

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

# Desarrollo de sistemas de detección basados en estructuras de láseres de fibra óptica



Grado en Ingeniería  
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: Héctor Díaz Requena

Nombre y apellidos de la directora: Rosa Ana Pérez Herrera

Pamplona, fecha de defensa: 07/06/2023

upna

Universidad Pública de Navarra  
Nafarroako Unibertsitate Publikoa  
Fundación Universidad - Sociedad  
Unibertsitate - Gizarte Fundazioa

## Resumen

Este trabajo de fin de grado ha sido desarrollado por Héctor Díaz Requena que, motivado por seguir desarrollando los conocimientos sobre la fibra óptica y la cantidad de posibilidades que nos ofrece su uso, ha enfocado el estudio de sistemas de detección basados en estructuras de láseres de fibra óptica. Dicho proyecto se divide en cuatro apartados. El primero de ellos se centra en la caracterización de los distintos dispositivos que están disponibles en el laboratorio de fotónica Teralab y que se utilizarán en los sistemas implementados; el segundo, se basa en unas medidas introductorias para familiarizarnos con los sensores basados en sistemas de láseres de fibra óptica; en el tercero se realiza el montaje de una estructura de láser en anillo para su posterior aplicación en la medición de distintos líquidos con diferentes índices de refracción, cambiando el orden de algunos dispositivos para averiguar qué configuración funciona mejor; y por último, se optimiza esta estructura mediante el uso de un filtro óptico configurable, llamado WaveShaper, para analizar su efecto en las medidas realizadas.

## Abstract

This work has been carried out by Héctor Díaz Requena who, motivated to continue developing his knowledge of fibre optics and the many possibilities offered by its use, has focused on the study of detection systems based on fibre optic laser structures. This project is divided into four sections. The first of these focuses on the characterisation of the different devices available in the Teralab photonics laboratory and which will be used in the systems implemented; the second is based on introductory measures to familiarise ourselves with sensors based on fibre optic laser systems. In the third one, a ring laser structure is assembled for its subsequent application in the measurement of different liquids with different refractive indices, changing the order of some devices to find out which configuration works best; and finally, this structure is optimised by using a configurable optical filter, called WaveShaper, to analyse its effect on the measurements made.

## Tabla de contenido.

Capítulo 0 - Estado del arte. ....	10
Capítulo 1 - Marco teórico.....	14
1.1 La fibra óptica. ....	14
Tipos de fibra. ....	15
Fundamentos de la emisión óptica. ....	16
Limitaciones de la fibra óptica.....	18
1.2 Amplificación óptica. ....	19
Amplificación mediante el dopaje con tierras raras. ....	19
1.3 Láseres de fibra óptica.....	21
Fundamentos físicos de la emisión láser.....	21
Láseres de fibra dopada con erbio. ....	23
1.4 Sensores ópticos.....	24
Sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs). ....	25
Capítulo 2 - Instrumentación.....	26
2.1 Dispositivos ópticos. ....	26
Multiplexor por división en longitud de onda (WDM). ....	26
Acoplador óptico. ....	27
Circulador óptico. ....	27
Red de difracción de Bragg (FBG). ....	28
Red de difracción de Bragg con desplazamiento de fase (PS-FBG).....	29
Láser de bombeo y controlador de temperatura y corriente. ....	29
Fibra dopada con erbio (EDF). ....	30
Láser centrado en DFB 1561 nm. ....	31
2.2 Herramientas para realizar fusiones de fibra óptica. ....	31
2.3 Herramientas de caracterización.....	33
Medidor de potencia óptica (Power Meter). ....	33
Inspector de conectores de fibra.....	34
Analizador de espectros ópticos (OSA: Optical Spectrum Analyzer). ....	35
Filtro óptico configurable: WaveShaper.....	36
Capítulo 3 - Diseño y caracterización de la estructura en anillo. ....	38
3.1 Resultados la estructura en anillo en todos los dispositivos.....	39

