido la view 7 fiber cleaver junto con la cortadora que incluye el equipo de fabricación de fibras estrechadas (*Taper Manufacturing Station*) [27] .
- Peladora de fibra óptica. Se utilizó para retirar las primeras capas protectoras de las fibras ópticas.

2.2. Herramientas de caracterización

Para llevar a cabo todas las caracterizaciones pertinentes a lo largo de este trabajo fin de grado, se han utilizado distintos instrumentos de medida mencionados a continuación.

2.2.1. Analizador de espectro óptico (OSA)

Este dispositivo permite visualizar el espectro óptico con la finalidad de analizar las distintas longitudes de onda presentes en la estructura bajo observación. El modelo utilizado en este caso ha sido el MS9740A utilizado principalmente para la caracterización de diferentes láseres generados.

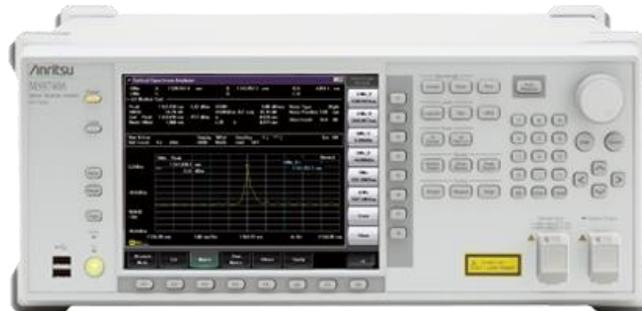


Ilustración 33: Analizador de espectro óptico (OSA) [28]

2.2.2. Analizador espectros ópticos alta resolución (BOSA)

Se trata de un dispositivo similar al OSA salvo que posee una resolución (0.08 pm) y un rango dinámico (>80dB) mucho mayores. Se utilizará cuando la resolución sea determinante en el análisis. En el caso de este trabajo fin de estudios, se ha utilizado para comprobar si la emisión de los láseres poseía una emisión monomodo o multimodo ya que, la resolución del OSA no era suficiente.

2.2.3. Reflectómetro óptico (OBR)

Este dispositivo evalúa la potencia óptica reflejada a lo largo de la longitud de una fibra óptica. Gracias a él se pueden detectar con gran precisión los puntos exactos donde se generan, por ejemplo, pérdidas de potencia.

Para este proyecto se utilizó el reflectómetro óptico LUNA OBR 4600 [29], cuyas características de precisión y diagnóstico son casi únicas en la industria de la fibra óptica, pues cuenta con una resolución espacial de 10 μm y no deja zonas

muertas, además de ofrecer una visión más completa de lo que sucede en el sistema mediante la opción de detección distribuida [30].

En este proyecto ha sido utilizado para caracterizar las microcavidades fabricadas y así poderlas analizarlas con gran detalle.

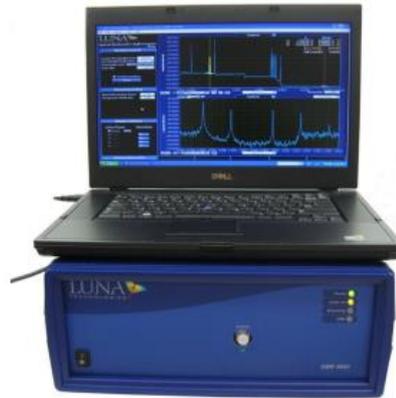


Ilustración 34: OBR 4600 de LUNA [31]

2.2.4. Cámara climática

Para la caracterización de los distintos reflectores en su uso como sensores de fibra óptica ante variaciones de temperatura, fue necesario el uso de una cámara climática para reproducir de forma controlada una serie de caracterizaciones. En este caso se utilizó una cámara climática de la marca BINDER [32].

2.2.5. Microposicionador y presas de fibra óptica

Por último, para someter a los sensores de fibra óptica a elongación longitudinal y determinar su sensibilidad, fue necesario el empleo de microposicionadores y sistemas de sujeción de las fibras sometidas a estudio. Este diseño se detallará más adelante en el capítulo cinco (la ilustración 35 muestra una fotografía del sistema de sujeción).

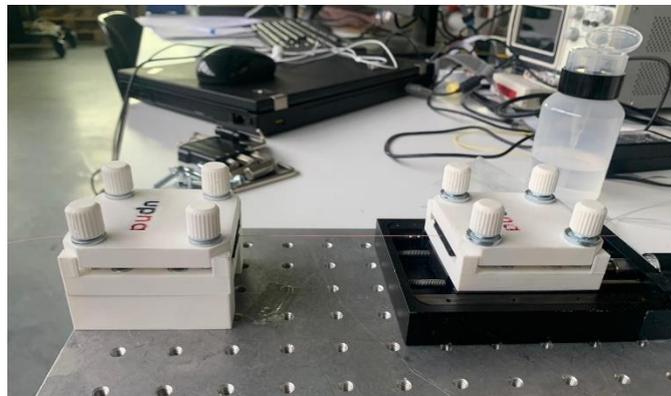


Ilustración 35: Imagen del sistema diseñado para la sujeción de los sensores de fibra óptica.



Capítulo 3: Reflectores

En vista de los nuevos métodos de fabricación de distintos tipos de fibra óptica y las modificaciones físicas que se pueden generar en ellas, se abren nuevos campos de investigación y, con ellos, nuevas preguntas acerca de la mejora y perfeccionamiento de los láseres de fibra óptica.

En este TFG, se pretende estudiar el papel que pueden ocupar dos tipos de fibra modificada y empleada como reflectores. El primer tipo se trata de una microcavidad fabricada con fibra SMF y HCF y, el segundo tipo, una fibra monomodo estándar donde se han realizado micro-inscripciones mediante un láser pulsado de femtosegundo (MDF: microdrilled fiber).

3.1. Fabricación de microcavidades

3.1.1. Materiales

Para la realización de microcavidades mediante el método que se ha propuesto en este estudio y que, se explicará en el siguiente apartado, son necesarios los siguientes materiales:

- Fibra óptica SMF
- Fibra óptica HCF
- Cortadora de fibra óptica
- Peladora de fibra óptica
- Fusionadora de precisión de fibra óptica
- Equipo de fabricación de fibras estrechadas (*Taper Manufacturing Station*) [27].

3.1.2. Método de fabricación

A través de la experimentación, junto a procedimientos anteriores propuestos y elaborados por compañeros [3], se ha mejorado el proceso de fabricación de estas microcavidades. Dichos pasos quedan reflejados a continuación:

1. Acondicionamiento de las fibras SMF y HCF

El primer paso consiste en preparar ambas fibras para la realización de la primera fusión.

Se cortan dos secciones de fibra SMF de unos 20 centímetros de longitud. Después, se procede a la retirada de la capa de recubrimiento de una de dichas secciones y de la fibra HCF mediante un stripper térmico. Es necesario prestar especial atención en la fibra hueca ya que es más frágil y su coste elevado. Por último, se realiza un corte en ambas fibras lo más perpendicular posible al eje de fusión mediante la cortadora de fibra, dejando todo listo para el siguiente paso. De nuevo se debe tener cuidado en el corte de la fibra HCF ya que es bastante frágil y resulta común dañar la punta de la fibra.

2. Primera fusión SMF + HCF

Se colocan ambas fibras en la fusionadora.

Al tratarse de una fusión poco convencional, aunque la fusionadora empleada es capaz de alinear en ambos ejes las fibras, los parámetros de fusión que incluye por defecto no son los adecuados.

Por lo tanto, de forma experimental, se han hallado los valores óptimos necesarios para una correcta fusión que dependen del diámetro del núcleo de la fibra hueca.

A continuación, se muestra la tabla 2 con los parámetros seleccionados en función de la fibra hueca:

	HCF 52,8 μm	HCF 55 μm	HCF 66 μm	HCF 75 μm
Potencia de arco (bit)	250	250	230	200
Tiempo de arco (ms)	2000	2000	2000	2000
Tensión de corte (g)	209	209	209	180

Tabla 2: Parámetros de fusionadora en función del diámetro de núcleo de la fibra HCF

Una vez introducidos los parámetros correspondientes, se procede a realizar la primera fusión.

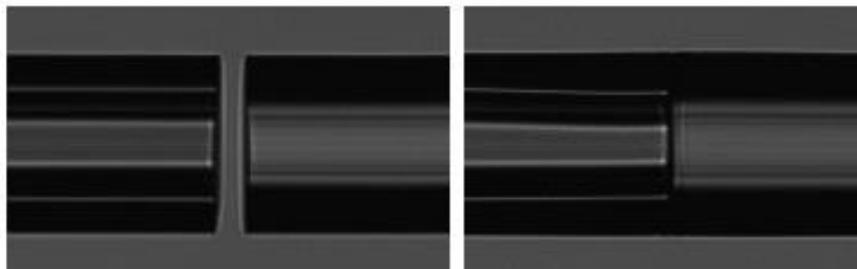


Ilustración 36: Fotografía de una fusión de fibra SMF (derecha) y fibra HCF (izquierda)



En la ilustración 36, se aprecia el resultado de una fusión exitosa en la cual, no existe colapso de núcleo ni un estrechamiento diametral de la fibra. Además, es buen indicio que supere la prueba de tensión que realiza la fusionadora al finalizar el procedimiento.

3. Corte de fibra hueca con longitud definida

Una vez se poseen ambas fibras fusionadas, es necesario cortar la fibra HCF para generar una microcavidad con la longitud deseada. Es por tanto que habrá que realizar una medida lo más exacta posible y posteriormente, realizar un corte con igual precisión.

Es en este punto, donde se consigue una clara mejora de fabricación respecto a la metodología empleada con anterioridad.

Anteriormente, se realizaba la medida de forma manual mediante un microscopio y, el corte, mediante una cortadora manual. Aunque dicho microscopio tuviese la resolución adecuada, la colocación es completamente manual al igual que el posterior corte por lo que se induce un error final bastante significativo en la microcavidad generada.

Para solventar y perfeccionar este error, se opta por realizar tanto la medida como el corte con una cortadora de precisión micrométrica que se encuentra en equipo de fabricación de fibras estrechadas.

Tras colocar la fibra en este equipo, se debe encontrar y centrar la fusión generada con anterioridad gracias al microscopio incorporado y, realizar la tensión correspondiente al tipo de fibra (véase en la tabla 2). A continuación, en la siguiente ilustración, se muestra cómo se disciernen ambas fibras y se realiza la pertinente alineación de la fusión.

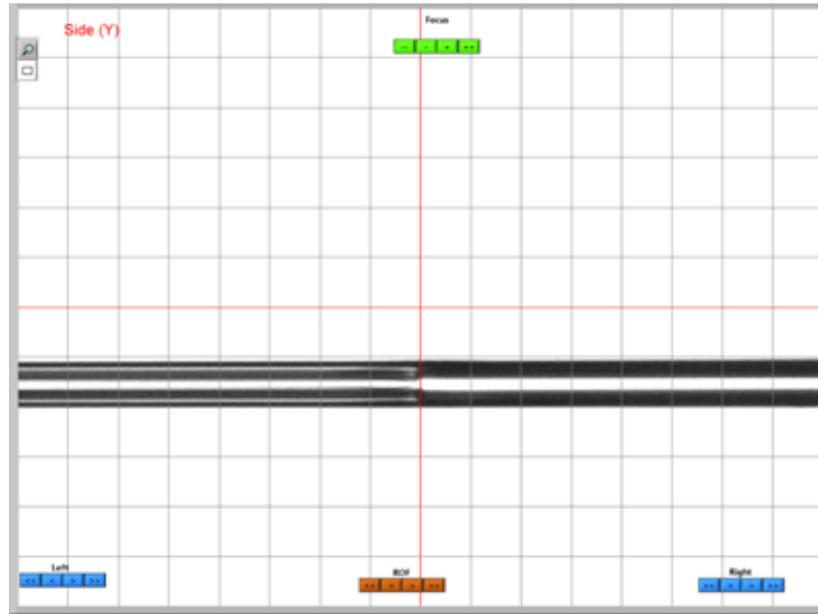


Ilustración 37: Imagen de una fusión entre HCF y SMF tomada mediante la cámara del equipo de fabricación de fibras estrechas [27]

Una vez alineada, mediante software, se desplazará hacia la derecha la distancia requerida teniendo en cuenta que el paso del motor posee una precisión de un micrómetro. Cabe destacar, que en la ilustración 37, la resolución del mallado es de $125\ \mu\text{m}$ por lo que el diámetro de la fibra ocupa precisamente el diámetro de una celda.

Por último, mediante la cuchilla de diamante que incorpora el equipo de fabricación de fibras estrechadas, se realiza el pertinente corte a la distancia deseada. A diferencia de la metodología manual anterior, se realiza un corte de mayor precisión (micrométrico) y totalmente perpendicular, quedando dos secciones limpias, siendo este el resultado óptimo para la última fusión.

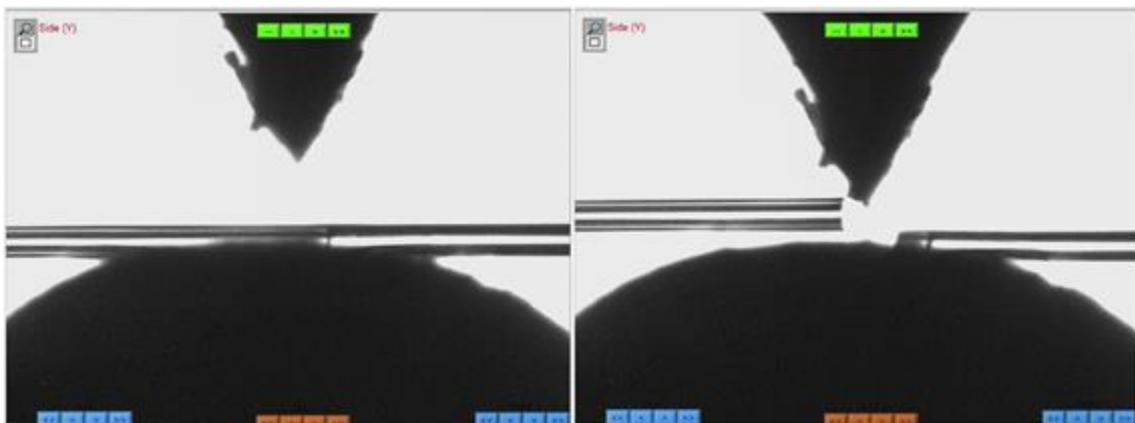


Ilustración 38: Imagen que muestra el corte de la fibra mediante el equipo de fabricación de fibras estrechas [27]

En la ilustración 38, mostrada anteriormente, se observa en la parte superior la punta de la cuchilla móvil y en la parte inferior el yunque, encargado de la estabilidad y la sujeción de la fibra para realizar el corte. En este caso particular, la longitud de la microcavidad es de 100 μm .

4. Segunda fusión HCF + SMF

Tras la realización del corte micrométrico y haber extraído la fibra del equipo de fabricación de fibras estrechadas, la fibra ya está lista para la última fusión con fibra SMF.

Por lo tanto, se colocará en un extremo de la fusionadora la fibra extraída que contiene la microcavidad de HCF y en el otro extremo se colocará una fibra SMF previamente acondicionada. Los parámetros de la segunda fusión serán exactamente los mismos que los de la primera fusión.

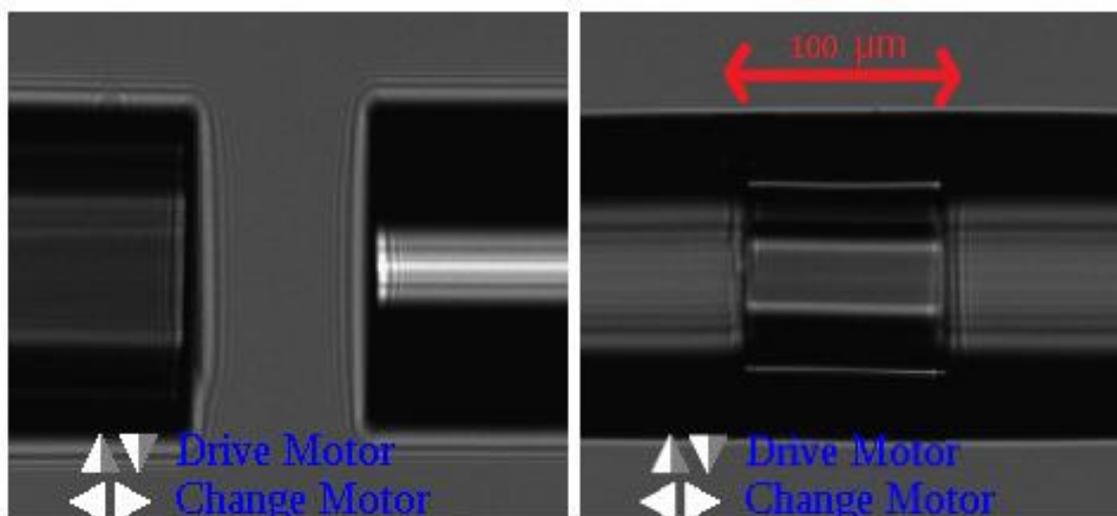


Ilustración 39: Última fusión mostrada a través del microscopio de la fusionadora

Mediante el microscopio de la fusionadora (cuyas imágenes quedan reflejadas en la ilustración 39), se debe apreciar que ambos cortes hayan sido satisfactorios. Este es un punto crítico ya que en caso de que el corte realizado con el equipo de fabricación de fibras estrechadas haya sido infructuoso, se deberá realizar la fabricación desde cero.

Tras una correcta fusión, no se debe observar colapso de núcleo, tampoco un estrechamiento diametral de la fibra ni de la microcavidad. Es entonces, cuando ya se obtiene una microcavidad completa y finalizada con éxito.

5. Fusión de conectores en los extremos de la microcavidad

Por último, una vez se posee la microcavidad ya terminada, se procede a fusionar dos conectores FC/PC mediante la fusionadora para su futura incorporación como reflector.

3.2. Fibras microperforadas (MDF)

3.2.1. Método de fabricación

Respecto a la fabricación del segundo tipo de reflector, se hará referencia al trabajo de inscripción realizado por compañeros como se muestra en el artículo [33]. Para la creación de este reflector distribuido se coloca una fibra monomodo estándar en un soporte específico encargado de su sujeción. Posteriormente, se añade un gel adaptador de índice encargado de la eliminación de aberraciones que pueda generar la fibra óptica. Por último, se enfocan los pulsos láser mediante lentes.

Para generar dichos pulsos, se ha usado un láser pulsado de fibra de femtosegundo (FLCPA) comercial de CALMAR, que opera a 1030 nm, con una duración de pulso de 370 femtosegundos y una tasa de repetición de pulso (PRR) variable entre 1 Hz a 120 kHz, y responsable de realizar la inscripción en el núcleo de la fibra. Se elige este método ya que proporciona una clara mejora de la inhomogeneidad del índice de refracción de la fibra, aumentando la dispersión distribuida.

En cuanto a la distribución de las perforaciones en el núcleo, se inscriben de forma pseudoaleatoria. Esto es debido a que la velocidad de repetición del láser de femtosegundo, no se puede modular simultáneamente al mismo ritmo que la velocidad de inscripción de los pulsos. Por lo tanto, aunque la frecuencia de repetición de los pulsos se module aleatoriamente, no se trata de una inscripción aleatoria directa. Como resultado, se obtiene un reflector pseudoaleatorio y cuasidistribuido como el que se puede ver a continuación.

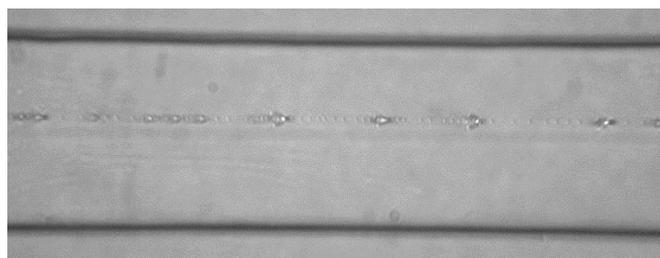


Ilustración 40: Fotografía de un reflector distribuido de forma casi aleatoria a lo largo del núcleo de una fibra estrechada

Capítulo 4: Caracterización de los reflectores

Tras la fabricación reflectores se realiza su caracterización. En este caso se ha llevado a cabo mediante el reflectómetro OBR de LUNA [31].

Los parámetros principales del OBR con el que se han realizado todas las mediciones de este trabajo son las presentadas a continuación.

"System control"	Center Wavelength [nm]	Wavelength Range [nm]	Scan Range [nm]	Gain [dB]
	1566,9	42,99	1545,52 – 1588,26	0

Tabla 3: Valores numéricos de los parámetros de "System control" del OBR

"Data Processing"	Spatial Resolution [nm]	Integration Width [nm]
	0,1	0,2

Tabla 4: Valores numéricos de los parámetros de "Data Processing" del OBR

Posteriormente, se analizarán y expondrán los resultados obtenidos y se realizará una selección de los mejores reflectores para optimizar las prestaciones en la estructura láser.

En las siguientes imágenes, se muestran las gráficas de dichos resultados. Los representados en amarillo muestran es espectro en reflexión y los representados en azul las pérdidas de retorno.

4.1. Caracterización de reflectores basados en MDF

Con el fin de obtener una caracterización completa de los reflectores se han caracterizado por ambos extremos individualmente obteniendo así dos resultados para cada fibra en particular.