3.2 Medida de los espectros ópticos de FBGs y PS-FBGs. ....	44
Capítulo 4 - Implementación e introducción a los láseres de fibra óptica usados como sensores de índices de refracción. ....	55
4.1 Resultados con láser DFB 1561 nm. ....	55
4.2 Implementación del WaveShaper como filtro para el DFB. ....	57
Capítulo 5 - Implementación y caracterización de la cavidad en anillo como sensor de índices de refracción.....	61
5.1 Medidas preliminares con agua pura y alcohol isopropílico. ....	62
5.2 Medidas con distintos líquidos. ....	66
5.3 Medidas con líquidos de índices de refracción calibrados a partir de 1,3. ....	70
5.4 Medidas con líquidos de índice de refracción calibrados a partir de 1,4. ....	73
Capítulo 6 - Optimización del sistema de detección basado en la estructura de láser de fibra óptica en anillo con la implementación de un WaveShaper. ....	76
6.1 Caracterización de un láser con la aplicación del filtrado del WaveShaper. ....	77
Filtro paso banda. ....	77
Filtro Notch (Filtro Rechazo banda).....	81
Filtro FBG en transmisión configurado manualmente con WaveSketch. ....	84
6.2 Mediciones de líquidos con diferentes índices de refracción con dos puntas de fibra óptica actuando como sensores. ....	88
Capítulo 7 - Conclusiones. ....	99
Capítulo 8 - Bibliografía. ....	101

## Índice de figuras.

Figura 0-1 Información sobre el punto 6 de la Agenda 2030. Agua limpia y saneamiento.[2].....	10
Figura 0-2 Información sobre el agua y su saneamiento antes de la covid-19 y su implicación en la actualidad. [4].....	11
Figura 1-1 Estructura de una fibra óptica. [22] .....	14
Figura 1-2 Teoría de la ley de Snell.[23] .....	15
Figura 1-3 Comparación de los distintos modos de fibra óptica.[24] .....	16
Figura 1-4 Bandas de energía.[25].....	17
Figura 1-5 Explicación gráfica del fenómeno de absorción.[25] .....	17

Figura 1-6 Explicación gráfica de la emisión espontánea.[25] .....	17
Figura 1-7 Explicación gráfica del fenómeno de emisión estimulada.[25] .....	18
Figura 1-8 Curva de ganancia producida por una fibra dopada con erbio en torno a 1550 nm.....	20
Figura 1-9 Esquema de una microcavidad Fabry-Pérot.[26].....	21
Figura 1-10 Esquema de la inversión de población.[25] .....	22
Figura 1-11 Configuración básica de un láser de fibra óptica. [27].....	22
Figura 1-12 - Configuración de láser con filtrado mediante WDM.[28].....	23
Figura 1-13 Niveles energéticos del Erbio con su correspondiente longitud de onda. [27] .....	24
Figura 1-14 - Resumen gráfico del funcionamiento de una red de difracción de Bragg.[29] .....	25
Figura 2-1 Multiplexor / Demultiplexor.[30] .....	27
Figura 2-2 Combinador y separador óptico.[31] .....	27
Figura 2-3 Circulador óptico.[32].....	28
Figura 2-4 Red de difracción de Bragg actuando como filtro.[33] .....	28
Figura 2-5 Espectro en transmisión del PS-FBG.[34] .....	29
Figura 2-6 Controlador del láser de bombeo utilizado en el proyecto.[35].....	30
Figura 2-7 Carrete de EDF M-12 de la marca Thorlabs.[36] .....	30
Figura 2-8 Fotografía del láser DFB de la marca Amonics. ....	31
Figura 2-9 Fotografía de la fusionadora View 7 arc fusión splicer. ....	32
Figura 2-10 Fotografía de la cortado de fibra óptica Fitel s326. ....	32
Figura 2-11 Fotografía de una peladora de fibra óptica.[37] .....	33
Figura 2-12 Fotografía del power meter que se utilizará en el laboratorio en las mediciones de potencia óptica.....	34
Figura 2-13 Analizador de espectros ópticos utilizado en el proyecto. ....	35
Figura 2-14 Ejemplo de traza tomada con el OSA. ....	36
Figura 2-15 Fotografía WaveShaper 1000s de la marca Finisar utilizado en el laboratorio. ....	37
Figura 3-1 Set-up del láser de estructura en anillo. ....	38
Figura 3-2 Potencia de salida por el puerto de reflexión del acoplador. ....	39
Figura 3-3 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 100mA. ....	40
Figura 3-4 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 150mA. ....	41
Figura 3-5 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 200mA. ....	41
Figura 3-6 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 100mA. ....	42
Figura 3-7 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 150mA. ....	42
Figura 3-8 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 200mA. ....	43

Figura 3-9 Potencia de salida por el puerto del FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA..... 44

Figura 3-10 Espectro detallado de la Figura 3-9 en la zona de interés. .... 45

Figura 3-11 Potencia reflejada del FBG 1550 nm con diferentes intensidades de bombeo. .... 45

Figura 3-12 Potencia de salida por el puerto del FBG 1554 nm con intensidad de entrada 100mA..... 46

Figura 3-13 Potencia reflejada del FBG 1554 nm con diferentes intensidades de bombeo. .... 46

Figura 3-14 Potencia de salida por el puerto del FBG 1555 nm con intensidad de entrada 100mA..... 47

Figura 3-15 Potencia reflejada del FBG 1555 nm con diferentes intensidades de bombeo. .... 47

Figura 3-16 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1544 nm con intensidad de entrada 100mA..... 48

Figura 3-17 Potencia reflejada del PS-FBG 1544 nm con diferentes intensidades de bombeo..... 48

Figura 3-18 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA..... 49

Figura 3-19 Potencia reflejada del PS-FBG 1550 nm con diferentes intensidades de bombeo..... 49

Figura 3-20 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1533 nm con intensidad de entrada 100mA..... 50

Figura 3-21 Potencia reflejada del PS-FBG 1533 nm con diferentes intensidades de bombeo..... 50

Figura 3-22 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1539 nm con intensidad de entrada 100mA..... 51

Figura 3-23 Potencia reflejada del PS-FBG 1539 nm con diferentes intensidades de bombeo..... 52

Figura 3-24 Potencias de los FBG y PS-FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA. .... 53

Figura 3-25 Espectro resultante de la interacción de la pareja de FBG y PS-FBG escogida. .... 54

Figura 4-1 Set-up básico de sensor de índices de refracción. .... 55

Figura 4-2 Espectro de la potencia de salida del láser DFB centrado en 1561,3 nm. .... 55

Figura 4-3 Potencia medida con el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en líquidos que poseen distintos índices de refracción..... 56

Figura 4-4 Potencia medida en el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación polinomial de los resultados. .... 57

Figura 4-5 Espectro de la potencia de salida del láser DFB centrado en 1561,3 nm después de aplicar el filtrado con el WaveShaper. .... 58

Figura 4-6 Captura del programa WaveSketch en el que se observa la forma del filtro aplicado al láser DFB..... 59

Figura 4-7 Potencia medida por el power meter en el sistema montaje que incluye el WaveShaper al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción. .... 59

Figura 4-8 Potencia medida con el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación polinomial de los resultados. .... 60

Figura 5-1 Potencia en  $\mu\text{w}$  medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG..... 62

Figura 5-2 Potencia en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG. .... 63

Figura 5-3 Pérdidas en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG. .... 64

Figura 5-4 Pérdidas en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol aplicando el intercambio de los FBG. .... 65

Figura 5-5 Potencia medida con el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en agua ultrapura y alcohol isopropílico con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación lineal de los resultados. .... 66

Figura 5-6 Potencia en  $\mu\text{w}$  medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en  $\text{H}_2\text{O}_2$ , agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG y PS-FBG + FBG. .... 67

Figura 5-7 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en  $\text{H}_2\text{O}_2$ , agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG y PS-FBG + FBG..... 68

Figura 5-8 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en  $\text{H}_2\text{O}_2$ , agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG + PS-FBG. .... 68

Figura 5-9 Potencia medida con el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en agua ultrapura y alcohol isopropílico, agua oxigenada y alcohol de botiquín con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación lineal de los resultados. .... 69

Figura 5-10 Cajas contenedoras de los botes de los líquidos con índices de refracción calibrados..... 70

Figura 5-11 Fotografía con diferentes portaobjetos en los que depositar las gotas de los líquidos con índices de refracción entre 1,3 y 1,32 para la posterior medición. .... 70

Figura 5-12 Fotografía con diferentes portaobjetos donde depositar las gotas de los líquidos con índices de refracción entre 1.3 y 1.32 para la posterior medición. .... 71

Figura 5-13 Potencia reflejada, medida en $\mu\text{w}$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,3 – 1,35. Se muestra además la aproximación lineal de los resultados obtenidos.....	72
Figura 5-14 Botes de líquido de índices de refracción de entre 1,4 – 1,412.....	73
Figura 5-15 Potencia reflejada, medida en $\mu\text{w}$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,4 – 1,46. Se muestra además la aproximación lineal de los resultados obtenidos.....	74
Figura 5-16 Potencia reflejada, medida en $\mu\text{w}$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,4 – 1,48.....	75
Figura 6-1 Espectro en reflexión del PS-FBG no comercial centrado en 1550,75 nm. ..	76
Figura 6-2 Set-up del láser de estructura en anillo implementando el WaveShaper. ...	77
Figura 6-3 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro paso banda centrado en 1549,78 nm y de anchura 0,078 nm. ....	78
Figura 6-4 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda. ....	79
Figura 6-5 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda.....	79
Figura 6-6 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda en las primeras 650 muestras.....	80
Figura 6-7 Ejemplo del espectro en magnitud y en fase que conforma un filtro notch.[40] .....	81
Figura 6-8 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro rechazo banda centrado en 1549,864 nm. ....	82
Figura 6-9 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro rechazo banda. ....	83
Figura 6-10 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro rechazo banda... ..	83
Figura 6-11 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro generado manualmente. ....	85
Figura 6-12 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro configurado manualmente.....	86
Figura 6-13 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro configurado manualmente. ....	86
Figura 6-14 Captura del programa WaveSketch en el que se observa la forma del filtro aplicado al espectro del PS-FBG no comercial. ....	88
Figura 6-15 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está al aire. ....	89
Figura 6-16 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está al aire. ....	90