4.1.1. Reflector MDF1

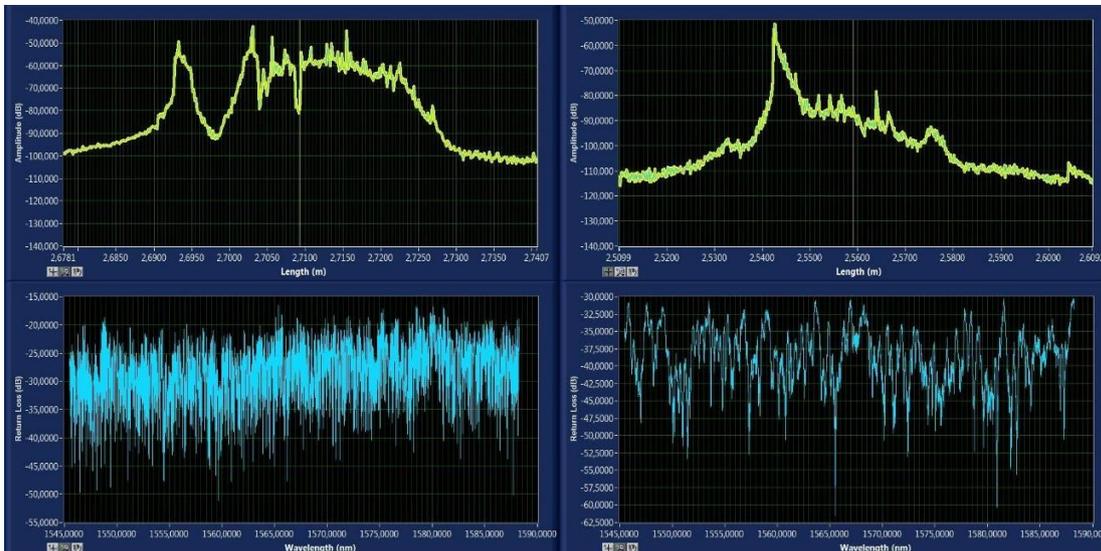


Ilustración 41: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada izquierda y derecha respectivamente del reflector “MDF1”

4.1.2. Reflector MDF2

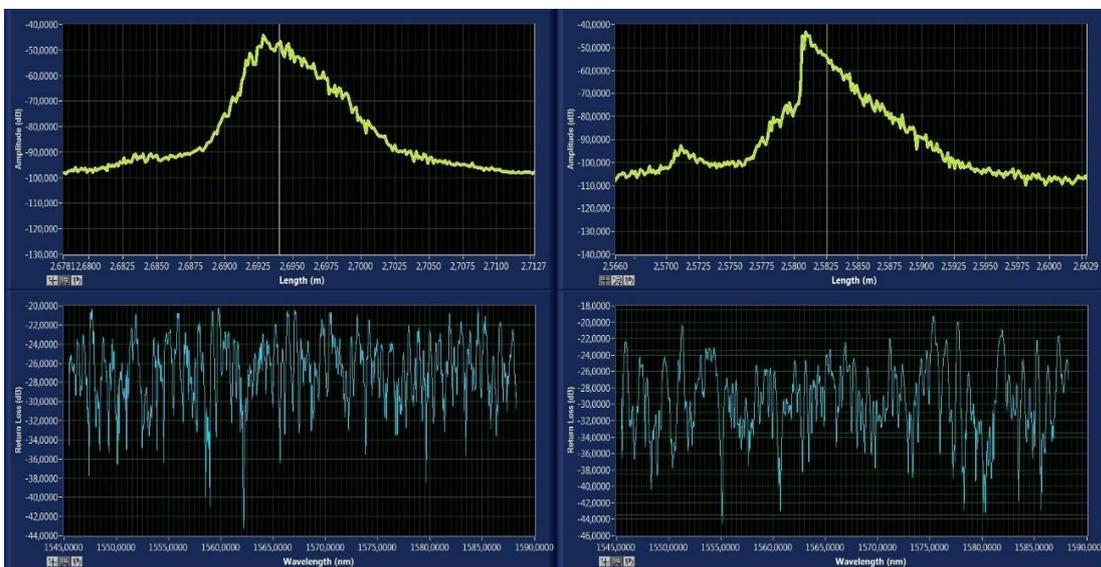


Ilustración 42: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada izquierda y derecha respectivamente del reflector “MDF2”

4.1.3. Reflector MDF3

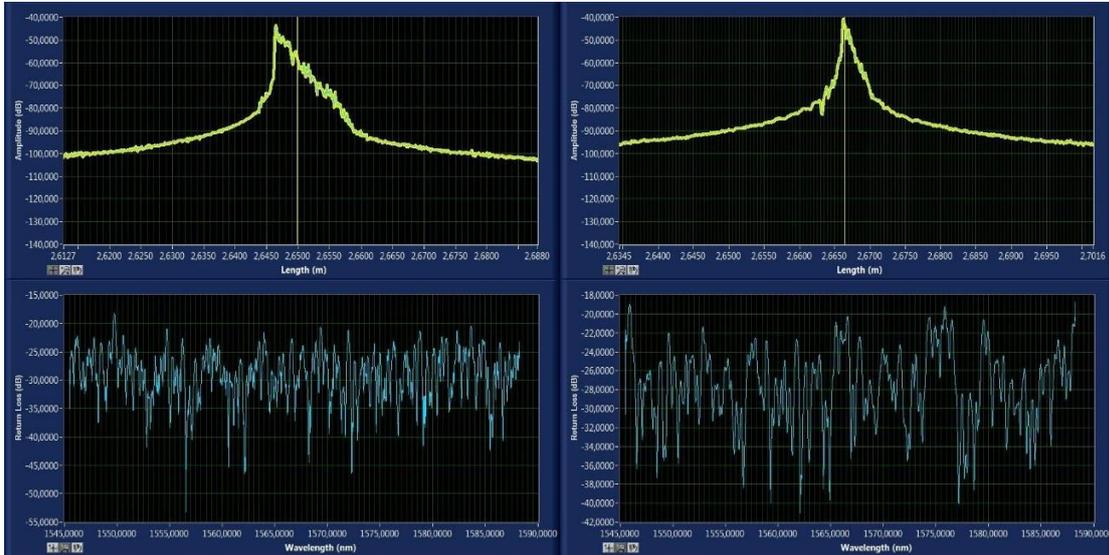


Ilustración 43: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada izquierda y derecha respectivamente del reflector "MDF3"

4.1.4. Reflector MDF4

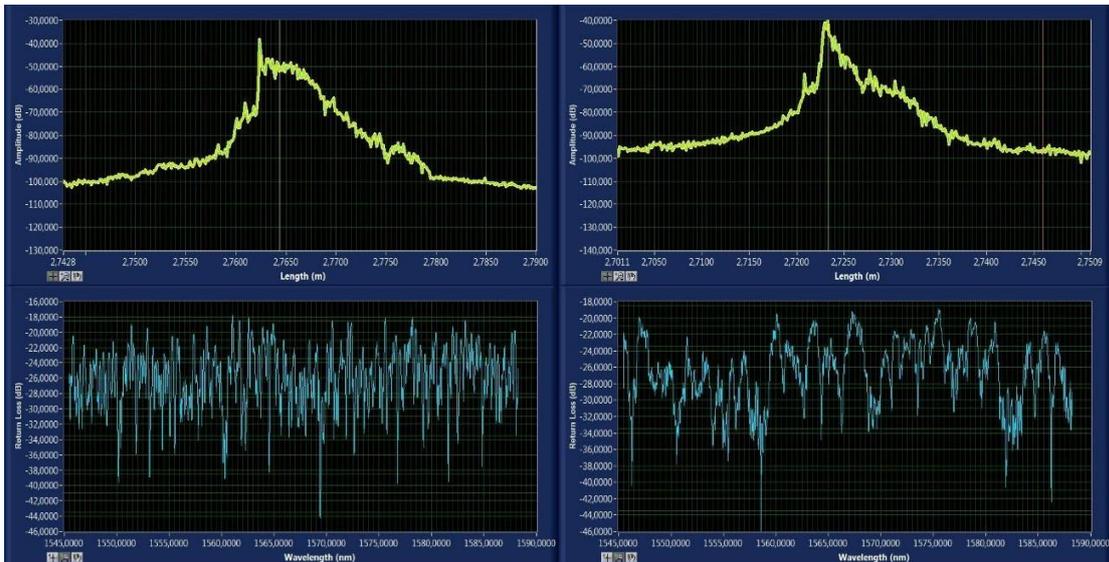


Ilustración 44: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada izquierda y derecha respectivamente del reflector "MDF4"

4.1.5. Comentarios

Como se puede apreciar en los apartados anteriores, las reflexiones obtenidas en las gráficas superiores parecen no obedecer ningún patrón concreto. Las respuestas espectrales obtenidas varían de un reflector a otro, así como de un mismo reflector medido por un extremo o por el otro.

Respecto a las pérdidas de retorno, se concluye que tienen una respuesta bastante plana ya que, no se encuentra ninguna longitud de onda predominante. Además, al igual que en las reflexiones, estas pérdidas de retorno son diferentes entre reflectores y entre las dos entradas de un mismo reflector.

4.2. Caracterización de reflectores basados en estructuras aleatorias MDF en línea

La siguiente estructura a caracterizar, consta de dos inscripciones aleatorias de igual morfología que en el apartado anterior, pero dispuestas en una configuración en línea y con una longitud total de 10 mm.

Ya que se espera una asimetría propia de las estructuras MDF y las dos inscripciones no son idénticas, se realiza una caracterización para cada entrada.

4.2.1. Reflector doble

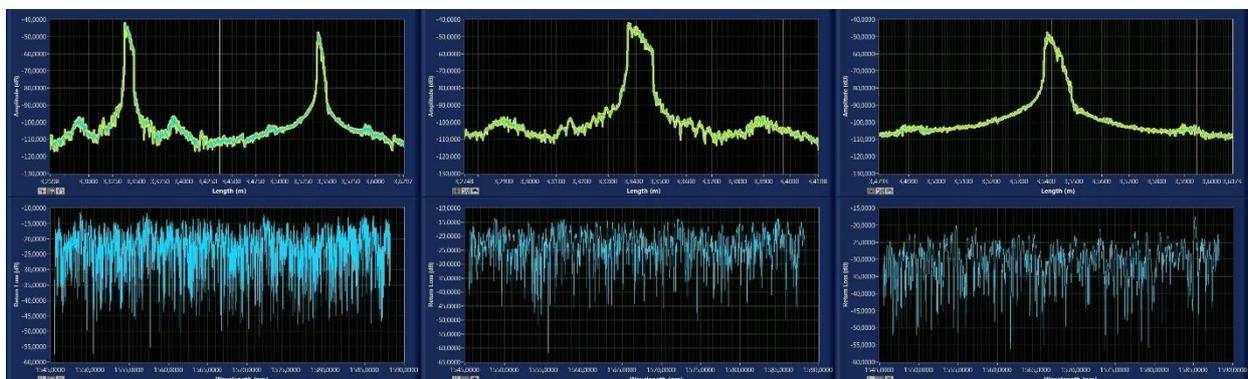


Ilustración 45: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada izquierda y ampliación de los dos picos de izquierda a derecha del reflector doble

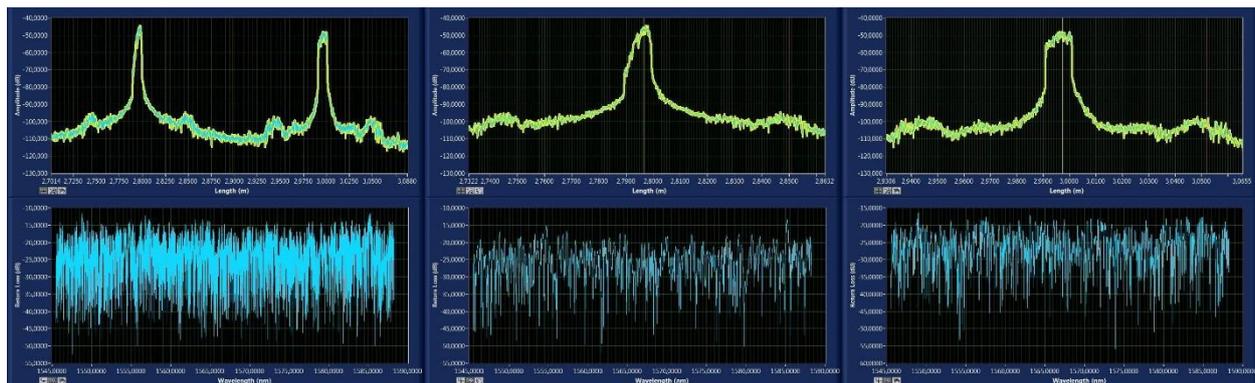


Ilustración 46: Reflexión y pérdidas de retorno de la entrada derecha y ampliación de los dos picos de izquierda a derecha del reflector doble

4.2.2. Comentarios

Tras las caracterizaciones realizadas por ambos extremos, lo primero que llama la atención son dos picos bien definidos con los que se identifican claramente las dos inscripciones aleatorias.

Analizado cada pico con mayor detenimiento, se puede observar que el comportamiento de cada inscripción es similar y su reflexión es dependiente de la entrada.

En cuanto a las pérdidas de retorno se obtienen respuestas más o menos planas, sin longitudes de onda predominantes.

Por lo tanto, se estima que la mayor parte de las reflexiones, serán ocasionadas por el primer segmento inscrito y que el segundo tomara más bien un papel secundario en el comportamiento. Esto quiere decir que será muy determinante el lado por el que se conecte el reflector a la estructura.

4.3. Caracterización de reflectores basados en microcavidades

A continuación, se muestran las caracterizaciones realizadas a los reflectores basados en el segundo tipo de estructura con la que se trabaja en este proyecto, las microcavidades.

En cuanto a la nomenclatura utilizada a continuación, se denominan como “corta” a aquellas microcavidades cuyo tamaño sea inferior a longitud crítica y “larga” a las microcavidades con un tamaño superior a la longitud crítica.

Además, también se caracterizan microcavidades con distintos diámetros de núcleo hueco. Los tamaños de dichos diámetros se encuentran en los nombres de los reflectores, cuyo dígito hace referencia a dicha dimensión.

Por último, se añade al final una fotografía de la microcavidad caracterizada, tomada mediante un microscopio.

4.3.1. Reflector 52.8

Microcavidad corta de diámetro 52,8 μm .

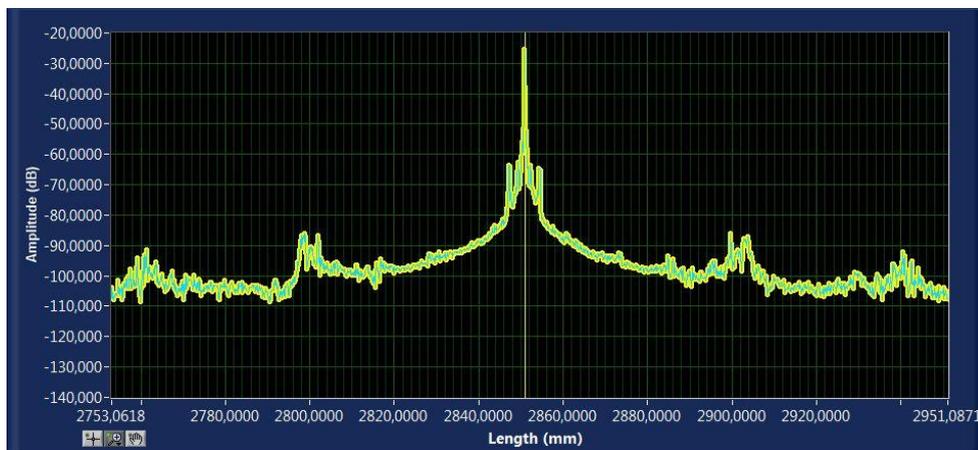


Ilustración 47: Reflexión de "Reflector 52,8" cavidad corta

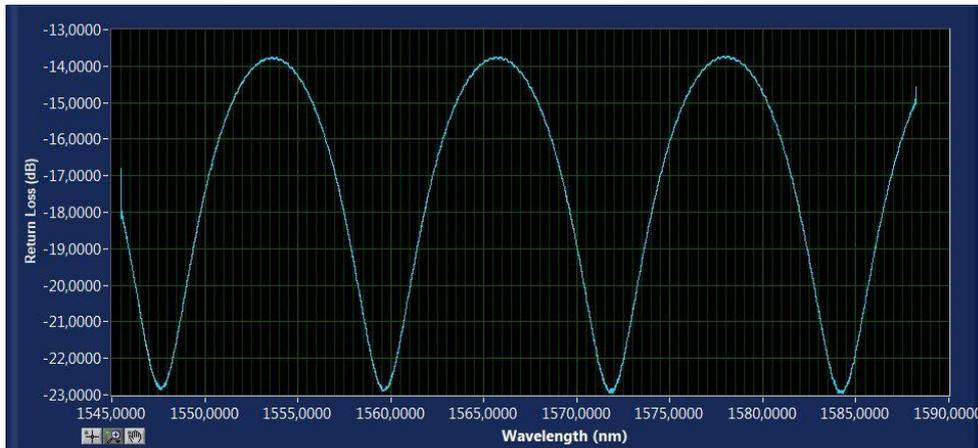


Ilustración 48: Pérdidas de retorno de "Reflector 52,8" cavidad corta

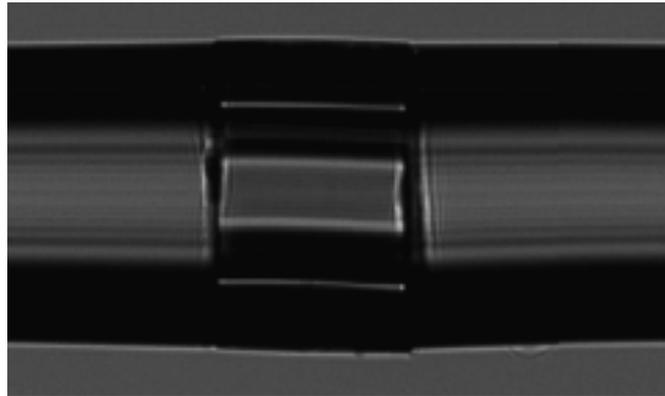


Ilustración 49: Fotografía de "Reflector 52,8" corta

Microcavidad larga de diámetro 52,8 μm .

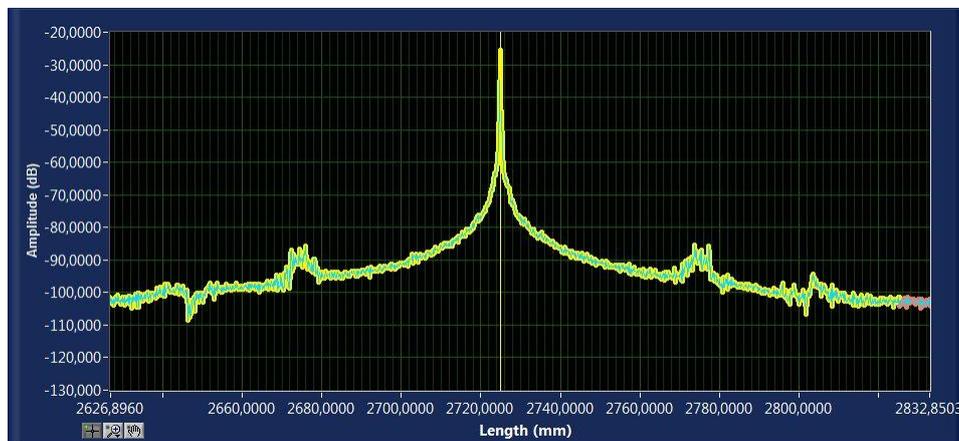


Ilustración 50: Reflexión de " Reflector 52,8" cavidad larga

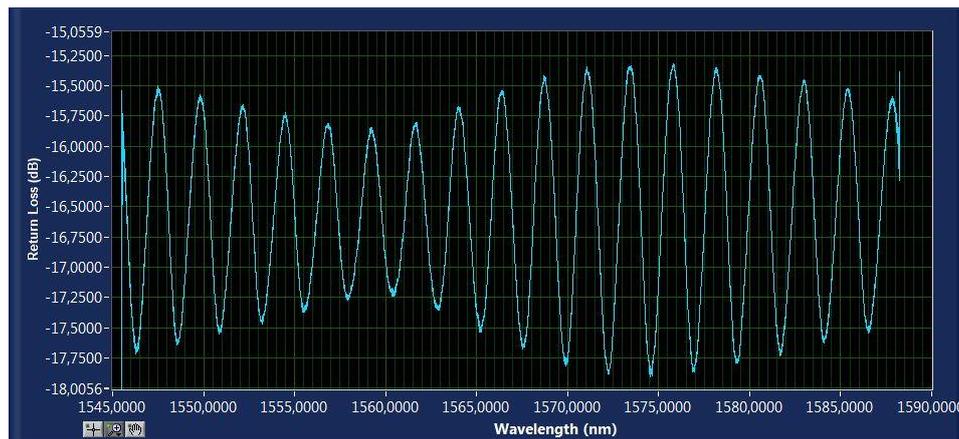


Ilustración 51: Pérdidas de retorno de "Reflector 52,8", cavidad larga

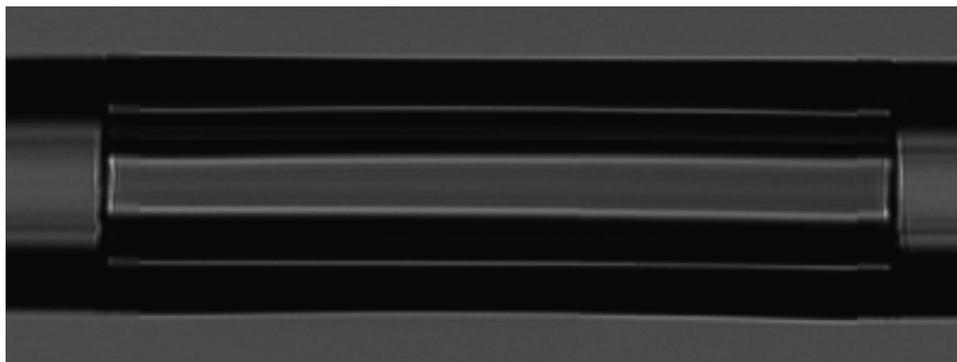


Ilustración 52: Fotografía de " Reflector 52,8" cavidad larga

4.3.2. Reflector 55

Microcavidad corta de diámetro 55 μm .

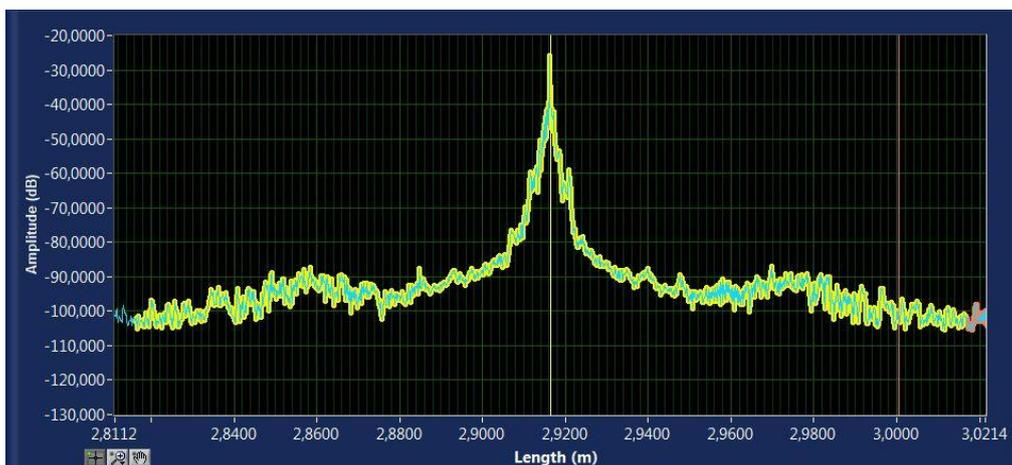


Ilustración 53: Reflexión de " Reflector 55" cavidad corta

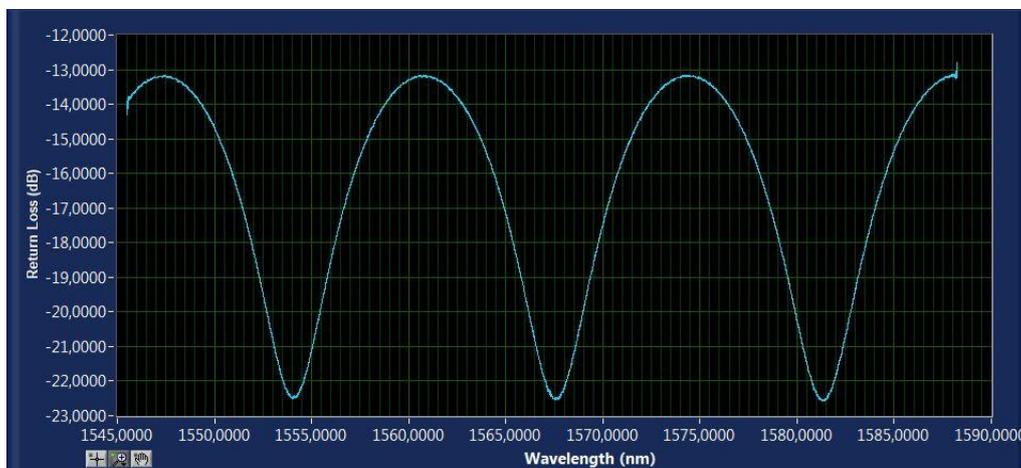


Ilustración 54: Pérdidas de retorno de " Reflector 55" cavidad corta

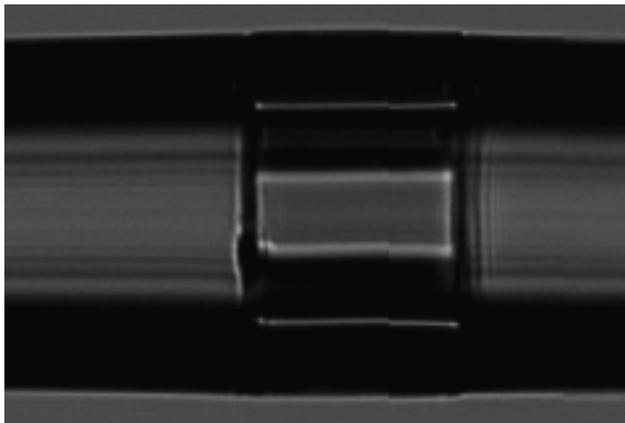


Ilustración 55: Fotografía de " Reflector 55" cavidad corta

Microcavidad larga de diámetro 55 μm .

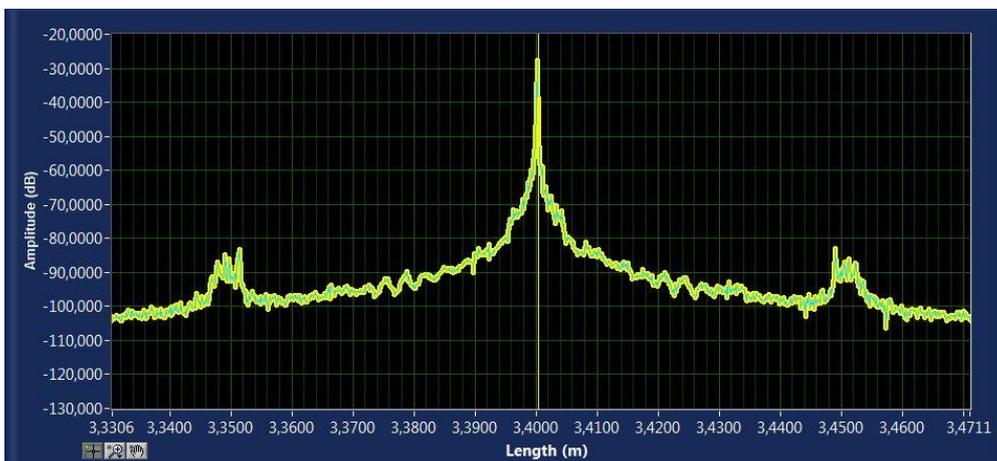


Ilustración 56: Reflexión de " Reflector 55" cavidad larga

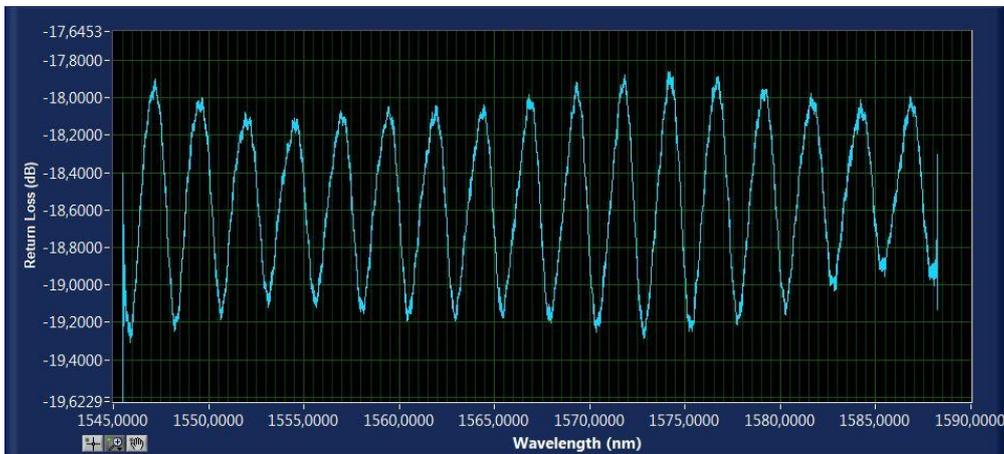


Ilustración 57: Pérdidas de retorno de " Reflector 55" cavidad larga

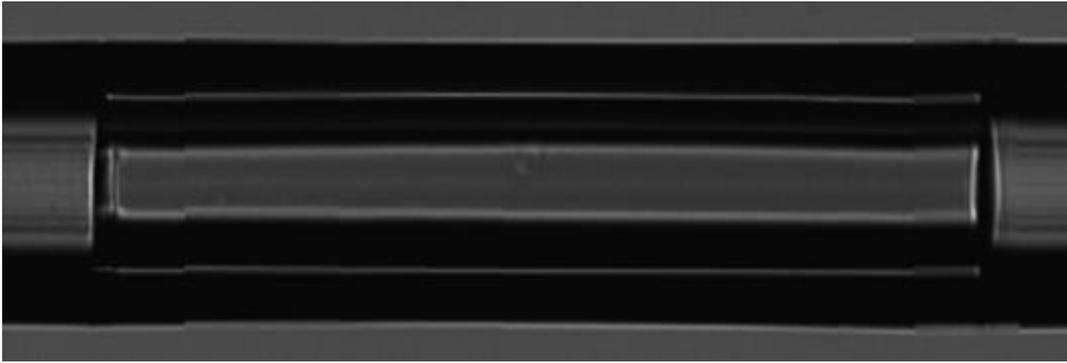


Ilustración 58: Fotografía de " Reflector 55" cavidad larga

4.3.3. Reflector 66

Microcavidad corta de diámetro 66 μm .

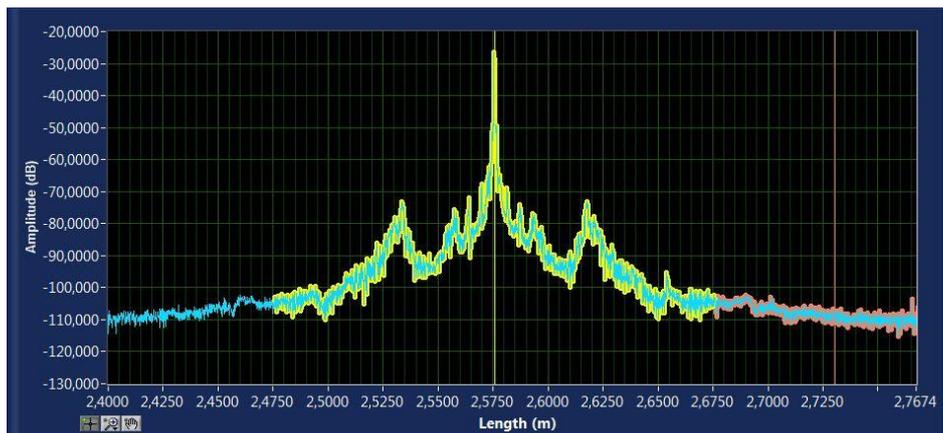


Ilustración 59: Reflexión de " Reflector 66" cavidad corta

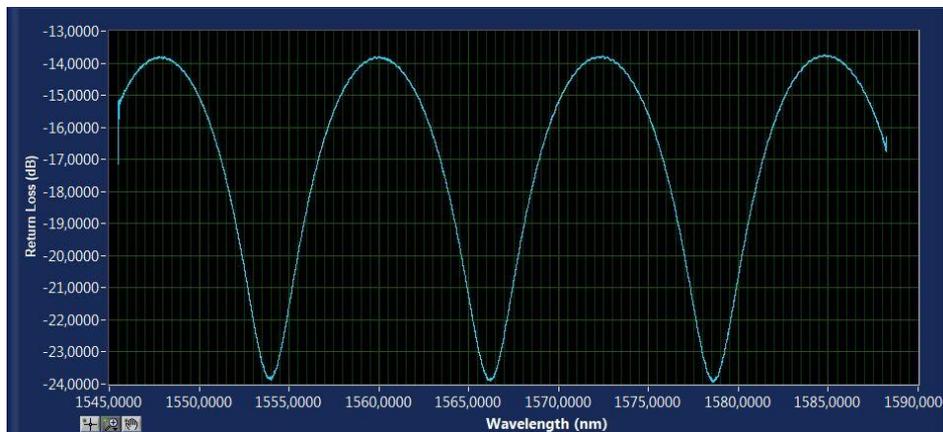


Ilustración 60: Pérdidas de retorno de "Reflector 66" cavidad corta

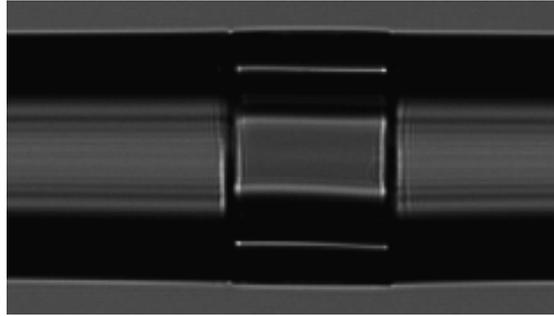


Ilustración 61: Fotografía de "Reflector 66" cavidad corta

Microcavidad larga de diámetro 66 μm .

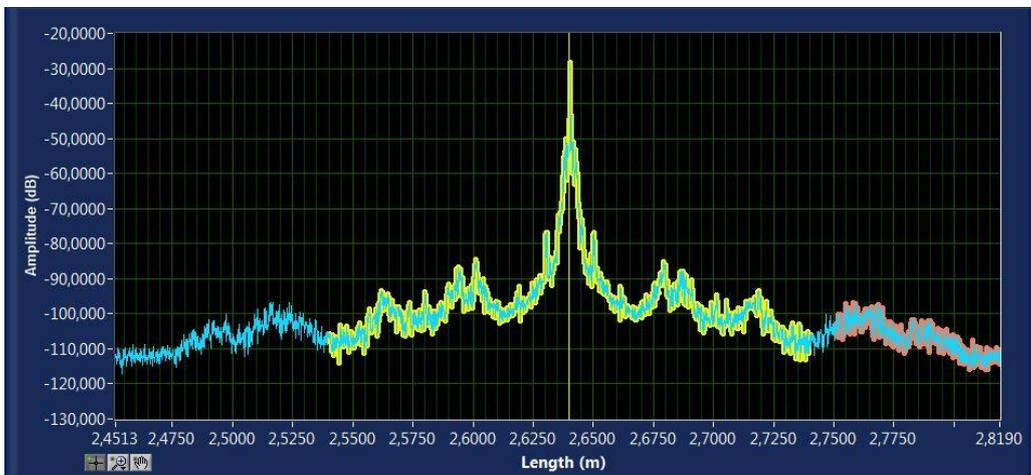


Ilustración 62: Reflexión de "Reflector 66" cavidad larga

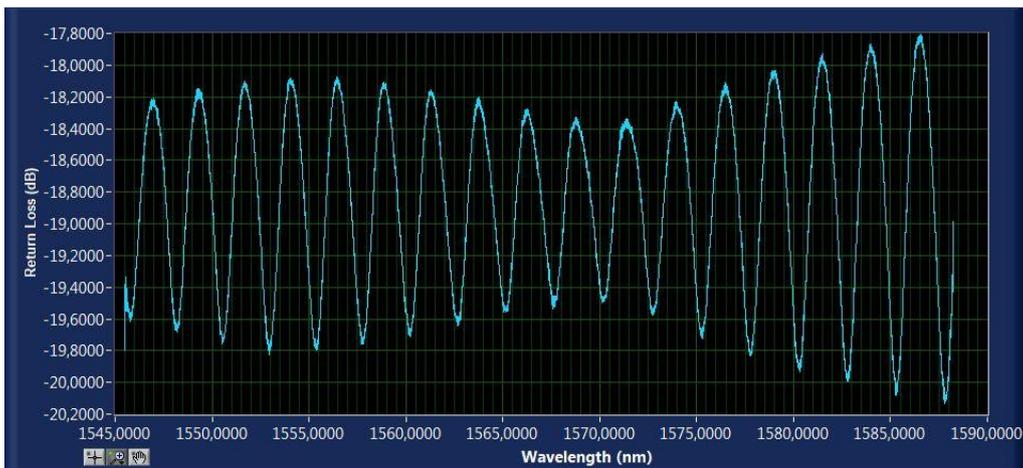


Ilustración 63: Pérdidas de retorno de "Reflector 66" cavidad larga

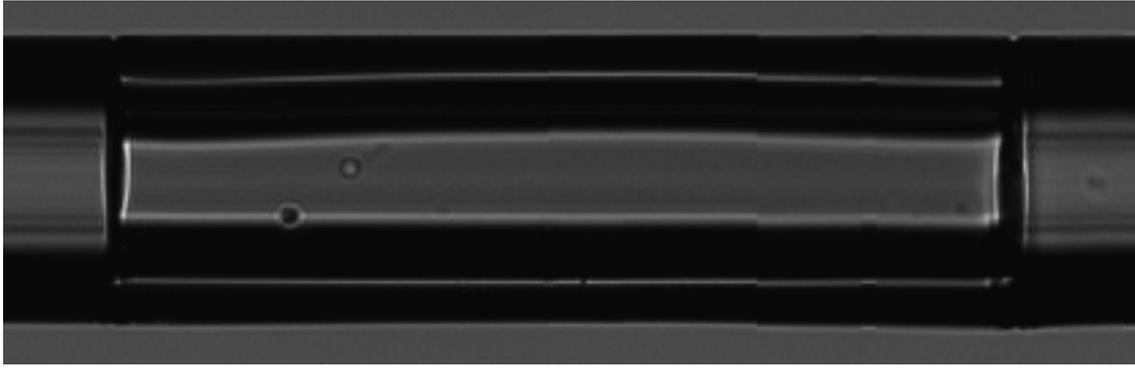


Ilustración 64: Fotografía de "Reflector 66" cavidad larga

4.3.4. Reflector basado en una microcavidad de EDF

Se añade un tramo de fibra dopada con erbio de aproximadamente tres metros al extremo final de una fibra que, contiene una microcavidad como las vistas en los apartados anteriores que posee una cavidad corta, es decir, inferior a la longitud crítica. Se realiza esta modificación en el reflector a la espera de un mejor comportamiento del mismo.

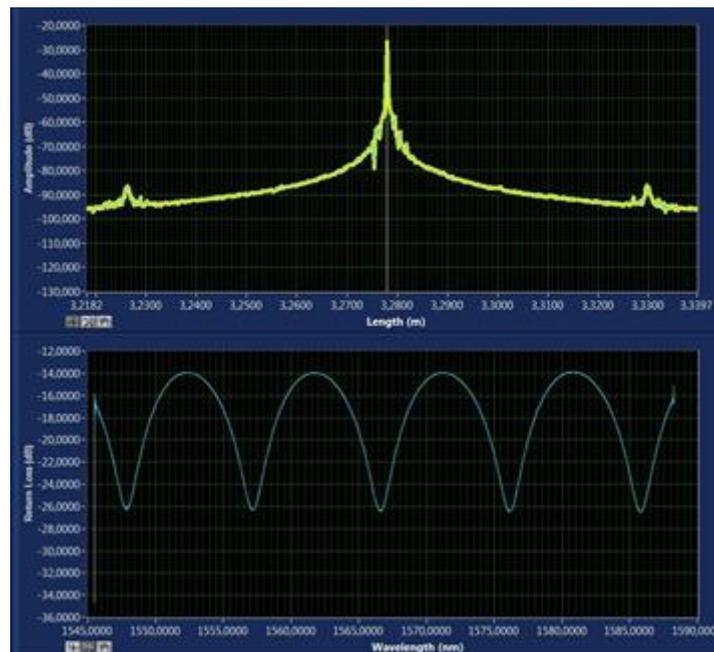


Ilustración 65: Reflexión y pérdidas de retorno de "microcavidad EDF"

4.3.5. Comentarios

En las ilustraciones anteriores (47, 50, 53, 55, 59, 62 y 65), donde queda representada la reflexión a lo largo de la estructura, se puede apreciar un pico



que representa la posición de la microcavidad y dependiendo de la calidad de la soldadura de la cavidad, se puede determinar la longitud de la misma.

Los resultados en las gráficas inferiores a las citadas en el párrafo anterior (46, 48, 51, 54, 56, 63 y 65), representan las pérdidas de retorno, que aportan información útil sobre el comportamiento de la cavidad.

En todos los casos, en las pérdidas de retorno, se aprecia una señal periódica y cuasi-senoidal cuya frecuencia, viene determinada por la longitud de la cavidad. Esto indica que la microcavidad, como es de esperar, se comporta como una cavidad Fabry-Perot o más concretamente como un láser Fizeau.

Ahora bien, dependiendo de la longitud de la microcavidad se obtienen dos reflectancias distintas.

En el caso de que la longitud sea menor que la longitud crítica, se aprecia una reflectancia periódica limpia, pero, en el caso en que la longitud es mayor que la longitud crítica, se observa una modulación en la envolvente de dicha reflectancia periódica. Estos batidos, culpables de dicha modulación, son fruto de la interferometría que se ocasiona en la cavidad y cuya aparición es dependiente de la longitud crítica.

Por último, cabe dedicar unas palabras a la microcavidad del apartado 4.3.4. e ilustración 65, a la que se le ha añadido un tramo de fibra dopada con erbio. Con dicha modificación, se aprecia que las reflexiones poseen una mayor potencia y un pico más estrecho y definido. Además, la reflectancia nos indica que se trata de una microcavidad con una longitud inferior a la longitud crítica. En conclusión, el comportamiento es similar a sus homónimas, pero aumentando la potencia de las reflexiones, fenómeno esperado al introducir una etapa de amplificación.



Capítulo 5: Láseres y sensores basados en MDF

Una vez presentado el marco teórico, el proceso de fabricación y caracterización de los reflectores, así como la instrumentación necesaria para llevar a cabo este trabajo fin de estudios, es el momento de seleccionar y poner a prueba las estructuras generadas como parte de un láser de fibra óptica y sus posibles aplicaciones en el campo de los sensores ópticos.