Figura 6-17 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en alcohol de botiquín. .... 91

Figura 6-18 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en alcohol de botiquín. .... 92

Figura 6-19 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en agua ultrapura. .... 93

Figura 6-20 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en agua ultrapura. .... 94

Figura 6-21 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en alcohol isopropílico. ... 95

Figura 6-22 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en alcohol isopropílico. .... 96

Figura 6-23 Potencia en nW medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en los tres líquidos. .... 97

Figura 6-24 Potencias en nW medidas por el power meter cuando sumergimos las dos puntas que actúan como sensores en los distintos líquidos respecto al índice de refracción. Se muestra además la aproximación lineal en color verde de los resultados obtenidos..... 97

## Índice de tablas.

Tabla 1-1 Relación entre dopantes y el rango de longitudes de onda que amplifican... 19

Tabla 5-1 Resumen de las pendientes y sus errores de las rectas que unen las potencias de las distintas potencias medidas en este capítulo. .... 75

Tabla 6-1 Resumen de las pendientes y sus errores de las rectas que unen las potencias de las distintas potencias medidas en este capítulo. .... 98

## Capítulo 0 - Estado del arte.

En este capítulo 0 de este proyecto tenemos como objetivo proporcionar un panorama completo y actualizado sobre el ámbito del agua limpia y saneamiento, uno de los objetivos más importantes de la Agenda 2030.

El objetivo de la Agenda 2030 es garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todos.

La misión consiste en:

- Lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todos.
- Lograr el acceso a servicios de saneamiento e higiene adecuados y equitativos para todos y poner fin a la defecación al aire libre, prestando especial atención a las necesidades de las mujeres y las niñas y las personas en situaciones de vulnerabilidad.
- Mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación, eliminando el vertimiento y minimizando la emisión de productos químicos y materiales peligrosos, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.
- Aumentar considerablemente el uso eficiente de los recursos hídricos en todos los sectores y asegurar la sostenibilidad de la extracción y el abastecimiento de agua dulce para hacer frente a la escasez de agua y reducir considerablemente el número de personas que sufren falta de agua.
- Implementar la gestión integrada de los recursos hídricos a todos los niveles, incluso mediante la cooperación transfronteriza, según proceda.
- Proteger y restablecer los ecosistemas relacionados con el agua, incluidos los bosques, las montañas, los humedales, los ríos, los acuíferos y los lagos.[1]



Figura 0-1 Información sobre el punto 6 de la Agenda 2030. Agua limpia y saneamiento.[2]

La importancia de llevar a cabo este objetivo es que el acceso a agua, saneamiento e higiene es un derecho humano, y, sin embargo, miles de millones de personas siguen enfrentándose a diario a enormes dificultades para acceder a los servicios más elementales. Aproximadamente 1.800 millones de personas en todo el mundo utilizan una fuente de agua potable que está contaminada por restos fecales. Unos 2.400 millones de personas carecen de acceso a servicios básicos de saneamiento, como retretes y letrinas. La escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial y este porcentaje podría aumentar. Más del 80% de las aguas residuales resultantes de la actividad humana se vierte en los ríos o en el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación.

Si no se llevan a cabo cada uno de los puntos de la Agenda 2030 con respecto al agua y saneamiento, las consecuencias pueden ser nefastas. Más de 2 millones de personas mueren cada año por enfermedades diarreicas en todo el mundo. La falta de higiene y el agua insalubre son responsables de casi el 90% de estas muertes, y afectan principalmente a los niños (el mal saneamiento del agua es una de las principales causas de fallecimiento de niños menores de 5 años; más de 800 niños mueren cada día por enfermedades diarreicas asociadas a la falta de higiene).