Por ello, en este capítulo se seleccionarán las estructuras que ofrezcan mejores características y cumplan los requisitos y especificaciones necesarios para desempeñar la función tanto de reflector como de elemento sensor. Se analizarán sus parámetros tanto en términos de calidad de emisión láser como su sensibilidad frente a variaciones de parámetros físicos como la temperatura o elongación (strain).

Para finalizar, se realizará una comparativa de las distintas configuraciones estudiadas y sus características.

5.1. Selección de los reflectores basados en MDF

Analizados los resultados de las caracterizaciones de los reflectores recopilados en el capítulo anterior, al tratarse de estructuras muy similares entre ellas, se seleccionarán aquellas que presenten un mayor potencial como reflector en una cavidad láser lineal.

Este paso es sumamente delicado ya que, al no existir una referencia con la cual comparar los resultados de las caracterizaciones, la selección de un buen reflector es mayoritariamente dependiente de la experiencia.

En el caso de los reflectores MDF se selecciona el MDF2. Esta elección ha sido determinada por presentar una reflexión relativamente lineal y uniformemente distribuida, además de poseer la mejor simetría independientemente de la entrada.

Entre los reflectores basados en dos tramos de MDF dispuestos en cascada, el seleccionado ha sido el llamado como “reflector doble”. Al tratarse de estructuras cuya fabricación todavía es compleja, únicamente se disponían de dos reflectores de este tipo. Desgraciadamente uno de ellos se rompió durante el proceso de las primeras caracterizaciones por lo que únicamente se dispone del seleccionado.



Respecto a los reflectores basados en microcavidades de EDF, se elige la que se ha mostrado en la ilustración 63. Este reflector ha sido seleccionado principalmente porque posee una longitud de cavidad menor que la longitud crítica y, por lo tanto, su espectro en reflexión será una señal cuasi-senoidal limpia. Además, el tramo dopado con erbio funcionará como medio activo en la cavidad láser.

En resumen, tras haber realizado un estudio de las distintas caracterizaciones y haber comparado distintos parámetros y resultados, se han seleccionado finalmente tres reflectores que serán introducidos y puestos a prueba en una cavidad láser lineal.

5.2. Diseño y montaje de la cavidad lineal del láser

Este trabajo se ha centrado principalmente en el diseño de láseres de cavidad lineal cuya función para su uso como sensores de temperatura o strain.

Para tal finalidad, se deberá comprobar el comportamiento de los reflectores escogidos en diferentes configuraciones láser con objeto de compararlos y observar cual posee mejores características. Por lo tanto, el primer paso será comenzar por la etapa de diseño.

5.2.1. Diseño de la configuración del amplificador

Todos los láseres que se pretenden diseñar comparten una estructura básica denominada etapa amplificadora. En este caso, dicha estructura (ilustración 67), está formada por un láser de bombeo de 980 nm, un WDM y un tramo de tres metros de fibra dopada con erbio del tipo I25.

Como todos los montajes posteriores se realizarán a partir de esta estructura, es importante conocer el comportamiento del medio amplificador. Para ello, se caracteriza esta estructura básica tomando medidas mediante el OSA en dos puntos concretos denominados en las siguientes imágenes como "PUNTO 1" y "PUNTO 2" con un bombeo centrado en torno a los 980 nm y una corriente de 200 mA.

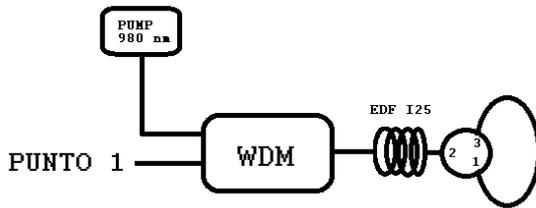


Ilustración 66: Etapa amplificadora junto a un circulator

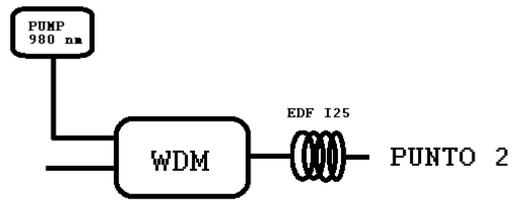


Ilustración 67: Etapa amplificadora

Cabe mencionar, que estas estructuras todavía no pueden ser denominadas como láser ya que, no contiene en ninguno de los dos casos dos reflectores de cavidad. Por lo tanto, los resultados obtenidos que se muestran a continuación representan la curva de emisión espontánea amplificada (ASE) del medio de ganancia, en concreto, la perteneciente a la fibra dopada con erbio I25.

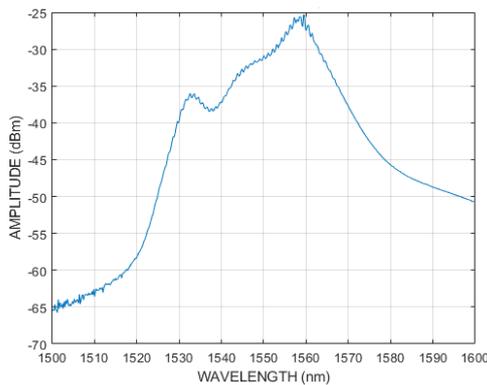


Ilustración 68: ASE medido en el "PUNTO 2"

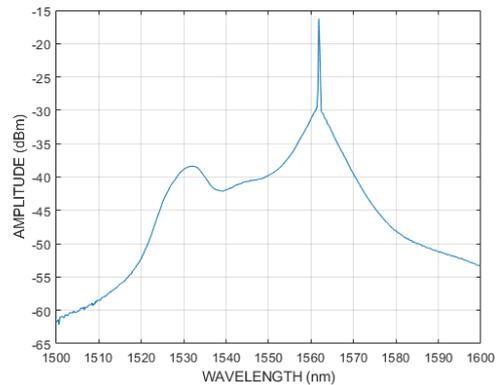


Ilustración 69: ASE medido en el "PUNTO 1"

Mientras que en la ilustración 68 (medida en "PUNTO 2"), se observa únicamente el ASE del erbio I25 generado al final del medio amplificador, en la ilustración 69 (medida en "PUNTO 1"), se observa la misma ASE, pero con una emisión espontánea en torno a 1550 nm.

5.2.2. Diseño de las configuraciones de la cavidad láser

El segundo paso tras haber diseñado un medio amplificador es encontrar las distintas configuraciones de láseres que se adapten o funcionen correctamente con los reflectores escogidos.

Se diseñarán configuraciones láser que posteriormente serán montadas en el laboratorio donde se realizará la etapa de caracterización. En este caso, se han diseñado cuatro configuraciones a continuación expuestas.

5.2.3.1. Configuración 1

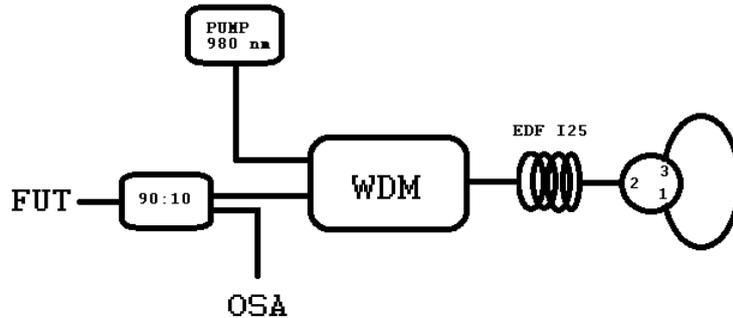


Ilustración 70: Configuración láser 1

La configuración 1 se trata de una arquitectura básica de láser con cavidad lineal. A la derecha del medio amplificador hay un circulator con dos de sus terminales unidos para formar un lazo (FLM: *Fiber Loop Mirror*) conectado al tramo de fibra dopada con erbio. En el otro extremo, a la salida del WDM se encontrará el reflector seleccionado y denominado como FUT (*Fiber Under Test*). El bombeo como se ha mencionado con anterioridad, será de 980 nm. Por último, se incorpora un acoplador óptico de una entrada y dos salidas con relación de acoplo 90:10 donde se conectará el OSA.

Se elige esta configuración al tratarse de un esquema básico y comúnmente utilizado al cual, se le podrán añadir o modificar componentes en la etapa experimental.

5.2.3.2. Configuración 2

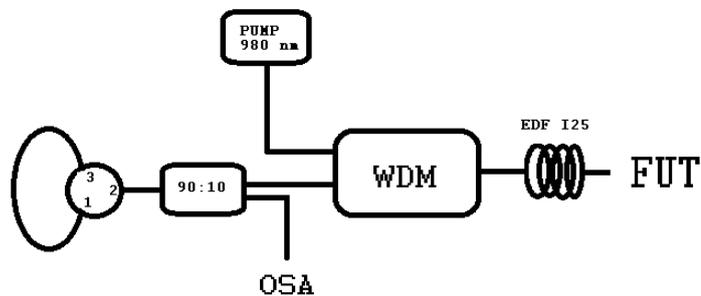


Ilustración 71: Configuración láser 2

La configuración 2 posee los mismos principios que la configuración 1 y es escogida por los mismos motivos. La diferencia radica en que se intercambian los reflectores de posición. En esta estructura, la FUT se coloca en el extremo derecho en serie con el tramo de fibra dopada mientras que, el circulador que cumple también la función de reflector se coloca a la izquierda.

5.2.3.3. Configuración 3

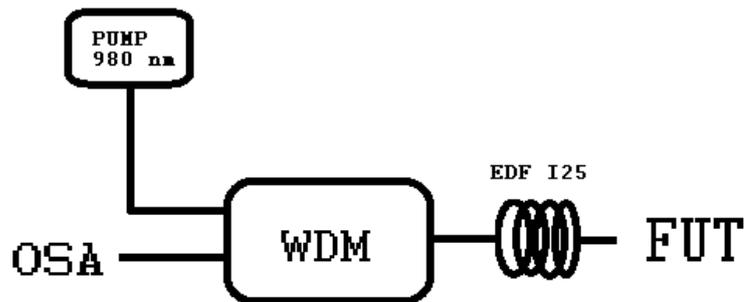


Ilustración 72: Configuración láser 3

En la configuración 3, se puede observar que se trata de una cavidad con un único reflector. Es la estructura más simple con la que se va a contar ya que prácticamente se trata del medio amplificador seguido de un reflector basado en una MDF.

5.2.3.4. Configuración 4

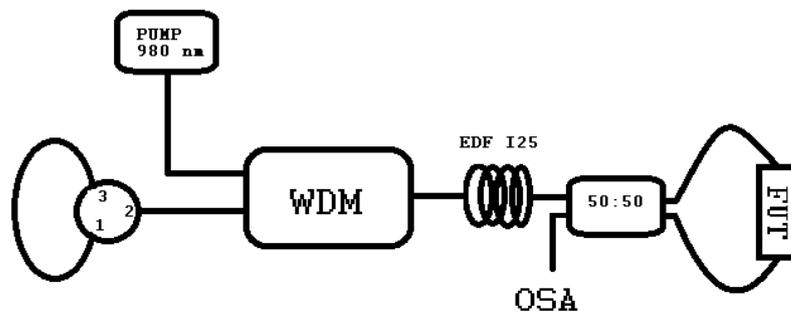


Ilustración 73: Configuración láser 4

En la última configuración, se colocará el reflector o FUT conectado por sus dos extremos y conectados a un divisor 50:50 de dos entradas y dos salidas. Esta estructura se comportará como un interferómetro. Al otro lado, se encuentra un circulador a la salida del WDM ejerciendo de segundo reflector.

5.3. Caracterización de los láseres generados

Llegados a este apartado del capítulo, ya se dispone de todos los reflectores necesarios y de los diseños de los láseres que deben ser montados en el laboratorio. Por ende, falta realizar la construcción de las distintas estructuras láser con los diferentes reflectores con el fin de comprobar empíricamente el comportamiento del láser generado. Añadir que las siguientes caracterizaciones se han realizado con el OSA.

Tras los resultados obtenidos, se seleccionará la estructura láser que mejores características y prestaciones presente para actuar en última instancia como sensor.

5.3.1. Cavidad láser con un reflector doble

Los primeros montajes llevados a cabo se han realizado con la entrada marcada como L (*left*) del reflector doble. Este reflector será puesto a prueba para las configuraciones uno, dos y tres. El motivo subyacente a esta elección se debe principalmente a la estructura del reflector. Al tratarse de dos tramos de MDF conectados en serie (los cuales generan gran reflectancia), no resultaría satisfactorio que fuesen introducidos en una configuración basada en la interferometría como lo es la configuración cuatro. Se obtendrían reflexiones significativas en ambos extremos y no intervendrían los dos tramos conjuntamente.

5.2.3.5. Configuración 1 + reflector doble

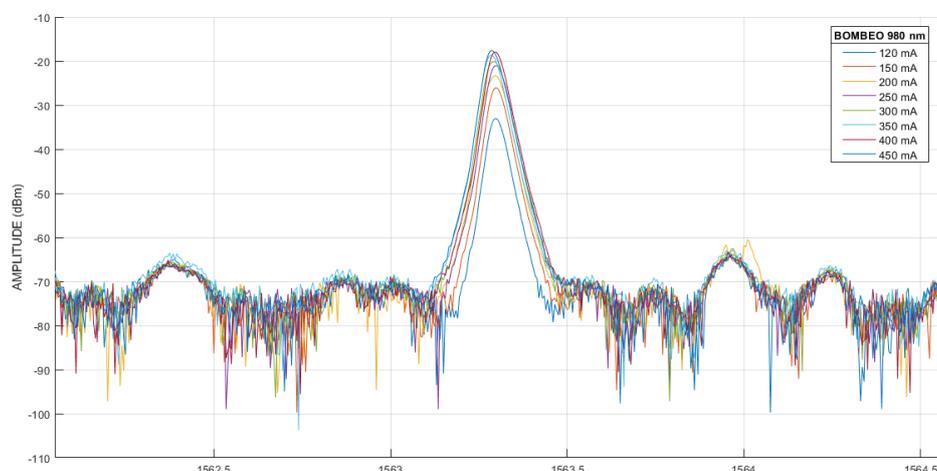


Ilustración 74: Espectro del OSA para configuración 1 y "Reflector doble" en entrada L

La ilustración 74, representa el espectro óptico obtenido mediante el OSA para diferentes niveles de bombeo. Se genera una única línea de emisión, aparentemente bastante estable (aunque no se realizaron medidas de su variación en potencia de salida con el tiempo) y centrada en torno a 1563,25 nm con una potencia de salida de -17,6 dBm para una corriente de bombeo de unos 450 mA.

En cuanto al nivel de ruido, se encuentra en torno a -70 dBm y se pueden apreciar ciertos lóbulos laterales, aunque de muy poca relevancia. Por lo tanto, la OSNR que se obtiene en esta línea de emisión es de 52,5 dB.

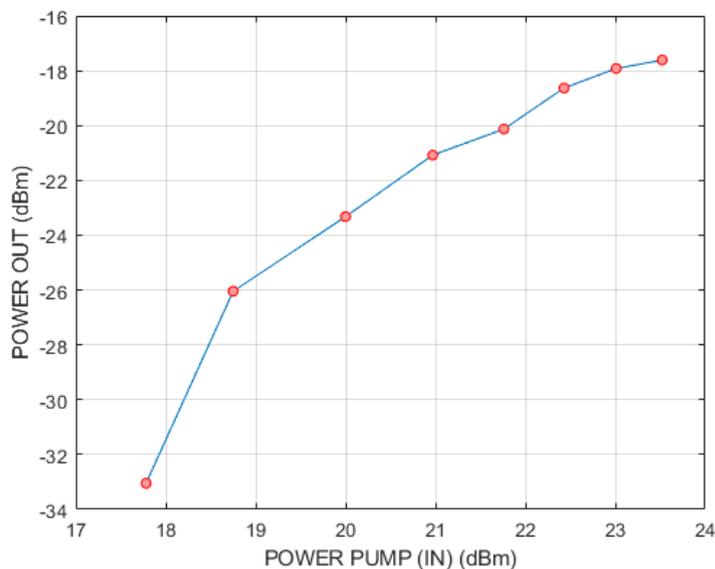


Ilustración 75: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida

Por último, en la gráfica anterior (ilustración 75), se muestra la potencia de entrada frente a la potencia de salida en dBm. La potencia de salida ha sido calculada con una responsividad del láser de bombeo de 0,5 mW/mA.

5.2.3.6. Configuración 2 + reflector doble

Mediante la configuración 2, se obtiene de igual forma una única línea de emisión centrada en torno a los 1563,25 nm. En este caso, la potencia máxima de salida ha sido de -10 dBm para un bombeo de 450 mA, lo que significa un mayor nivel de salida en comparación con la configuración 1.

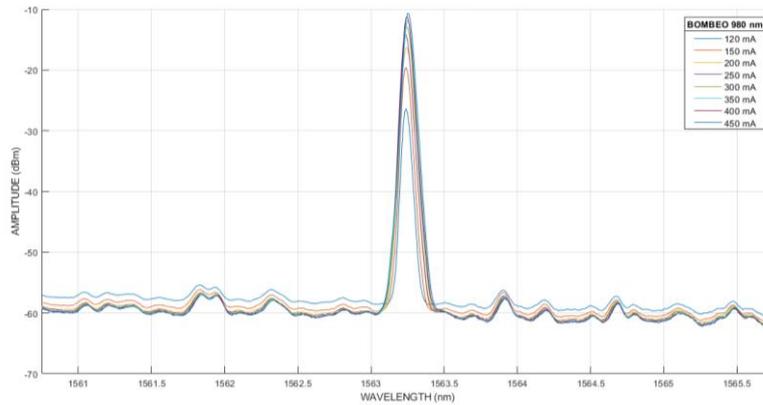


Ilustración 76: Espectro del OSA para configuración 2 y "Reflector doble" en entrada L

En cuanto al ruido, decae conforme se aumenta el bombeo y ronda los -60 dBm, posee una respuesta más plana y los lóbulos secundarios son apenas apreciables. Se genera entonces una emisión con una OSNR de unos 50 dB.

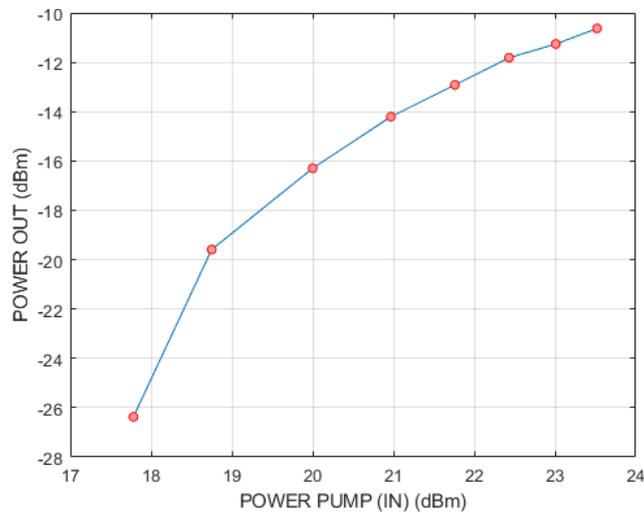


Ilustración 77: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida para configuración 2 con reflector "Reflector doble" en entrada L (Pin vs. Pout)

5.2.3.7. Configuración 3 + reflector doble

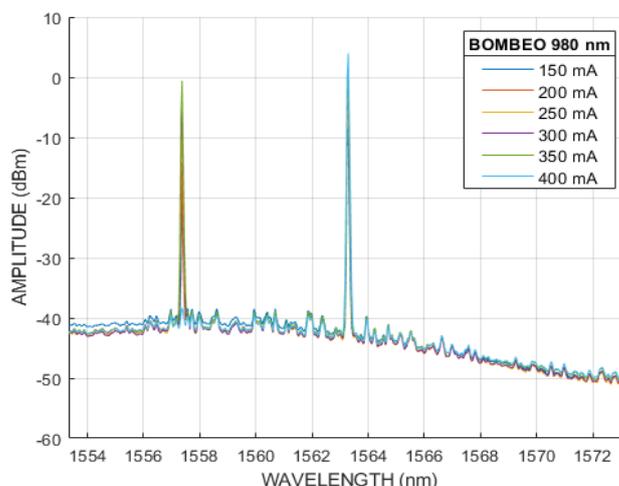


Ilustración 78: Espectro del OSA para configuración 3 y "Reflector doble" en entrada L

En esta tercera estructura, muy similar a la segunda, pero prescindiendo de un circulador como segundo reflector, se obtienen dos líneas de emisión: una en torno a 1563,25 nm y otra en torno a 1557 nm.

Una de las líneas de emisión es más estable pero la segunda de ellas es muy inestable, y aparece y desaparece dependiendo de cómo se coloquen los elementos que conforman la cavidad del láser, lo que hace pensar que es dependiente de la polarización. La potencia de salida de la segunda línea de emisión es de unos 4 dBm con un bombeo de 400 mA, pero dependerá de la amplitud que posea la otra línea de emisión en ese momento dado que se encuentran en una configuración basada en EDF y por consiguiente existe una gran competencia por la ganancia.

El ruido se encuentra en torno a los -40 dBm lo que se traduce en una OSNR de unos 38 dB, bastante inferior en comparación con las dos configuraciones anteriores.

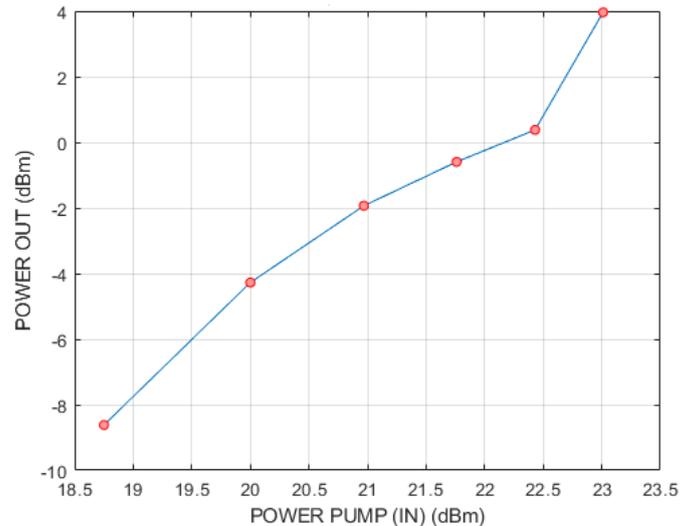


Ilustración 79 : Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida en configuración 3 con "Reflector doble" en entrada L (Pin vs. Pout)

La ilustración 79 muestra el comportamiento de la potencia de salida del pico centrado en 1563,25 nm a medida que se aumenta la potencia de bombeo. Esta configuración, al ser multilínea deja de ser tan interesante para nuestras aplicaciones.

5.3.2. Láser con microcavidad de EDF

Los siguientes láseres y caracterizaciones que han sido generados con el segundo tipo de reflector, se han comprobado mediante las configuraciones 1 y 2. Esto se debe que en la configuración 3, al solo poseer un reflector, se generarán demasiadas pérdidas debidas a la transmisión en la microcavidad y, por lo tanto, no se generará una cavidad con emisión láser. En cuanto a la configuración 4, como se trata de un reflector asimétrico y con una única entrada, conectarlo en la posición establecida de forma interferométrica resulta imposible.

5.3.2.1 Configuración 1 + microcavidad EDF

A primera vista, se observa en el espectro obtenido (ilustración 80), que no existe una línea de emisión sino más bien un conjunto de emisiones en torno a una zona (alrededor de los 1562 nm) y que posee un ancho de 1 nm aproximadamente.

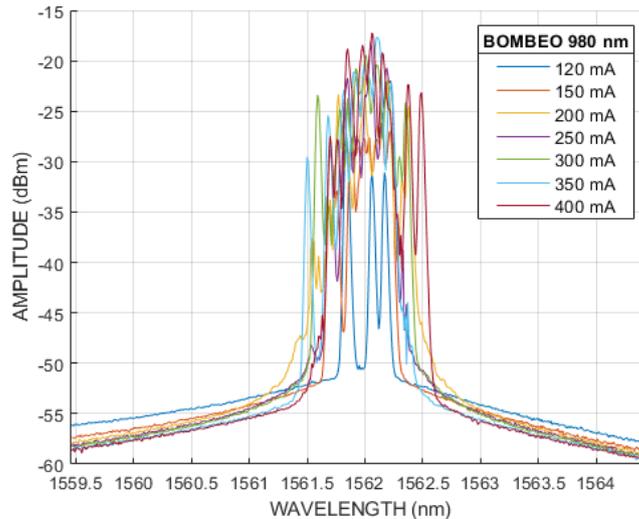


Ilustración 80: Espectro del OSA para configuración 1 y microcavidad EDF

También se aprecia que conforme aumenta el bombeo, las líneas de emisión con mayor potencia no se mantienen en términos de longitud de onda, lo que indica que se trata de un láser muy poco estable.

Para una corriente de bombeo de 400 mA, la potencia media que se genera en la línea de emisión es de -17,25 dBm.

En cambio, aunque se generan muchos picos de emisión, las zonas laterales son muy planas y se centran sobre -55 dBm, lo que da lugar a una OSNR de 37,75 dB.

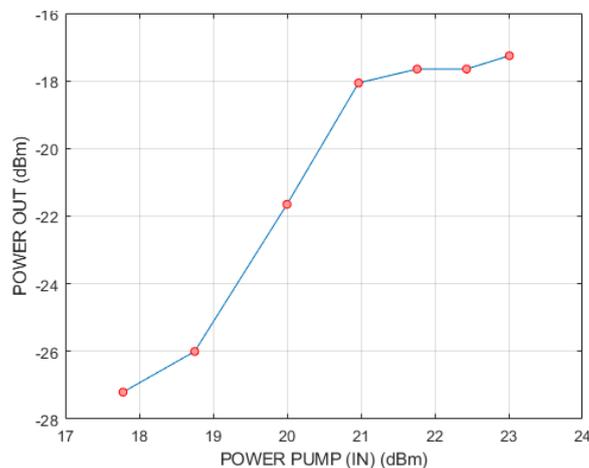


Ilustración 81: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia del láser en configuración 1 con reflector microcavidad de EDF

La ilustración 81 muestra el comportamiento de la potencia de salida del pico principal (el que mayor potencia posee y que se encuentra en 1562 nm) a medida que se aumenta la potencia de bombeo. Esta configuración, al poseer una multi emisión, deja de ser tan interesante para nuestras aplicaciones.

5.3.2.1 Configuración 2 + microcavidad EDF

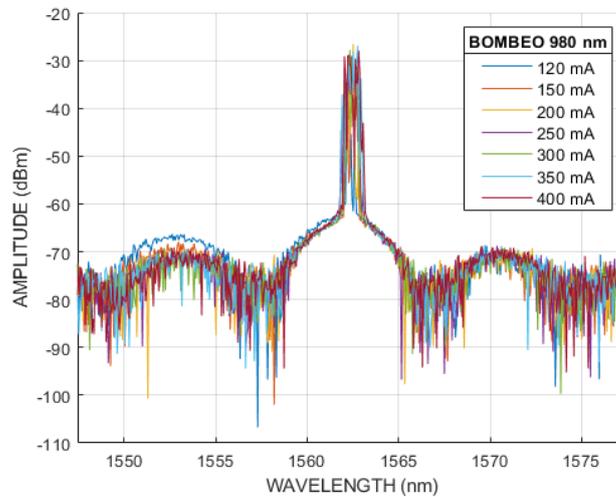


Ilustración 82: Espectro del OSA para configuración 2 y reflector "BURBUJA + EDF"

En la configuración 2 se presenta una caracterización muy similar a la anterior. Se genera una emisión con numerosos picos emitiendo en torno a 1562 nm y con una potencia de pico de unos de -26 dBm para un bombeo de 400 mA. Esta emisión al igual que la anterior, se encuentra en un máximo de los lóbulos periódicos los cuales son generados por la interferometría Fabry-Perot dada en el reflector basado en una microcavidad.

El nivel de ruido medio se encuentra en -65 dBm lo que se traduce en una OSNR de unos 39 dB, un valor algo superior en comparación con el obtenido para la configuración dos.

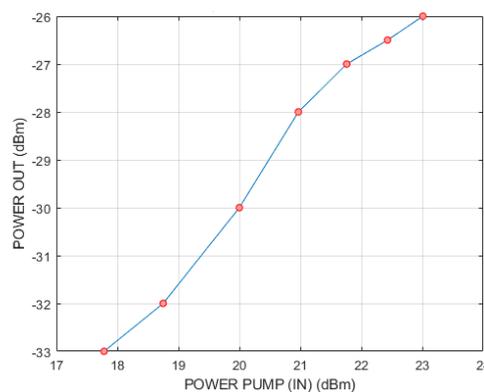


Ilustración 83: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia del láser en configuración 2 con reflector microcavidad de EDF

La ilustración 83 muestra el comportamiento de la potencia de salida del pico principal (el que mayor potencia posee y que se encuentra en 1562 nm) a medida que se aumenta la potencia de bombeo. Esta configuración, al poseer una multi emisión, deja de ser tan interesante para nuestras aplicaciones.

5.3.3. Láser con reflector MDF2

El último montaje experimental puesto a prueba con el reflector basado en inscripciones pseudoaleatorias, ha sido construido mediante el diseño de la configuración 4. Esta decisión ha sido motivada ya que, al ser un único tramo aleatorio y no presentar una simetría dependiente de la entrada, se cree que tendrá un comportamiento excelente en una estructura basada en interferometría.

5.3.3.1. Configuración 4 + reflector MDF2

Esta configuración presenta una única línea de emisión con un lóbulo bien definido y una aparente estabilidad tanto en potencia de salida como en longitud de onda de emisión.

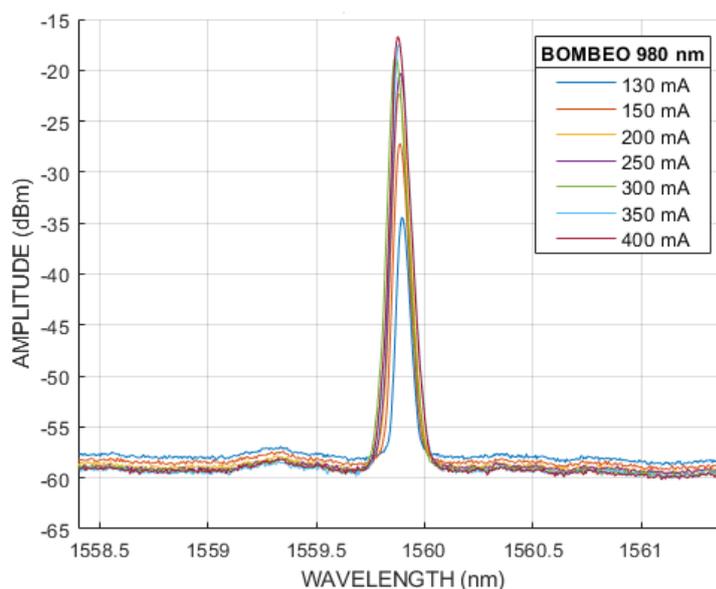


Ilustración 84: Espectro del OSA para configuración 4 y reflector MDF2

Además, el ruido posee una respuesta muy plana. A medida que aumenta la corriente de bombeo, la potencia de salida aumenta y el ruido disminuye llegando a un valor máximo de -16,6 dBm para 400 mA de corriente bombeo y un nivel de ruido de -59 dBm.

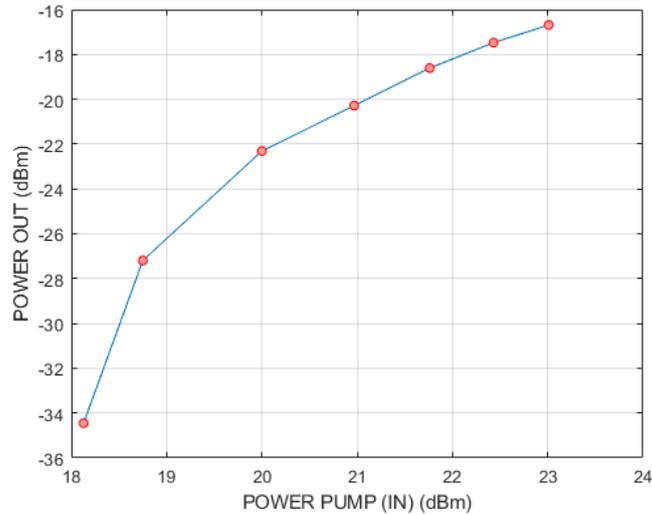


Ilustración 85: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia del láser en configuración 4 con reflector "MDF2" (Pin vs. Pout)

La ilustración 85 muestra el comportamiento de la potencia de salida del pico principal (1563,25 nm) a medida que se aumenta la potencia de bombeo.

5.3.4. Comparativa de resultados

Para finalizar el apartado en el que se han caracterizado los láseres obtenidos, se pretende realizar una breve recopilación de dichos resultados con objeto de comparar las características de entre los distintos reflectores y así, seleccionar la configuración láser que será caracterizada como sensor.

Las siguientes tablas reúnen los valores más relevantes a la hora de determinar la calidad de los láseres implementados.

REFLECTOR DOBLE	Corriente de bombeo [mA]	Potencia de salida [dB]	Ruido [dB]	OSNR [dB]
Configuración 1	450	-17,6	-70	52,4
Configuración 2	450	-10	-60	50
Configuración 3	400	4	-42	38

Tabla 5: Resultados del reflector doble

MICROCAVIDAD EDF	Corriente de bombeo [mA]	Potencia de salida [dB]	Ruido [dB]	OSNR [dB]
Configuración 1	400	-17,25	-55	37,75
Configuración 2	400	-26	-65	39

Tabla 6: Resultados del reflector microcavidad EDF



MDF2	Corriente de bombeo [mA]	Potencia de salida [dB]	Ruido [dB]	OSNR [dB]
Configuración 4	400	-16,6	-59	42,4

Tabla 7: Resultados del reflector MDF2

Respecto a los láseres construidos mediante el reflector doble (ver tabla 5), la configuración 3 es la más eficiente ya que, a menor corriente de bombeo se obtiene una mayor potencia de salida. En contrapartida, posee la peor OSNR.

Por otra parte, la configuración 1 posee la mejor OSNR. Pero al tratarse de una cuestión de compromiso entre potencia y OSNR se decide que la mejor configuración es la 2. Esto se debe a que posee una OSNR satisfactoria y además una potencia de emisión considerable.

Referido a los láseres construidos mediante el reflector Microcavidad EDF (ver tabla 6), se observa una OSNR muy similar, aunque la diferencia de potencias es alta. Por ello la seleccionada ha sido la configuración 1.

El siguiente paso es comparar las estructuras:

- configuración 2 y el reflector doble denominada “Láser 1”
- configuración 1 y reflector Microcavidad EDF denominada “Láser 2”
- configuración 4 y el reflector MDF2 denominada “Láser 3”.

Los láseres 1 y 3, presentan en su espectro una emisión bien definida y estable a diferencia del láser 2 que posee una emisión multi-longitud de onda.

Además, el láser que posee una mejor eficiencia y un mayor nivel de potencia de pico es el láser 1.

En cuanto al nivel de ruido, el que posee un menor nivel y una respuesta más plana es el láser 3.

Por último, la mejor OSNR es la del láser 1 y el láser 2 queda descartado.

5.4. Caracterización del reflector doble empleado como sensor

En este último apartado, antes de comenzar con la caracterización del reflector doble empleado como sensor y mostrar sus resultados, se ha pretendido mejorar las características del láser elegido, a saber, el compuesto por la configuración 2 del láser de cavidad lineal y el reflector doble.

Por lo tanto, en el primer subapartado, se explicarán las modificaciones de diseño que se han aplicado para intentar conseguir un mejor láser y, por último, en el segundo subapartado, se mostrarán los resultados obtenidos al utilizar el reflector como sensor de temperatura y estiramiento longitudinal siendo este último, el fruto y objetivo principal de todo este trabajo investigador.

5.4.1. Mejora del diseño de la configuración láser

Tras haber seleccionado la configuración con mejores características, se decide intentar mejorar la estructura de dos formas posibles. La primera mediante un controlador de polarización (PC) colocado en dos posiciones ya que, durante la fase experimental, se observó que la potencia de emisión era dependiente de la polarización. La segunda forma se basa en el uso de un atenuador óptico, para intentar estabilizar la potencia dentro de la cavidad láser.

5.4.1.1. Configuración 2 + reflector doble + PC1

En esta configuración, se añade un controlador de polarización entre el circulador y el multiplexor de longitud de onda.

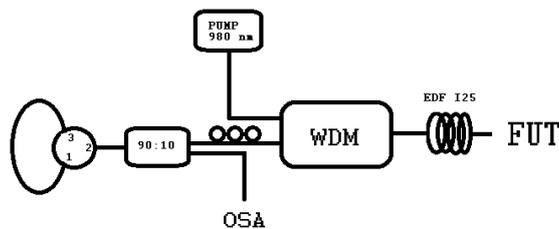


Ilustración 86: Esquema de la configuración final + PC1

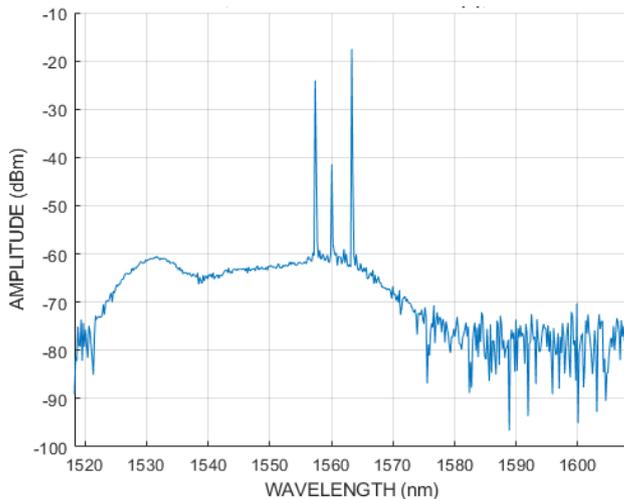


Ilustración 87: Espectro medido con el OSA de configuración final + PC1

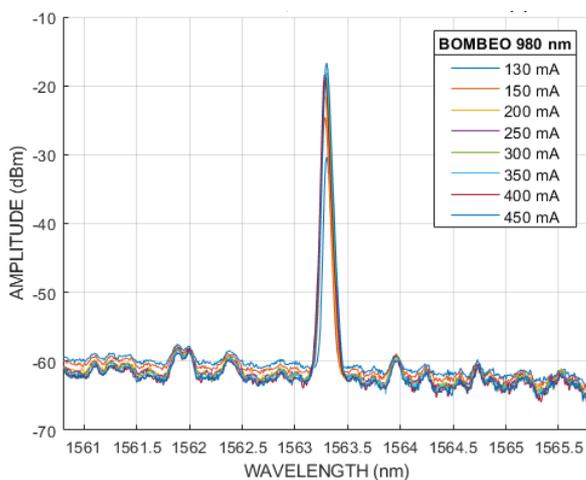


Ilustración 88: Zona de interés de una la figura anterior

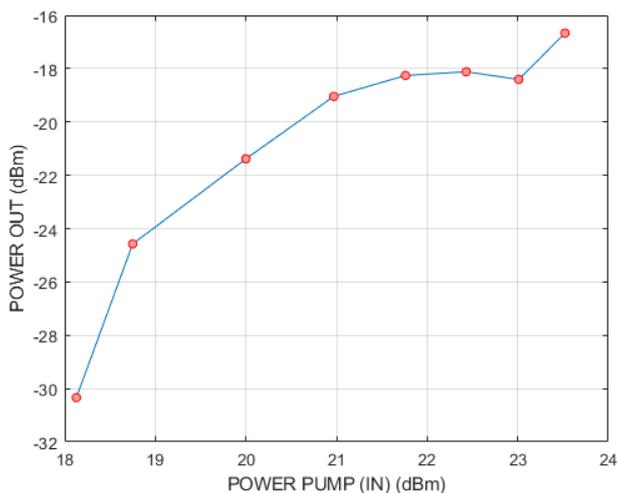


Ilustración 89: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida del pico principal del láser (Pin vs. Pout) en configuración final + PC1

Se observa durante el proceso que, efectivamente, el láser es dependiente de la polarización. Desgraciadamente, en esta configuración no se consiguen eliminar las múltiples líneas de emisión que se generan como se puede apreciar en la ilustración 89. Además, el uso del PC hace que la potencia de la línea de emisión principal disminuya aproximadamente 7 dB.

5.4.1.2. Configuración 2 + reflector doble + PC2

En esta configuración, se añade un controlador de polarización entre la entrada uno y tres del circulator que actúa como reflector.

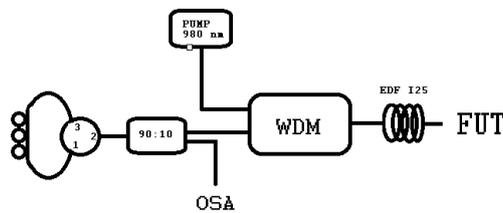


Ilustración 90: Esquema de la configuración final + PC2

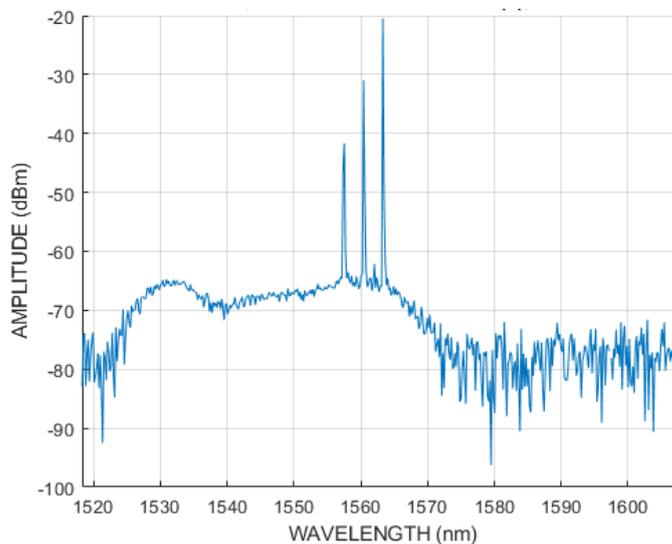


Ilustración 91: Espectro medido con el OSA de la configuración final + PC2

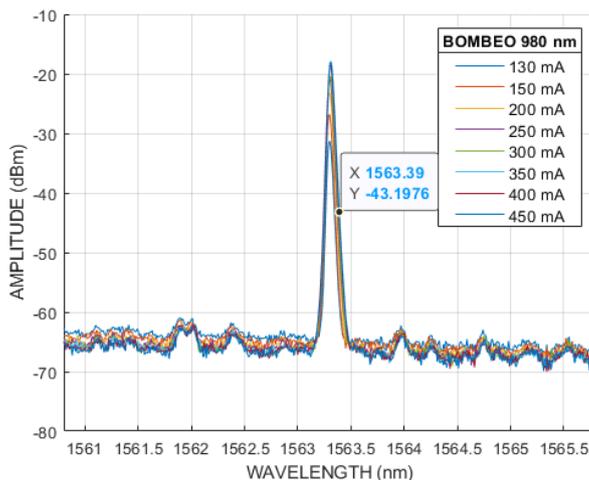


Ilustración 92: Zona de interés de la figura anterior

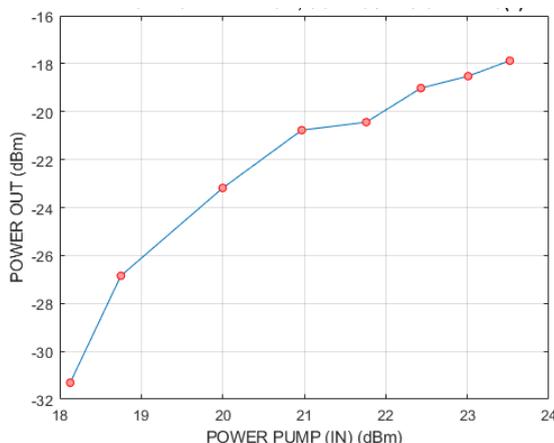


Ilustración 93: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida del pico principal del láser (Pin vs. Pout) de configuración final + PC2

Al igual que para la configuración anterior, aparecen varias emisiones en distintas longitudes de onda que no se consiguen controlar ni eliminar mediante el controlador de polarización. También se reduce drásticamente la potencia de la emisión principal y por tanto la eficiencia baja.