El impacto económico de no invertir en agua y saneamiento se calcula en el 4,3% del producto interno bruto (PIB) de toda África Subsahariana. El Banco Mundial estima que el PIB de la India se reduce en un 6,4% debido a las consecuencias y los costos económicos de la falta de saneamiento. Sin mejores infraestructuras y sin una gestión más eficaz, millones de personas seguirán muriendo cada año y se seguirá perdiendo diversidad biológica y resiliencia de los ecosistemas, socavando la prosperidad y los esfuerzos realizados en pro de un futuro más sostenible.[3]



Figura 0-2 Información sobre el agua y su saneamiento antes de la covid-19 y su implicación en la actualidad. [4]

Como ya hemos visto, el agua limpia y el saneamiento son aspectos fundamentales para garantizar la salud y el bienestar de las comunidades. En este contexto, los sensores de fibra óptica han demostrado ser una herramienta prometedora para mejorar la gestión y monitorización de los recursos hídricos, así como para el control y mantenimiento de sistemas de saneamiento.

Estos sensores se pueden emplear tanto en agua potable como en aguas residuales y en infinidad de líquidos y ofrecen numerosas ventajas en comparación con los sensores tradicionales. A continuación, se enumeran todas las ventajas que ofrecen:

- Inmunidad a las interferencias electromagnéticas, ya que los materiales que forman los sensores son dieléctricos.
- Seguridad, ya que se evitan cortocircuitos y chispazos en ambientes hostiles.
- Ligereza y dimensiones reducidas.
- Gran margen dinámico y alta sensibilidad.
- Fácil multiplexación utilizando como medio de interconexión de sensores la propia fibra óptica, que es el medio de transmisión más utilizado en la actualidad en la mayor parte de las aplicaciones de telecomunicación.
- Puede resultar fácil de sustituir. Existen sensores de fibra, como el que se muestra en este trabajo que, cuando deja de ser funcional, tan solo hay que aplicar un corte transversal a la punta de la fibra óptica y tenemos un sensor totalmente nuevo.

Los sensores de fibra óptica modulados en intensidad son los más adecuados en términos prácticos para la detección de índice de refracción (IR), ya que los sensores modulados en longitud de onda suelen ser sensibles a las variaciones de temperatura.[5]

A lo largo de los años, se han propuesto varios sensores de intensidad modulada para la detección de IR, concretamente, sensores de estructura de macro-curvatura [6], configuraciones de interferómetro [7], y sensores de resonancia plasmónica superficial [8] entre otros. Aunque estos sensores han demostrado una buena sensibilidad en la detección de IR, todos tienen en común el inconveniente de que las unidades de detección deben sumergirse completamente en el medio analizado, lo cual, en aplicaciones reales, resulta bastante difícil y provoca daños en el sensor, causando pérdidas económicas al usuario.

Para resolver este problema, una solución alternativa es utilizar puntas de fibra como elemento sensor[9]. De este modo, sólo los extremos de la punta de fibra se sumergen en el medio analizado, lo que reduce la probabilidad de dañar la unidad sensora, permite realizar mediciones IR mínimamente invasivas y facilita la sustitución del sensor en caso de daño.

Existen diferentes configuraciones de puntas de fibra para la detección de IR con alta sensibilidad, repetibilidad y precisión. Van desde las más sencillas, como las puntas de fibra multimodo, hasta las más complejas, como las microesferas [10]. Los sensores de intensidad requieren una referenciación de la señal para eliminar las fluctuaciones de la

fuelle y, en ocasiones, existe un elevado ruido de señal cuando los sensores se sumergen en líquidos [11], [12]. Por otro lado, los láseres de fibra dopada con erbio en cavidad en anillo utilizan la ganancia proporcionada por la fibra dopada con erbio de forma más eficiente, y también tienen un rango espectral libre (FSR) de cavidad dos veces mayor para la misma longitud de cavidad.[13]

Además de eso, los sensores de fibra óptica son muy utilizados en el sector farmacéutico. La industria farmacéutica ha utilizado ampliamente la Tecnología Analítica de Procesos (PAT) para monitorizar el proceso en tiempo real, permitiendo una mejor comprensión de los procesos y mejorando la calidad del producto final. [14], [15]

La implementación de PAT requiere sensores para medir las variables de interés, como la concentración de reactivos o productos. Desde hace más de un siglo, la medida de la concentración es muy importante en las industrias de proceso, incluida la farmacéutica. El control de este parámetro, de forma rápida y precisa, es esencial para optimizar la producción [14]–[16]. El control de la concentración permite reducir costes, disminuir la producción de residuos y maximizar el uso de reactivos[17].