5.4.1.3. Configuración 2 + reflector doble + atenuador variable

En esta última configuración, se añade un atenuador óptico variable (VOA según sus siglas en inglés) entre la entrada uno y tres del circulador el cual, actúa como reflector.

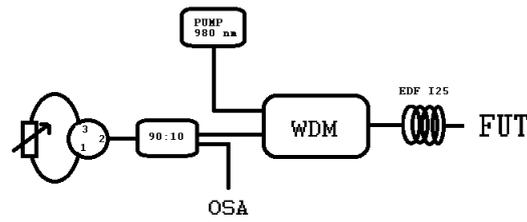


Ilustración 94: Esquema de la configuración final + atenuador (VOA)

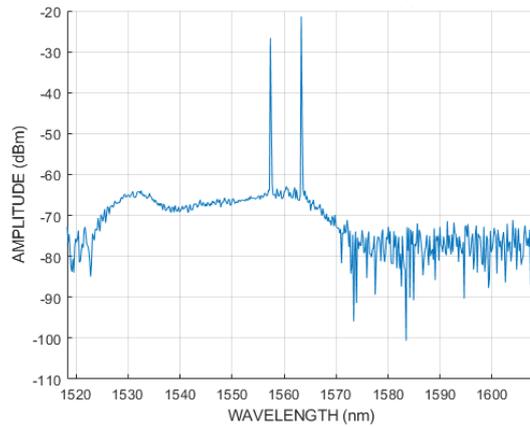


Ilustración 95: Espectro medido con OSA de configuración final + VOA

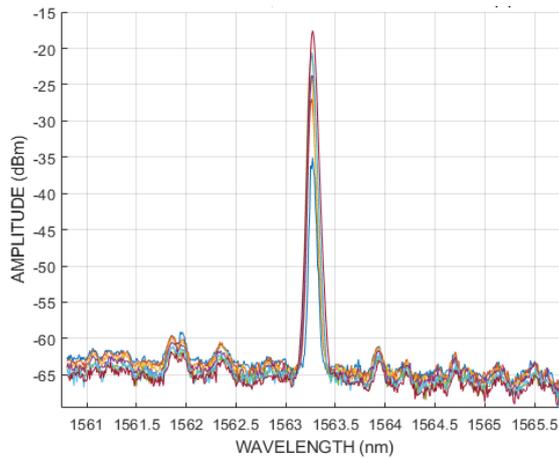


Ilustración 96: Espectro de interés OSA de configuración final + VOA

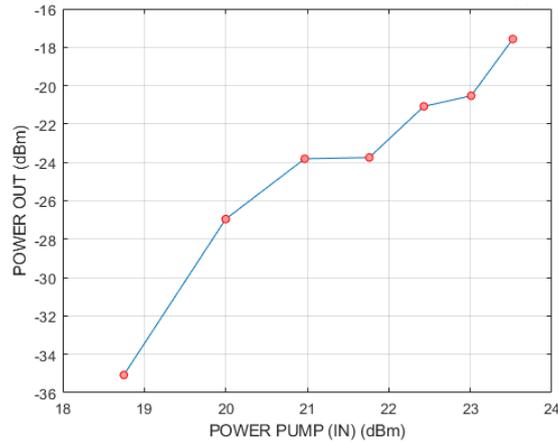


Ilustración 97: Relación entre la potencia de bombeo y la potencia de salida del pico principal del láser (Pin vs. Pout) de configuración final + VOA

Desgraciadamente, también aparecen varias emisiones en diferentes longitudes de onda, aunque de forma más controlada que sucedía con el PC.

Como cabe esperar, la potencia de la línea de emisión de interés es bastante inferior debido al VOA y a la aparición de distintas líneas de emisión.

5.4.1.4. Configuración final elegida

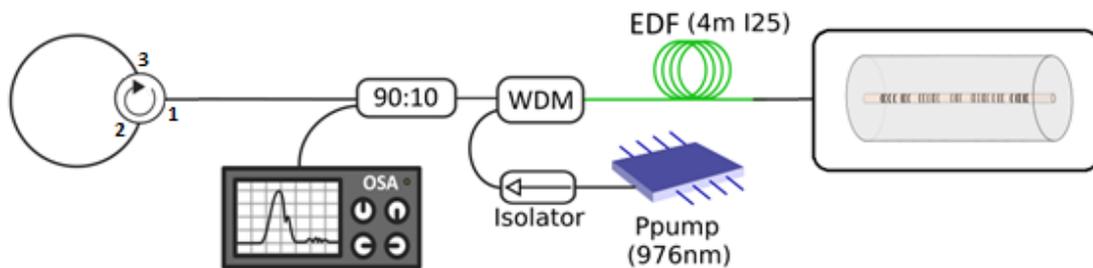


Ilustración 98: Configuración final de la cavidad lineal [33]

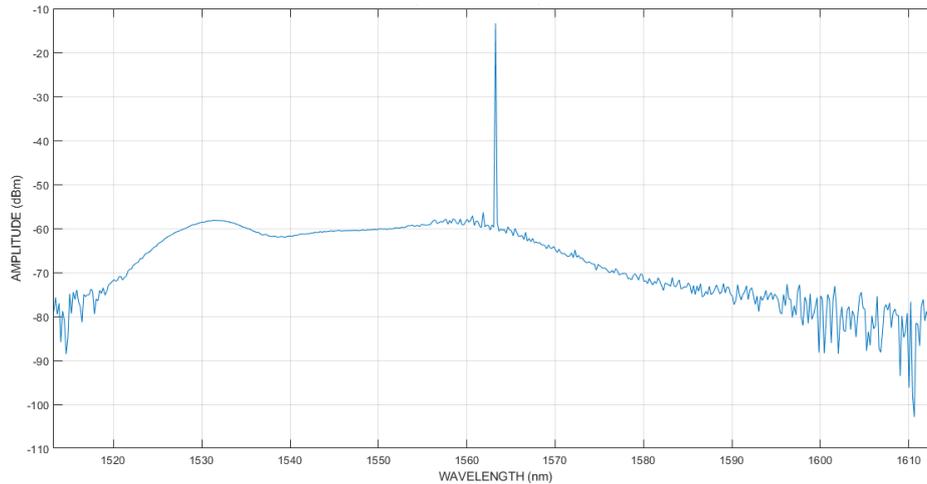


Ilustración 99: Espectro medido con el OSA de la configuración final de la cavidad láser

Por lo tanto, la mejor configuración que se ha conseguido ha sido la diseñada desde el principio (ilustración 98). En ella se genera únicamente una línea de emisión en torno a los 1563,25 nm, con una potencia de -10 dBm para una corriente de bombeo de 450 mA, además de una OSNR de 50 dB.

Como última caracterización se observó su comportamiento mediante el BOSA (*High Resolution Optical Spectrum Analyzer*), cuya resolución es muy superior a la del OSA.

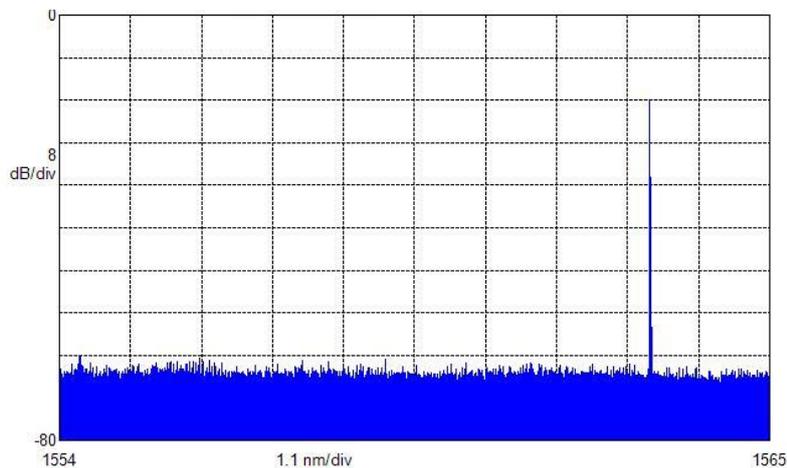


Ilustración 100: Caracterización mediante el analizador de espectro óptico de alta resolución (BOSA)

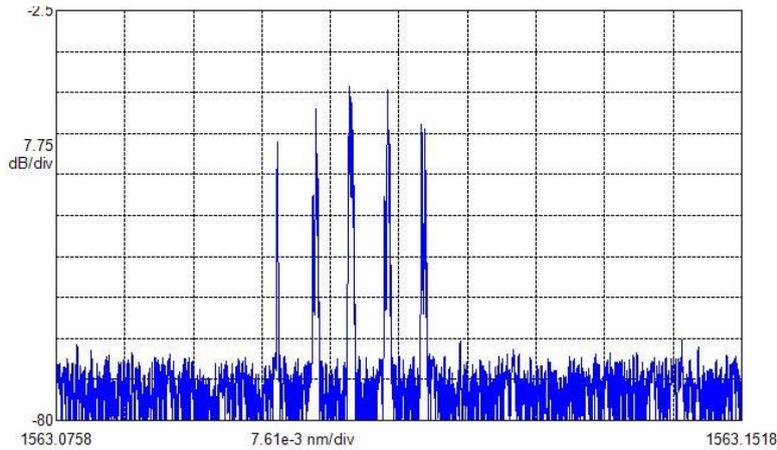


Ilustración 101: Detalle de la ilustración anterior

El láser seleccionado resulta poseer una emisión multimodo (ilustración 101) a diferencia de lo que se creía al analizar los espectros recogidos mediante el analizador de espectro ópticos. Aunque es cierto que resulta ser una emisión muy estrecha (un ancho de banda inferior a 20 pm) y con muy pocos modos, por lo que, sigue siendo un láser con muy buenas características.

5.4.2. Caracterización del sensor ante temperatura y estiramiento

Tras el proceso llevado a cabo a lo largo de este proyecto se consigue un diseño de láser de cavidad lineal optimizado, donde el reflector se puede emplear como un sensor. El siguiente paso será la caracterización de dichos sensores ante la variación de temperatura y estiramiento longitudinal. Recuérdese que el láser seleccionado para tal fin posee la estructura de la configuración 2 y el reflector basado en una estructura aleatoria dispuesta en cascada o reflector doble.

5.4.2.1. Medidas de temperatura

La medición de temperatura se ha realizado mediante una cámara climática especial para este tipo de caracterizaciones en cuyo interior, se aloja una sonda de temperatura con la cual se asegura que la medida recogida es correcta y estable además del reflector doble conectado a la estructura láser.

Los resultados se recogen mediante el OSA y posteriormente se tratan los datos y se realizan las gráficas pertinentes (ilustración 102).

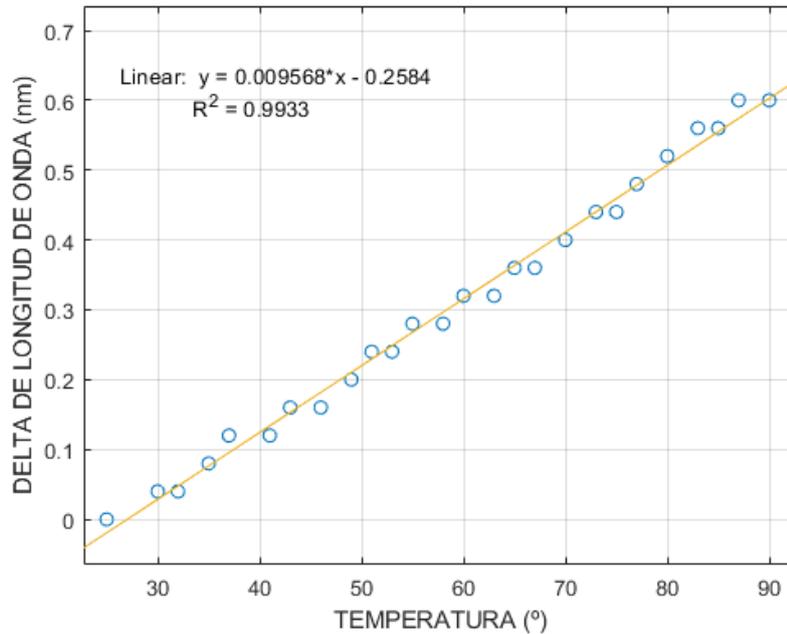


Ilustración 102: Evolución de la longitud de onda de emisión láser respecto a la variación de temperatura a la que ha sido sometida el reflector

En eje de abscisas se representa la temperatura y en el eje de ordenadas la variación de longitud de onda que se genera en función de la temperatura.

Se observa que los resultados poseen una geometría lineal por lo que es posible aplicar una regresión lineal en busca de la pendiente para calcular la sensibilidad.

Por lo tanto, la sensibilidad de la estructura láser ante la variación de temperatura resulta ser de unos 9,6 pm/°C.

5.4.2.2. Medidas de estiramiento longitudinal

La medición de estiramiento longitudinal en unidades de “strain” se ha llevado a cabo mediante un prototipo diseñado en PLA a través de una impresora 3D (que se mencionará en el siguiente apartado) encargado de la sujeción del reflector y, un motor de micro posicionamiento de un paso de 17 nm. Los resultados se recogen mediante el OSA y posteriormente se procesarán los datos obtenidos.

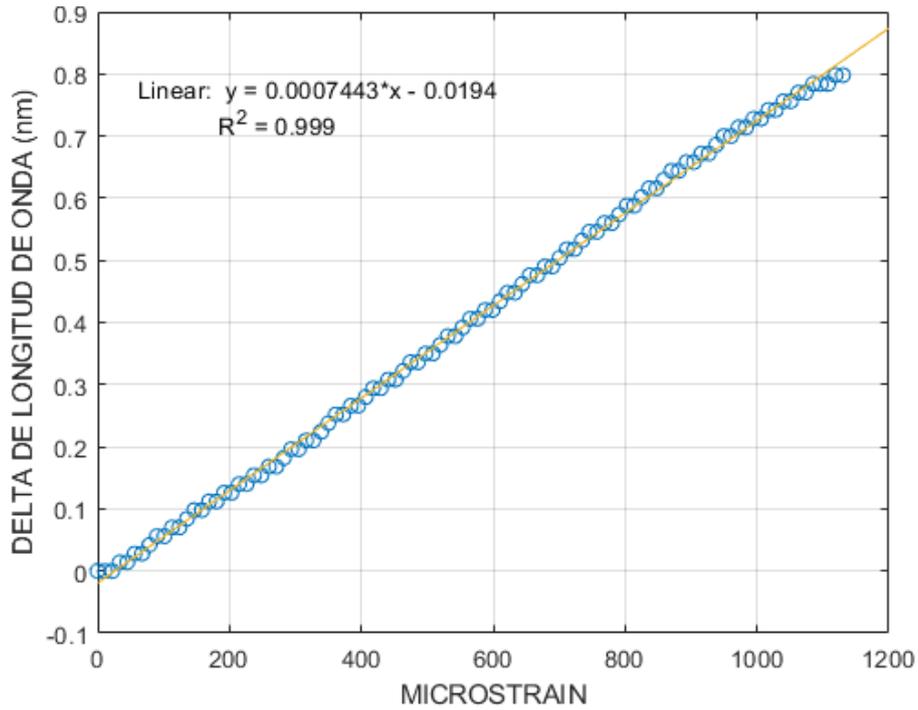


Ilustración 103: Evolución de la longitud de onda central del láser al someter al reflector a variaciones de estiramiento longitudinal

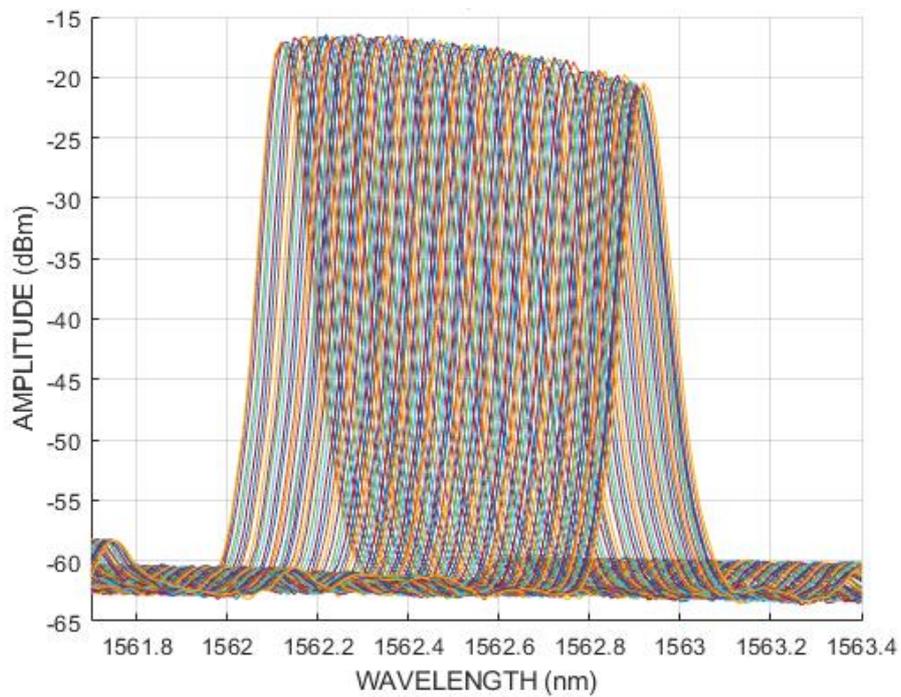


Ilustración 104: Evolución del espectro del láser al someter al reflector a un barrido de estiramiento longitudinal

En la ilustración 103 se muestra la gráfica que representa la evolución de la longitud de onda frente al estiramiento longitudinal que se le aplica al reflector.



Al poseer una geometría lineal se le aplica una regresión lineal y de ella se extrae la pendiente. En la ilustración 104, se representa la gráfica que muestra cómo evoluciona el espectro en función del barrido de estiramiento longitudinal.

Por lo tanto, la sensibilidad de la estructura láser ante la elongación longitudinal en unidades de $\mu\epsilon$ resulta ser de $0,74 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

5.4.3. Prototipo de caracterización de μstrain y software de lectura para OSA en Matlab

Durante la parte experimental de este proyecto, se han detectado dos momentos de gran delicadeza que retrasaban considerablemente los procedimientos y destruían material.

El primero y más simple resultó ser la captación y representación de las medidas obtenidas mediante el OSA. El software de este instrumento, ofrece los resultados del espectro mediante un fichero de texto plano (.txt) o bien mediante un fichero texto de valores separados por comas (.csv).

Al realizarse un gran número de caracterizaciones para cada configuración láser y teniendo en cuenta el elevado número de configuraciones y caracterizaciones que se han llevado a cabo en este proyecto, la cantidad de datos generados a fue notable.

El segundo problema radica en el procedimiento de medición general para los sensores ante elongaciones longitudinales. Para colocar el reflector de forma fija entre el microposicionador y la base se empleaba pegamento o dos tuercas metálicas. En ambos casos el reflector se podía dañar e incluso partir, por lo que era recomendable realizar esta medida al final de todo el proceso.

5.4.2.3. Solución al primer problema

Para solucionar este primer problema se programó un sencillo software en Matlab mediante "Guide" el cual, obtiene los ficheros con extensión ".csv" y los expone en una tabla. Pinchando sobre el fichero, se genera una representación gráfica del mismo indicando, la potencia máxima de pico y la longitud de onda a la que se encuentra. Por último, permite cambiar el nombre del fichero con el propósito de poder ser clasificado y ordenado para futuros procesamientos.

Gracias a este software bautizado como "OSAgrapher" ha sido posible identificar con gran facilidad los ficheros de interés y descartar los redundantes.