En el campo farmacéutico, las pruebas cuantitativas de Ingredientes Farmacéuticos Activos (API) son muy comunes. Para ello, las mediciones de concentración de API en tiempo real son deseables, ya que evitan el proceso de muestreo. De esta forma, la preparación de muestras es innecesaria, eliminando la posibilidad de retrasos. Sin embargo, a veces el PAT disponible es destructivo, lento y costoso. Por esta razón, existe una necesidad continua de desarrollar nuevas tecnologías que permitan realizar medidas en tiempo real con altas tasas de adquisición y de forma no invasiva/no destructiva [17]–[20], [21].

## Capítulo 1 - Marco teórico.

En este capítulo se van a describir diferentes conceptos teóricos relacionados con la fibra óptica, así como los distintos tipos de fibra que existen. Se presentarán también los dispositivos ópticos que se han utilizado a lo largo de este trabajo fin de grado explicando su funcionamiento y características. Por último, se presenta una introducción sobre el funcionamiento de varios láseres de fibra óptica y su uso en el ámbito de los sensores de fibra.

### 1.1 La fibra óptica.

La fibra óptica es un tipo de guía de onda dieléctrica que trabaja en el rango de frecuencias óptico [ $10^{14} - 10^{15}$ ] Hz. Es un hilo flexible y transparente, comúnmente fabricado con sílice o plástico con unas dimensiones muy reducidas. Este medio es capaz de transmitir información a largas distancias y con una alta velocidad de transmisión.

La fibra óptica está formada por tres componentes: el núcleo (*core*), cubierta (*cladding*) y el recubrimiento (*coating*). El núcleo es el componente por el cual, por lo general, viaja la luz y la cubierta sirve, en la mayoría de los casos, para que esta luz se redirija hacia el núcleo y no salga al exterior. El recubrimiento tiene como función proteger la fibra por ejemplo de la humedad o agentes externos que pueda dañar su estructura.

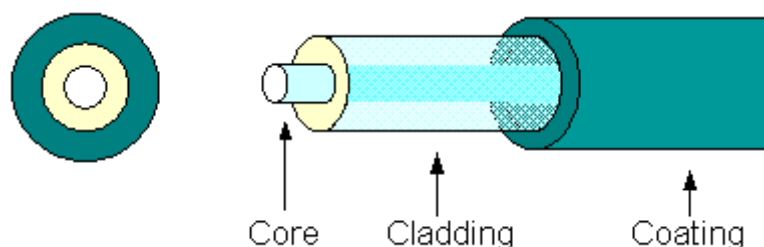


Figura 1-1 Estructura de una fibra óptica. [22]

El principio de funcionamiento de la fibra óptica se basa en la reflexión interna total: la luz pasa de un medio más denso ópticamente (índice de refracción  $n_1$ ) a otro medio menos denso (índice de refracción  $n_2$ ) y el rayo de luz incidente con un ángulo mayor o igual al ángulo crítico, se refracta de tal modo que es incapaz de atravesar la superficie entre ambos medios, por lo que se refleja completamente. Así pues, el haz luminoso queda totalmente confinado en el medio más denso (en el núcleo, si hablamos de la fibra óptica) y ésta se propaga por su interior. Esto tiene su fundamento teórico en las leyes de Snell utilizando las siguientes ecuaciones.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

$$\theta_c = \arccos(n_2/n_1) \quad (2)$$

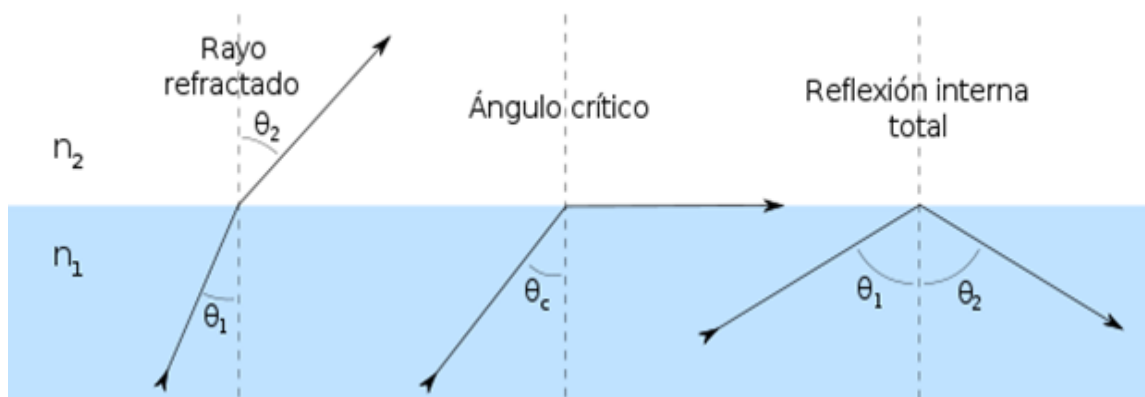


Figura 1-2 Teoría de la ley de Snell.[23]