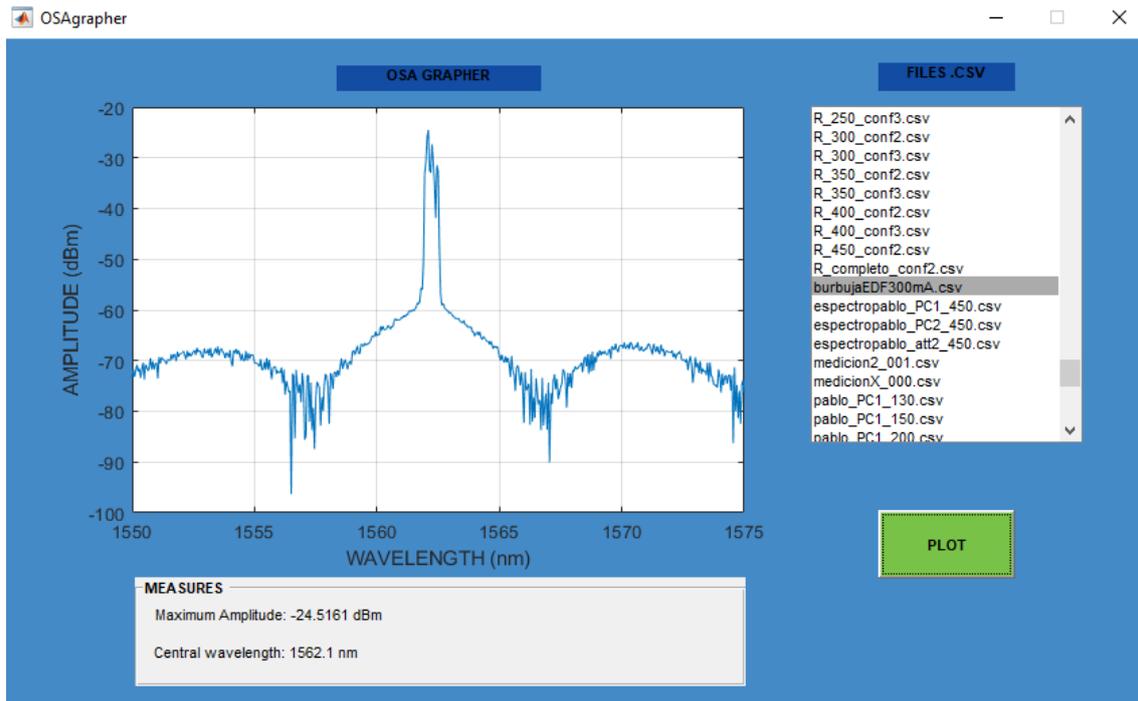


Ilustración 105: Entorno gráfico del software "OSAGrapher"

5.4.2.4. Solución al segundo problema

Al realizar las fijaciones de un extremo del tramo de fibra óptica que contiene el reflector a la base de mediciones y, el extremo opuesto al motor microposicionador mediante pegamento o tuercas y tornillos metálicos, las fibras podían dañarse o incluso romperse.

Con el objetivo de poder realizar un montaje seguro para los sensores basados en fibras ópticas se diseñó un prototipo de dos presas a medida capaces de sujetar los tramos de fibra de forma reversible y sin dañarla.

Se comienza analizando el procedimiento actual y el material que se emplea. Después, se ha diseñado una estructura mediante un software de representación de tres dimensiones y posteriormente se ha impreso en material PLA mediante una impresora 3D.

Dicha estructura está compuesta por dos presas gemelas. Una se ancla a medida al microposicionador y la otra se ancla a la base de la estructura a través de unas alzas encargadas de alinear en altura a ambas presas. En su interior se encuentra un tramo de polímero plástico antideslizante el cual, protege y sujeta a la fibra óptica. Por último, el proceso de compresión reversible se lleva a cabo mediante cuatro tornillos ubicados en los vértices que, con un propósito de

ergonomía, poseen una palomilla también diseñada e impresa en 3D la cual evita la necesidad de utilizar ningún tipo de llave para el procedimiento.

Cabe destacar que el presente prototipo se está utilizando en la actualidad por los investigadores e investigadoras que trabajan en el laboratorio de fotónica, con óptimos resultados. Además, gracias a él, se han podido realizar un mayor número de medidas en un menor tiempo, lo que ha permitido acabar antes de lo previsto un artículo científico.

A continuación, se muestran unas imágenes de la metodología hasta el momento usada (ilustración 106) y del prototipo diseñado (ilustración 107 y 108).

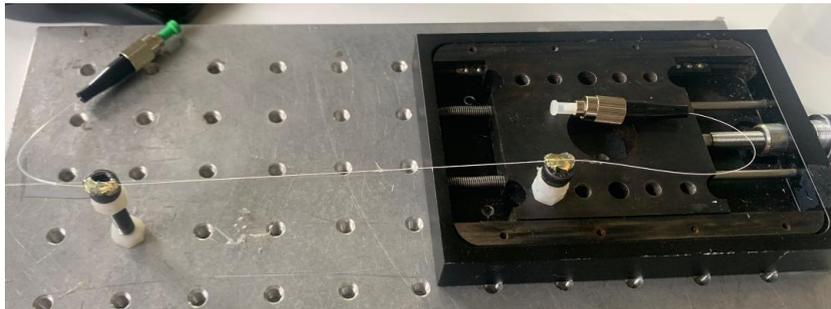


Ilustración 106: Montaje utilizado anteriormente mediante tornillería y silicona

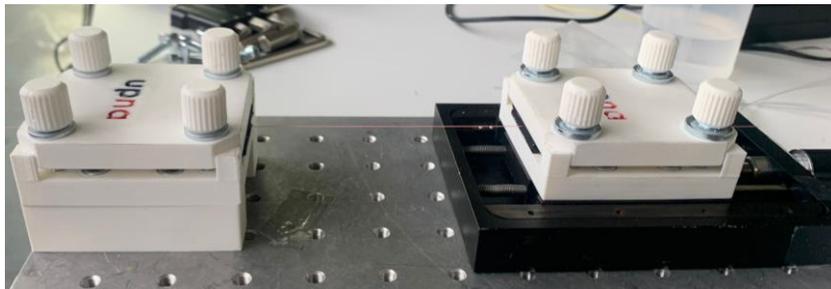


Ilustración 107: Montaje mediante el prototipo diseñado

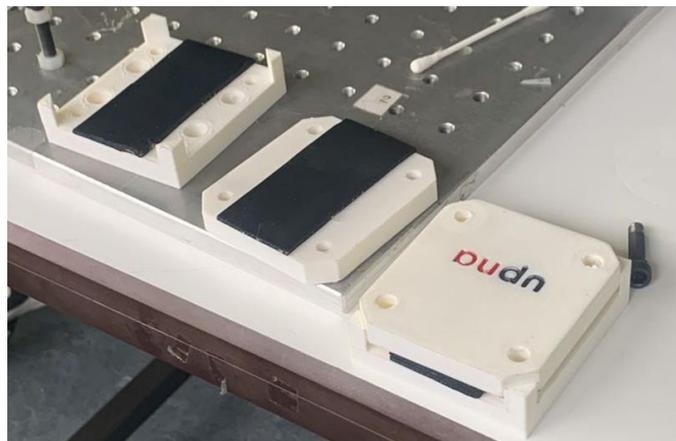


Ilustración 108: A la izquierda, el interior de una presa con el polímero antideslizante, a la derecha la presa gemela montada



Capítulo 6: Conclusiones

En este último capítulo, se dará una visión global tanto de la fabricación de microcavidades como del sensor basado en un reflector MDF, así como las conclusiones del trabajo. Con ellas, se podrá vislumbrar las líneas futuras de estudio que nacerán de este proyecto.

6.1. Diseño y fabricación de presa de agarre

Durante la última fase descrita en el apartado 5.4.2. en el que, se pone a prueba la sensibilidad del sensor ante elongación transversal, se observa un procedimiento lento y que deteriora la fibra óptica. Se diseña entonces como solución una presa especial para la sujeción de la misma (ver apartado 5.4.3.).

Como consecuencia la sujeción del tramo de fibra ha sido muy satisfactorio y no daña en absoluto a la fibra. El cambio de una fibra a otra se efectúa con gran celeridad gracias a su diseño de apertura basada en tornillería. Además, al tratarse de un diseño impreso en 3D, se pueden fabricar recambios y más presas de forma veloz y económica.

En uno de los experimentos, la cubierta de polímero plástica comenzó a quemarse debida a la alta potencia que se estaba introduciendo a la fibra (en torno a 1,5 vatios) pero en ningún momento se prendió fuego pudiendo entonces alegar, que el diseño soporta altas temperaturas, reduciendo así posibles riesgos para el laboratorio.

En definitiva, el diseño y fabricación de la estructura de sujeción ha resultado exitosa. De hecho, ha sido utilizado para elaborar las mediciones de elongación transversal que han formado parte del trabajo enviado a uno de los congresos internacionales más importantes sobre sensores de fibra óptica (International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-27) <https://ofs27.org/>) y que en la actualidad se encuentra en proceso de revisión [34].

6.2. Fabricación de microcavidades

Este proceso de fabricación de microcavidades, descrito en el capítulo 3, es bastante laborioso y manual, por lo el tiempo requerido para su fabricación ha sido muy elevado (en torno a una microcavidad por hora).



Tras haber aplicado ciertas mejoras al proceso de fabricación, (ver capítulo 3: nuevas técnicas de corte, uso de una fusionadora mejor, etc.) no solo se ha mejorado significativamente la calidad de las microestructuras generadas, sino que, además, se ha conseguido reducir el tiempo de fabricación notablemente (unas cuatro microcavidades por hora).

Cabe destacar que, gracias a estas mejoras introducidas, se ha llevado a cabo unos experimentos que han dado lugar a un artículo enviado a la revista *Optics and Laser Technology* (revista del primer cuartil) y que, en el momento de redacción del presente documento, se encuentra en proceso de revisión en la actualidad [35].

6.3. Sensor fibra óptica basado en reflectores pseudoaleatorios y cuasidistribuidos

A lo largo de todo este trabajo, se ha ido diseñando paso a paso una estructura láser que permitiese usar además su reflector o reflectores como sensores. Se llegó a la conclusión en el capítulo 5 que la mejor estructura estaba compuesta por una configuración lineal de tipo 2 (véase el apartado 5.2.2.) junto con un reflector basado en dos tramos aleatorios MDF dispuestos en serie que obedecen al funcionamiento de retrodispersión controlada artificialmente.

Para poder desarrollarse una conclusión acerca de la calidad de estos sensores se ha procedido a comparar sus parámetros básicos con un sensor comercial y uno experimental.

En el caso de la comparación con un sensor basado en un FBG comercial, los resultados se compararon con los valores típicos de dichos dispositivos 0, [36]. A este tipo de sensores los denominaremos como "Sensor A". Esta comparación proporcionará información de si la estructura diseñada es mejor que las basadas en FBG.

Por otra parte, también se recogen los valores experimentales de usar un reflector basado en un único MDF [37], que llamaremos "Sensor B".

En la tabla siguiente se reúnen las características de estos tres sensores.

	Sensor basado en reflector doble	Sensor A	Sensor B
OSNR [dB]	50	45-50	47
Sensibilidad T ^a [$\mu\text{m}/^{\circ}\text{C}$]	9,569 ($R^2 = 0,993$)	11 ($R^2 = 0,999$)	9,7 ($R^2 = 0,999$)
Sensibilidad $\mu\epsilon$ [$\mu\text{m}/\mu\epsilon$]	0,7443 ($R^2 = 0,999$)	1,2 ($R^2 = 0,999$)	10,4 ($R^2 = 0,999$)

Tabla 8: Características principales de los tres sensores basados en reflectores MDF



Estos resultados muestran que el hecho de introducir un segundo segmento aleatorio dispuesto en serie únicamente mejora la OSNR y que el resto de parámetros empeoran en mayor o menor medida.

Como conclusión final, el sensor utilizado no cumple los requisitos técnicos necesarios para ser un sensor mejor que los que se encuentran actualmente en el mercado ya que, posee peores sensibilidades.

A diferencia de lo que se puede pensar a priori, estos resultados son de gran valor e interés. Se ha estudiado una potencial estructura de sensor que a primera vista reunía unos parámetros muy prometedores y cuyos resultados ofrecen un valor añadido a las labores y líneas de investigación del grupo.

6.4. Líneas futuras

Por último, se desean mencionar las líneas futuras que se abren tras los resultados y conclusiones que se han obtenido tras finalizar este trabajo fin de grado.

La mejora en la fabricación de microcavidades ha ofrecido unas estructuras con mayor calidad. Esto abre el estudio de las mismas de una forma mucho más precisa y con mayor celeridad, lo que abre la puerta a nuevas posibilidades de investigación en esta rama y, por ende, proporcionando nuevos estudios y descubrimientos.

En cuanto a la presa de fibra óptica, además de añadir una clara mejora en la experimentación de sensores ante elongación transversal, alienta al diseño y creación de nuevos dispositivos para el laboratorio que simplifiquen las labores investigadoras.

Y, en cuanto al diseño del sensor de fibra óptica obtenido, ha proporcionado una valiosa experiencia sobre el comportamiento de este tipo de reflectores y abre una línea investigadora sobre los mismos. Descubrir el trasfondo teórico que albergan y conocer su comportamiento en otro tipo de estructuras, será una interesante continuación para este trabajo de fin de grado.



Referencias y bibliografía

- [1] [En línea]. Disponible en: <https://www.telectronika.com/articulos/fibra-optica/que-es-la-fibra-optica-principios-fabricacion-y-usos/> [Accedido: 10-05-2022]
- [2] Pablo Miguel Cabezudo Sánchez-Valverde, “Caracterización de dispositivos avanzados de fibra óptica”, trabajo fin de grado, Universidad Pública de Navarra, 2018.
- [3] Javier Pradas Martínez, “Desarrollo experimental de sensores de fibra óptica basados en microcavidades de fibra hueca”, trabajo fin de grado, Univ. Pública de Navarra, 2020.
- [4] [En línea]. Disponible en: <http://yenni06.blogspot.com/2015/12/monomodo-multimodo.html> [Accedido: 10-05-2022]
- [5] [En línea]. Disponible en: <https://blog.incom.mx/entrada/Atenuaci%C3%B3n/28> [Accedido: 10-05-2022]
- [6] [En línea]. Disponible en: <https://community.fs.com/es/blog/types-of-optical-fiber-dispersion-and-compensation-strategies.html> [Accedido: 10-05-2022]
- [7] [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriaelectronica.org/amplificadores-opticos-soa-edfas-y-raman/> [Accedido: 11-05-2022]
- [8] [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriaelectronica.org/amplificadores-opticos-soa-edfas-y-raman/> [Accedido: 11-05-2022]
- [9] Rosa Ana Pérez-Herrera y Manuel López-Amo, “Láseres de fibra óptica”, Mundo Electrónico, No. 426, pp. 36-42, marzo 2011.
- [10] Rosa Ana Pérez-Herrera, “Design and Characterization of Wavelength Division Multiplexed Sensor Systems Using Optical Amplification” Tesis doctoral, Universidad Pública de Navarra, 2010
- [11] Moreno, D. Torres, and G. Puerto, “Análisis y comparativo de los amplificadores ópticos SOA, EDFA y RAMAN”, Rev. Ing. Investig. Desarro., vol. 18 (2), pp. 22-28, Julio. 2018.
- [12] [En línea]. Disponible en: <https://www.wireandcabletips.com/fiber-optic-cabling-solutions-sensing-applications/> [Accedido: 11-05-2022]
- [13] [En línea]. Disponible en: <http://www.conacyt.gob.mx/comunicacion/Revista/200/Articulos/Laseres/Laseres00.htm> [Accedido: 12-05-2022]
- [14] [En línea]. Disponible en: <https://materialesavanzados.wordpress.com/2014/05/07/deforzando-la-luz-emision-%E2%80%A8laser-aleatoria-y-pruebas-mecanicas-%E2%80%A8en-tejido-biologico/> [Accedido: 12-05-2022]
- [15] Arturo Sánchez-González, Rosa Ana Pérez-Herrera, Pablo Roldán-Varona, Luis Rodríguez-Cobo, José Miguel López-Higuera, Y Manuel López-Amo, “Láseres de fibra



óptica basados en reflectores clásicos, estrechados y microperforados” 12ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'21

- [16] Rosa Ana Pérez-Herrera et al., “Micro-drilled optical fiber for enhanced laser strain sensors”, en Actas de Seventh European Workshop on Optical Fibre Sensors, 111992R, 2019.
- [17] Rosa Ana Perez-Herrera, Mikel Bravo, Daniel Leandro, Susana Novais, Javier Pradas, Manuel Lopez-Amo “Multiparameter sensor based on a multi-interferometric serial configuration for temperature and strain measurements” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 27(6), 5600704, April 2021
- [18] E. Campanella, A. Cuccovillo, C. Campanella, A. Yurt y V. Passaro, “Fibre Bragg Grating Based Strain Sensors: Review of Technology and Applications,” Sensors, 2018.
- [19] L. Grattan y B. Meggit, “Optical Fiber Sensor Technology: Devices and Technology”, Optoelectronics, Imaging and Sensing, Springer Science & Business Media., 2, 2012.
- [20] X. Zhang, H. Pan, H. Bai, M. Yan Y. J. Wang, “Transition of Fabry–Perot and antiresonant mechanisms via a SMF-capillary-SMF structure,” Optics Letters, 43(10), pp. 2268-2271, 2018
- [21] P. R. Horche, M. López-Amo, M. A. Muriel y J. A. Martín Pereda, “Spectral behavior of a low cost all fiber component based on untapered multifiber sensors”, IEEE Photonics Technology, 1(7), pp. 184-187 1989.
- [22] [En línea]. Disponible en: <https://fbgs.com/technology/fbg-principle/> [Accedido: 12-05-2022]
- [23] [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/48492/1/PFC_LAURA_BARAJAS_GOMEZ.pdf [Accedido: 13-05-2022]
- [24] [En línea]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/tecnologia/como-se-fabrica-la-fibra-optica> [Accedido: 13-05-2022]
- [25] [En línea]. Disponible en: <https://www.fiber-mart.com/news/oadm-optical-adddrop-multiplexer-tutorial-a-890.html> [Accedido: 13-05-2022]
- [26] [En línea]. Disponible en: https://optiacuantica.uniandes.edu.co/images/documents/teaching/intermediate-lab/LabInt2014-1informefinalCotrino-Jimenez_paddle.pdf [Accedido: 13-05-2022]
- [27] [En línea]. Disponible en: https://www.3sae.com/productsheets/3SAE_TaperManufacturingStation.pdf [Accedido: 13-05-2022]
- [28] [En línea]. Disponible en: https://dl.cdn-anritsu.com/en-au/test-measurement/files/Manuals/Operation Manual/MS9740A/MS9740A_Operation_Manual_E_21_0.pdf [Accedido: 13-05-2022]



- [29] [En línea]. Disponible en: <https://aragonphotonics.com/bosa-optical-spectrum-analyzer/> [Accedido: 13-05-2022]
- [30] I. Iturri Gil, "Diseño y caracterización de nuevas topologías de redes de sensores multiplexados en longitud de onda mediante láseres de fibra con emisión multilínea," trabajo fin de máster, Universidad Pública de Navarra, 2014
- [31] [En línea]. Disponible en: <https://lunainc.com/product/obr-4600> [Accedido: 14-05-2022]
- [32] [En línea]. Disponible en: <https://www.binder-world.com/es/productos/camaras-de-clima-constante> [Accedido: 14-05-2022]
- [33] R. A. Pérez-Herrera, D. Pallarés-Aldeiturriaga, A. Júdez, L. Rodríguez Cobo, M. Lopez-Amo, and J. M. Lopez-Higuera, "Optical fiber lasers assisted by microdrilled optical fiber tapers," *Optics Letters*, 44, 2669-2672, 2019
- [34] R. A. Perez-Herrera, P. Roldan-Varona, A. Sanchez-Gonzalez, M. Durán, L. Rodriguez-Cobo, J. M. Lopez-Higuera, and M. Lopez-Amo "Stable L-band Fiber Laser Sensor using a BackscatteringBased Multimode Fiber Reflector" en proceso de revisión, 27th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-27) [En línea]. Disponible en: <https://ofs27.org/>
- [35] A. Sanchez-Gonzalez, R. A. Perez-Herrera, P. Roldan-Varona, M. Duran-Escudero, L. Rodriguez-Cobo, J. M. Lopez-Higuera, and M. Lopez-Amo, "Highly equalized dual-wavelength C-band fiber laser enhanced with random reflectors" en proceso de revisión en la revista *Optics and Laser Technology*
- Grattan, L. S. & Meggit, B. T. *Optical Fiber Sensor Technology: Devices and Technology* (Optoelectronics, Imaging and Sensing) (Springer, 2012).
- [36] Campanella, C. E., Cuccovillo, A., Campanella, C., Yurt, A. & Passaro, V. Fibre Bragg grating based strain sensors: Review of technology and applications. *Sensors* 18, 3115. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s18093115>, 2018
- [37] A. Sanchez-Gonzalez, R. A. Perez-Herrera, P. Roldan-Varona, L. Rodriguez-Cobo, J. M. Lopez Higuera and M. Lopez-Amo, "High Performance Fiber Laser Resonator for Dual Band (C and L) Sensing," *Journal of Lightwave Technology*, 2022