A partir de las leyes de Snell, se pueden establecer las ecuaciones de Fresnel en términos de los ángulos de incidencia y transmisión. A partir de estas ecuaciones se obtienen los coeficientes de transmisión y de reflexión, que son la base para llevar a cabo los sistemas de detección que se van a desarrollar en el trabajo de fin de grado. R es el coeficiente de reflexión y T es el coeficiente de transmisión.

$$R = ((n_1 - n_2) / (n_1 + n_2))^2 \quad (3)$$

$$T = 4 * n_1 * n_2 / (n_1 + n_2) \quad (4)$$

### Tipos de fibra.

Las principales diferencias entre los dos tipos de fibra se basan en las dimensiones físicas de la fibra, la longitud de onda de operación, la fuente de luz empleada o su ancho de banda.

El diámetro del núcleo de fibra monomodo es de alrededor de 9  $\mu\text{m}$ , y el diámetro del núcleo de fibra multimodo puede ser, habitualmente, de 50  $\mu\text{m}$  o 62,5  $\mu\text{m}$ . El cable de fibra SMF posee un funcionamiento optimizado entre las longitudes de onda que van de los 1310 nm a los 1550 nm. Por otra parte, el cable de fibra MMF, es una mejor opción para su uso en longitudes de onda en torno a los 850 nm y 1310. La fibra SMF también resulta muy útil para aplicaciones de larga distancia debido a la baja atenuación que presenta, sobre todo en la tercera ventana de telecomunicaciones, mientras que la fibra MMF ofrece una serie de ventajas en aplicaciones de corta distancia.

Al mismo tiempo, las fibras ópticas se pueden clasificar en varios tipos, como son la fibra de salto de índice y la de índice gradual.

Las fibras de salto de índice son aquellas en las que el valor del índice de refracción del núcleo es constante y mayor que el índice de refracción del revestimiento o cubierta. La trayectoria seguida por los distintos modos va a ser diferente, llegando al extremo de la fibra en diferentes instantes de tiempo. Por otra parte, la fibra óptica de índice gradual consiste en una distribución que logra que todos los modos se propaguen de tal manera

que lleguen a la vez al final de la fibra. Se caracteriza por tener un núcleo con un índice de refracción variable, siendo máximo en el centro, para ir disminuyendo gradualmente a medida que nos separamos del eje de la fibra hasta llegar a un valor igual al índice de refracción del revestimiento.

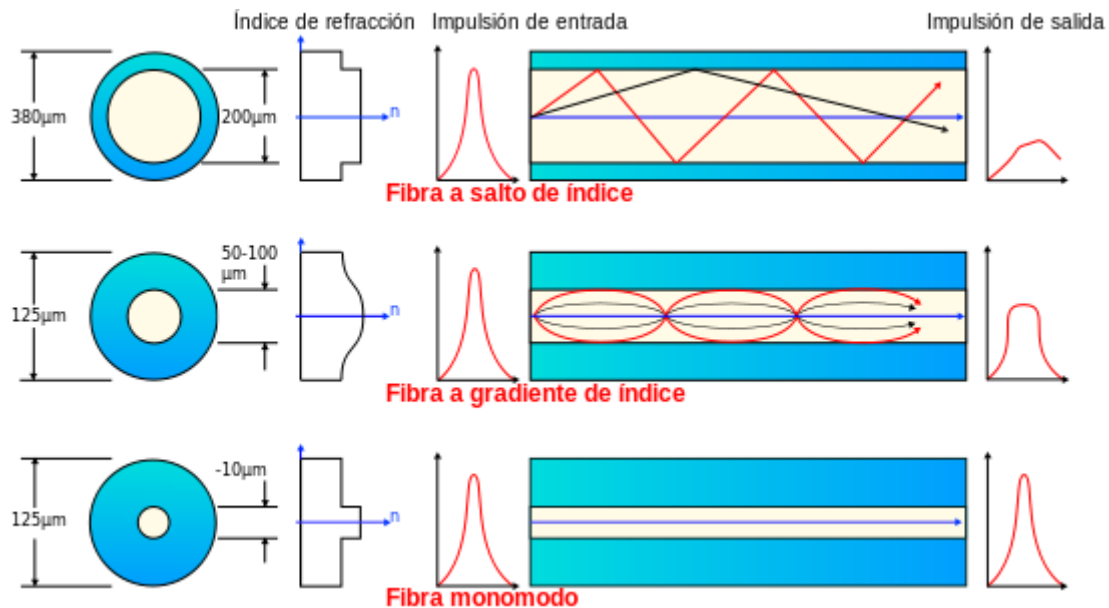


Figura 1-3 Comparación de los distintos modos de fibra óptica.[24]