Anexo 1: Código en Matlab de lector de archivos .csv

```
function varargout = OSAGrapher(varargin)
% OSAGRAPHER MATLAB code for OSAGrapher.fig
%   OSAGRAPHER, by itself, creates a new OSAGRAPHER or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = OSAGRAPHER returns the handle to a new OSAGRAPHER or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   OSAGRAPHER('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in OSAGRAPHER.M with the given input arguments.
%
%   OSAGRAPHER('Property','Value',...) creates a new OSAGRAPHER or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before OSAGrapher_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to OSAGrapher_OpeningFcn via varargin.
%
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help OSAGrapher

% Last Modified by GUIDE v2.5 24-Nov-2021 17:30:23

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @OSAGrapher_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @OSAGrapher_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [], ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
```



```
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before OSAggrapher is made visible.
function OSAggrapher_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to OSAggrapher (see VARARGIN)

    file = dir('files/*.csv'); %Lectura de ficheros .csv

    set(handles.listbox1, 'String', {file.name}); %Introducción de los nombres de fichero
    en el listbox como un cell array

% Choose default command line output for OSAggrapher
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes OSAggrapher wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = OSAggrapher_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Executes on selection change in listbox1.
function listbox1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: contents = cellstr(get(hObject, 'String')) returns listbox1 contents as cell
array
%         contents{get(hObject, 'Value')} returns selected item from listbox1

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function listbox1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to listbox1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: listbox controls usually have a white background on windows.
```



```

% See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUiControlBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton2.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

files = get(handles.listbox1,'String'); %Extraigo el string seleccionado en listbox
index = get(handles.listbox1,'Value'); %Extraigo el valor seleccionado en listbox

data = readmatrix("files/"+files{index}); %Lectura de archivo .csv

longitud_onda = data(3:end,1); %Almacenamos las longitudes de onda (eje x)
amplitud = data(3:end,2); %Almacenamos el valor de amplitud en dBm (eje y)
amplitud_dbm = 10*log10(amplitud); %Pasamos de mw a dBm
[val,idx]=max(amplitud);%Almacenamos la potencia máxima y su índice
potencia_maxima = real(10*log10(val));%Pasamos de mw a dBm
longitud_onda_central = longitud_onda(idx);%Longitud de onda donde se encuentra el
máximo

set(handles.text4,'String',"Maximum Amplitude: "+potencia_maxima+" dBm"); %Colocamos
en el texto la potencia máxima de la función
set(handles.text6,'String',"Central wavelength: "+longitud_onda_central+" nm");
%Colocamos en el texto la longitud de onda donde se encuentra el máximo

%Ploteamos
plot(longitud_onda,real(amplitud_dbm));
grid on;
xlabel('WAVELENGTH (nm)');
ylabel('AMPLITUDE (dBm)');
xlim([data(1,2),data(2,2)]);

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text4_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text4 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function text6_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to text6 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

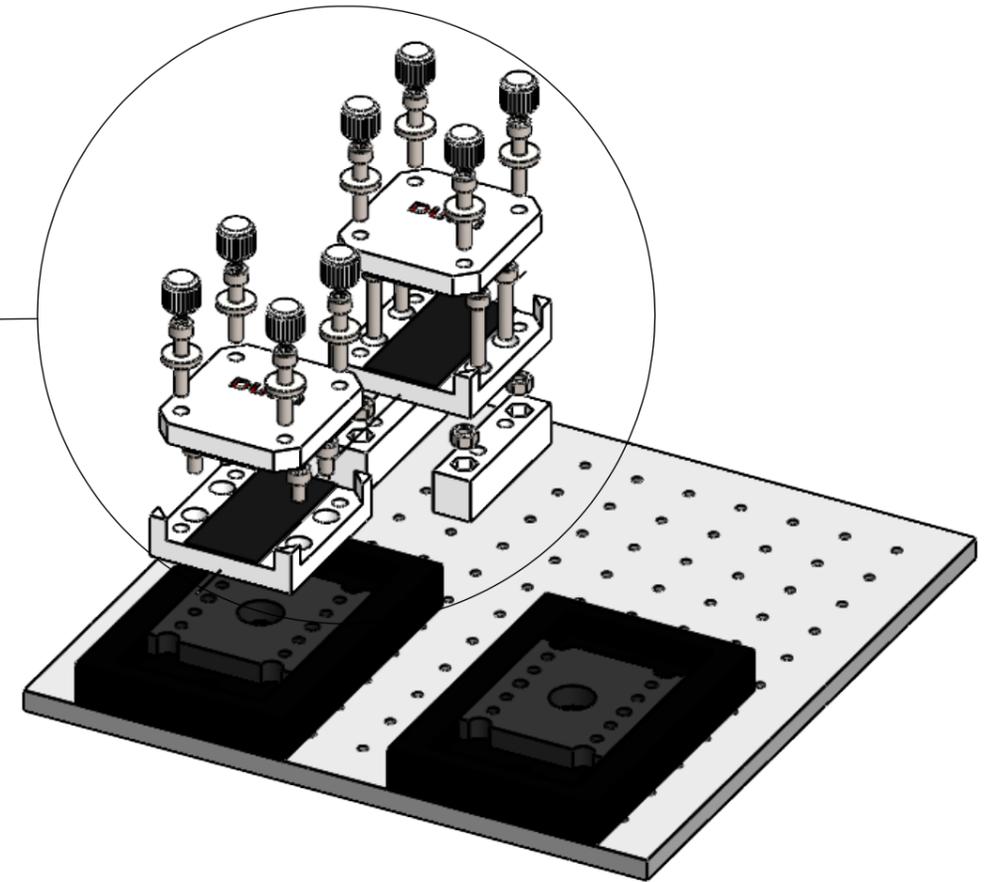
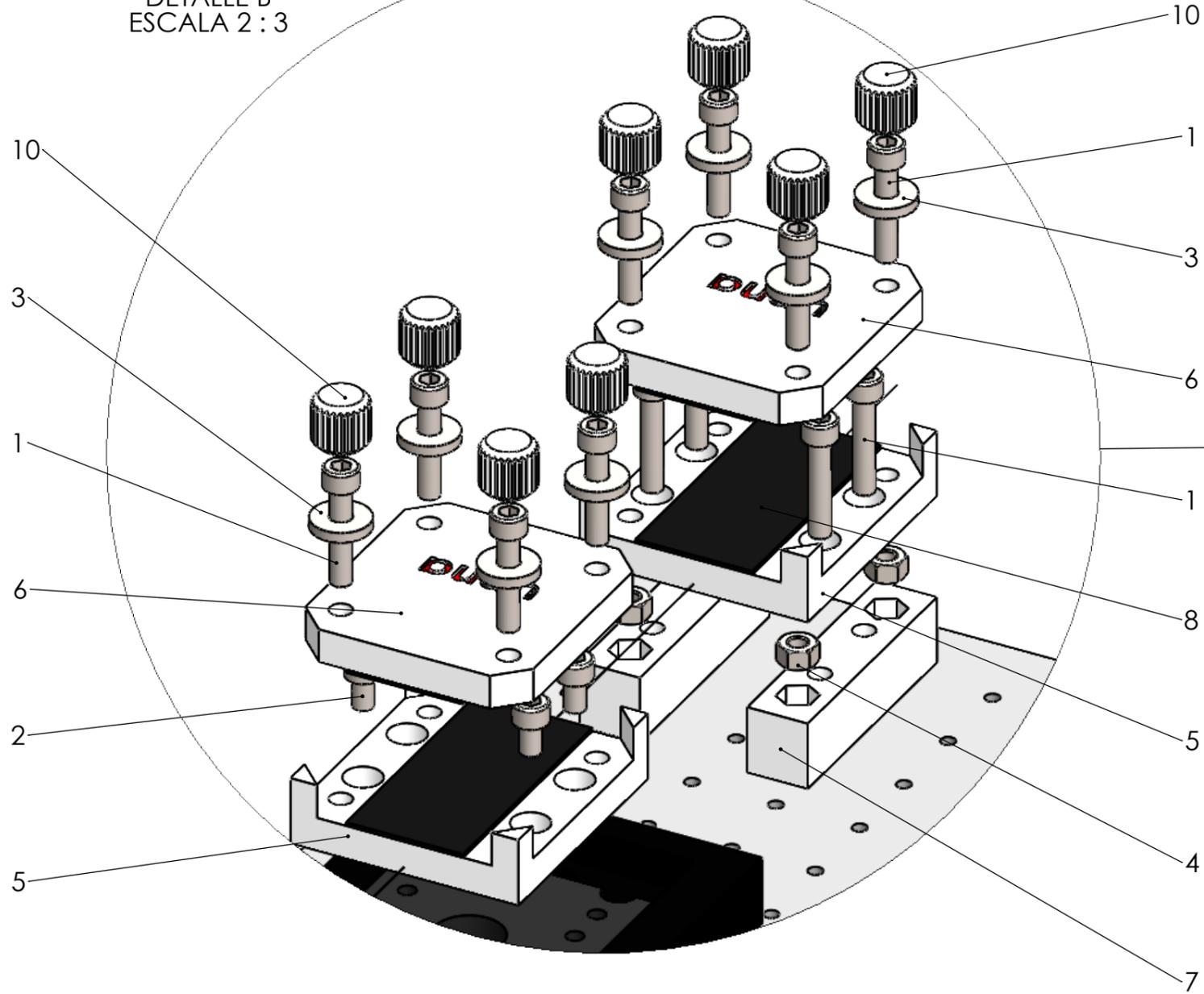
```



Anexo 2: Planos e indicaciones de diseño

PLANO 1: TENSOR MICROSTRAIN	83
PLANO 2: TENSOR DE FIBRA.....	84
PLANO 3: TAPA DEL TENSOR DE FIBRA	85
PLANO 4: SOPORTE DEL TENSOR DE FIBRA	86
PLANO 5: PALOMILLA MOLETADA PARA M6	87

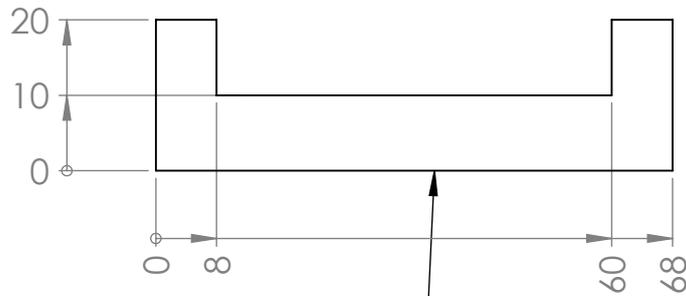
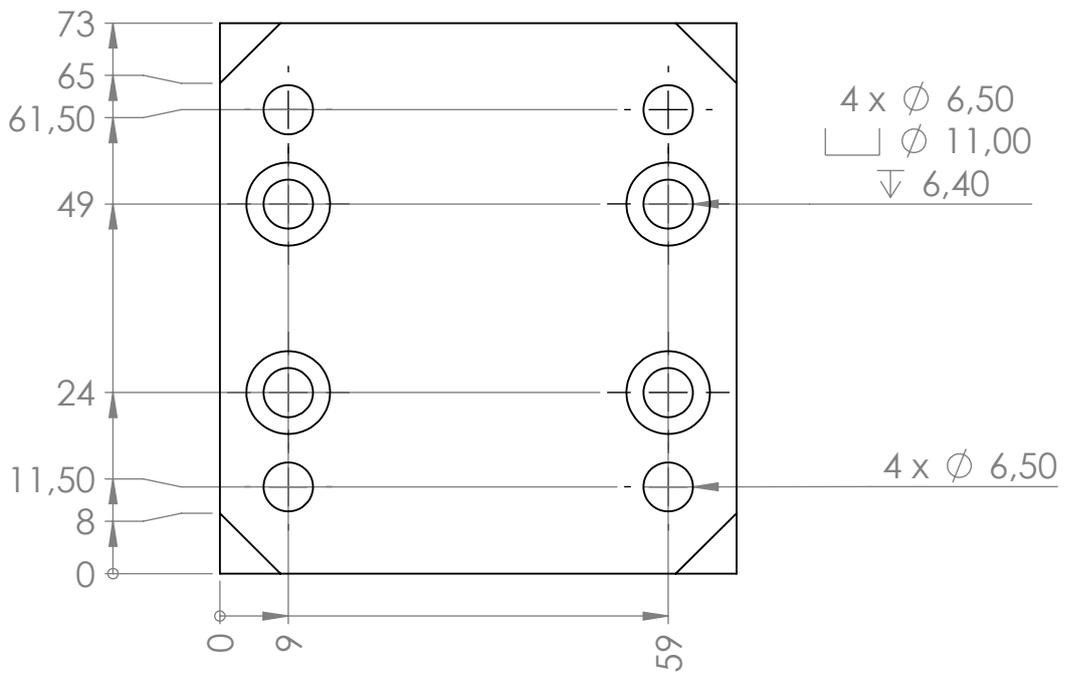
DETALLE B
ESCALA 2 : 3



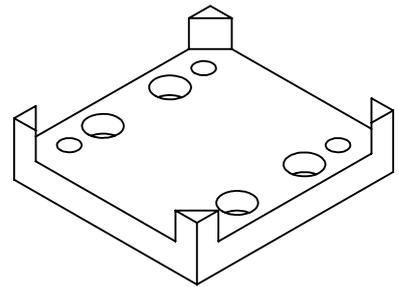
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	DIN 912 M6 x 30 --- 30N	12
2	DIN 912 M6 x 10 --- 10N	4
3	DIN 6340-6.4	8
4	Hexagon Nut ISO 4033 - M6 - D - N	4
5	Tensor de fibra 1	2
6	Tapa tensor de fibra	2
7	Soporte tensor de fibra	2
8	Goma de fricción	4
9	fibra	1
10	Palomilla moleteada para M6	8

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:		ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
DIBUJ.		NOMBRE		FIRMA		FECHA
VERIF.		TÍTULO:				
APROB.		MATERIAL:		N.º DE DIBUJO		
FABR.		PESO:		ESCALA:1:2		
CALID.		HOJA 1 DE 1		A3		

MicroStrain



Superficie de apoyo de impresión



ALTURA DE CAPA: 0,2 mm
DENSIDAD DE RELLENO: 50%
TIPO DE RELLENO: Helicoidal
MATERIAL: PLA Blanco

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
Tensor de fibra 1

MATERIAL:
 PLA Blanco

N.º DE DIBUJO
01

A4

PESO:

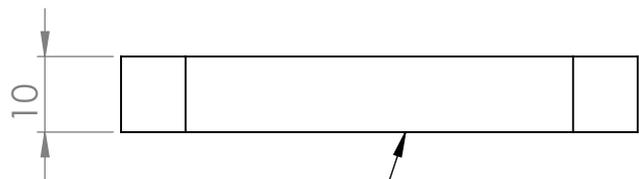
ESCALA:1:1

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1

F

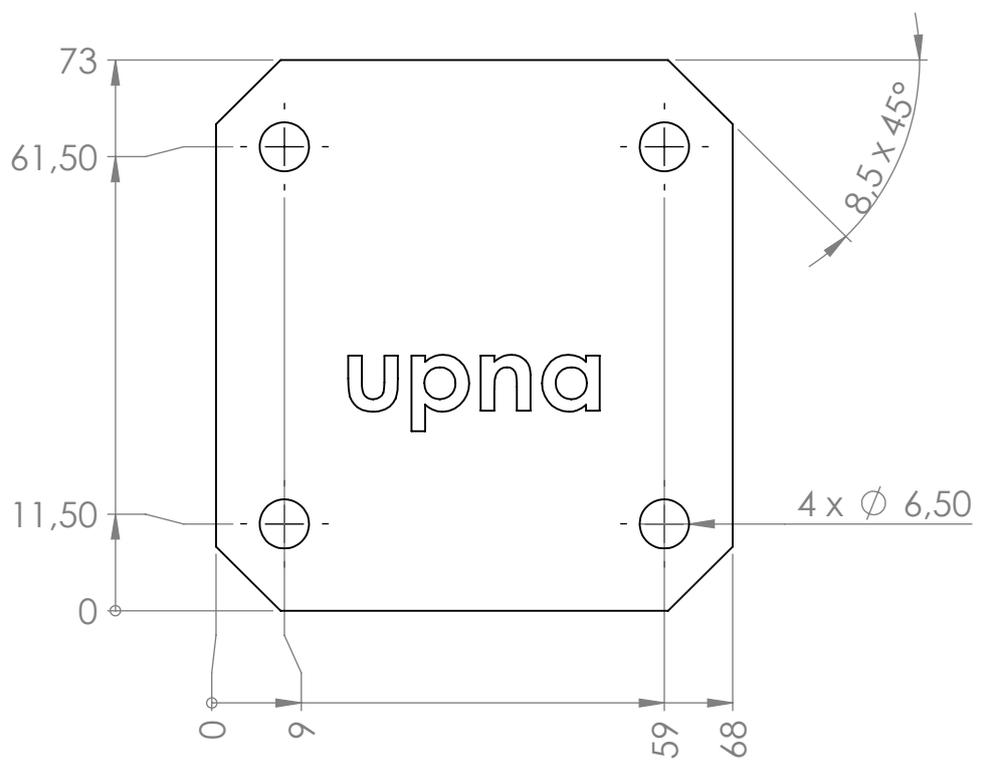
F



Superficie de apoyo de impresión

E

E

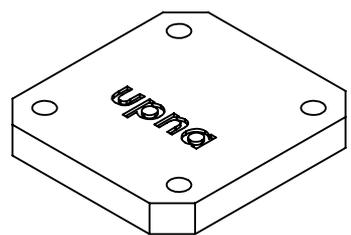


D

D

C

C



ALTURA DE CAPA: 0,2 mm
DENSIDAD DE RELLENO: 50%
TIPO DE RELLENO: Helicoidal
MATERIAL: PLA Blanco

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
--	----------	---------------------------------------	---------------------	----------

A

A

NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:	
DIBUJ.	Miguel Durán							Tapa tensor de fibra	
VERIF.								N.º DE DIBUJO	
APROB.								02	
FABR.								A4	
CALID.						MATERIAL:		ESCALA:1:1	
			PLA Blanco					HOJA 1 DE 1	
			PESO:						

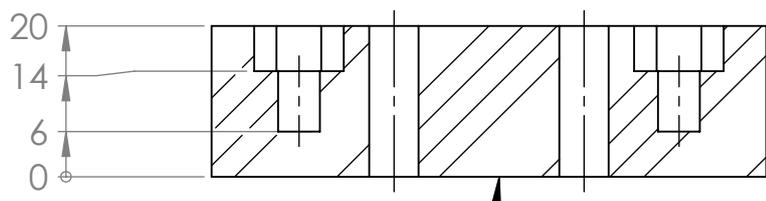
4 3 2 1

4 3 2 1

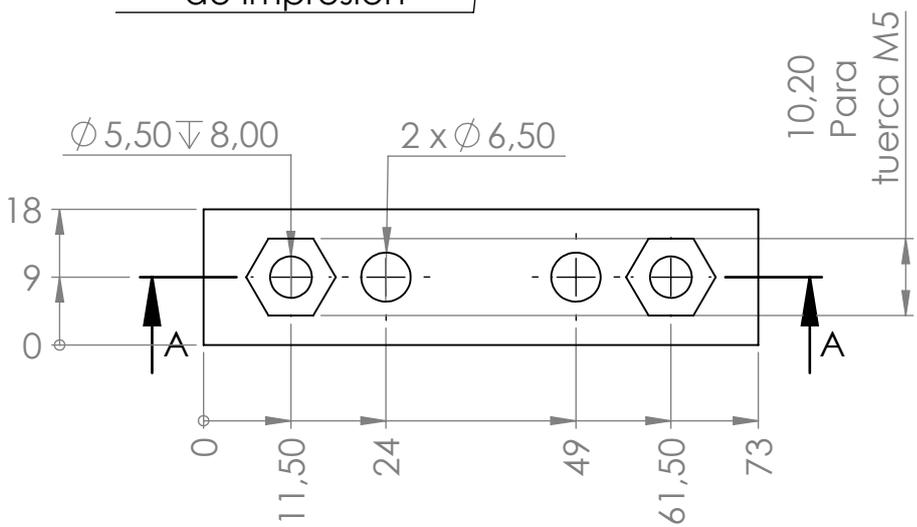
F

F

SECCIÓN A-A



Superficie de apoyo de impresión



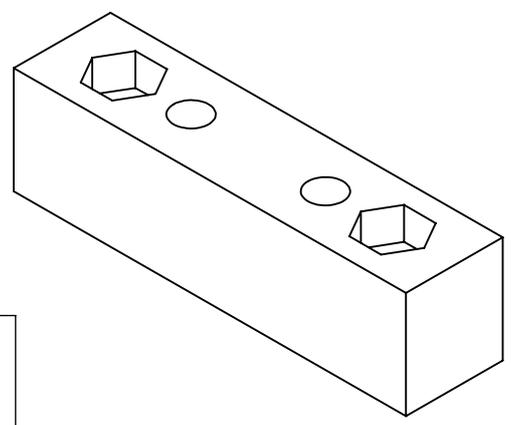
10,20
Para
tuerca M5

D

D

C

C



ALTURA DE CAPA:	0,2 mm
DENSIDAD DE RELLENO:	50%
TIPO DE RELLENO:	Helicoidal
MATERIAL:	PLA Blanco

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:	ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN

A

A

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:	Soporte tensor de fibra		
N.º DE DIBUJO	03		A4
PESO:	ESCALA:1:1	HOJA 1 DE 1	

4 3 2 1

4 3 2 1

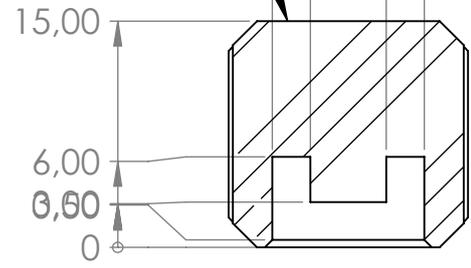
F

F

Superficie de apoyo de impresión

Ø 10,00
Para tornillo de M6

Ø 5,00

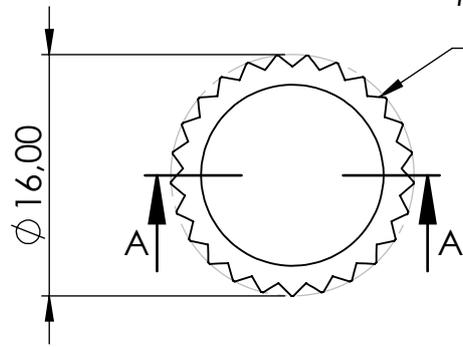


SECCIÓN A-A

E

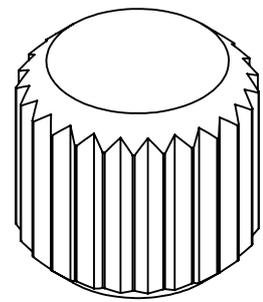
E

Moletado 2x0,8



D

D



C

C

ALTURA DE CAPA: 0,2 mm
DENSIDAD DE RELLENO: 50%
TIPO DE RELLENO: Helicoidal
MATERIAL: PLA Blanco

B

B

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISIÓN

	NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
FABR.			
CALID.			

TÍTULO:
Palomilla moletada para M6

A

MATERIAL:
 PLA Blanco

N.º DE DIBUJO
04

A4

PESO:

ESCALA:2:1

HOJA 1 DE 1

4 3 2 1