### Fundamentos de la emisión óptica.

Dado que la luz está formada por unos fotones, que son partículas de masa cero que transportan energía electromagnética, los fenómenos que explican el funcionamiento de los emisores de luz se basan en el estudio de las interacciones luz-materia.

Existen diferentes niveles de energía para estos fotones. Los niveles de energía se agrupan en lo que se denomina bandas de energía, como son la banda de valencia (BV) y la banda de conducción (BC). Estas bandas están divididas por una banda de energía que se llama banda prohibidas (o *band-gap*, en inglés). A partir de esta banda prohibida, como se puede ver en la Figura 1-4, se determinan las propiedades eléctricas del material pudiendo ser conductor, semiconductor o aislante.



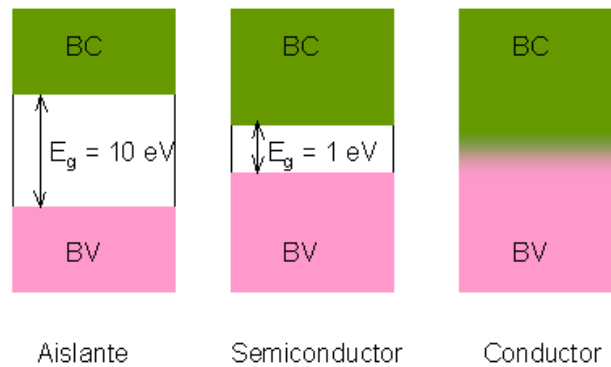


Figura 1-4 Bandas de energía.[25]

Dentro de estas bandas energéticas se producen simultáneamente tres mecanismos básicos, aunque normalmente siempre predomina uno sobre los demás dependiendo de la situación óptica.

- **Mecanismo de absorción.** Un material semiconductor absorbe la energía de un fotón incidente, creando un estado de mayor energía que permite que un electrón se mueva de la banda de valencia a la banda de conducción.

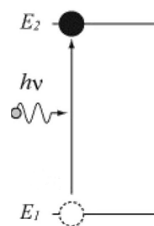


Figura 1-5 Explicación gráfica del fenómeno de absorción.[25]

Los fotodetectores, que detectan cuando la luz que incide sobre ellos, utilizan este mecanismo.

- **Mecanismo de emisión espontánea.** Se produce un fotón con fase y dirección de propagación arbitrarias cuando un electrón pasa de la banda conductora a la banda de valencia, lo que lleva al sistema a un estado de menor energía.

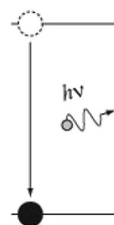


Figura 1-6 Explicación gráfica de la emisión espontánea.[25]

Los diodos LED se utilizan en este mecanismo para producir luz. Dada la aleatoriedad de la fase y la dirección de propagación de los electrones que produce un diodo LED, la luz que emite es incoherente.

- **Mecanismo de emisión estimulada.** Un electrón viaja de la banda conductora a la banda de valencia por el impacto de un fotón, donde se recombina con un hueco. Esto hace que se produzca un fotón que tiene la misma fase y dirección de propagación que el fotón incidente.

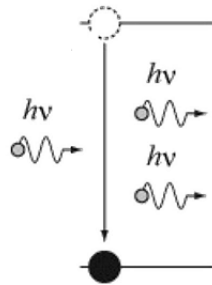


Figura 1-7 Explicación gráfica del fenómeno de emisión estimulada.[25]

Los láseres producen luz a través de este mecanismo. La luz coherente (pares de electrones que se propagan en la misma fase y dirección) predomina sobre la luz incoherente cuando se utiliza la amplificación por emisión estimulada.

### Limitaciones de la fibra óptica.

La fibra óptica tiene restricciones de longitud, como cualquier otro medio de transmisión. Dos de estas restricciones, la pérdida de potencia resultante de las pérdidas asociadas con la transmisión de energía por cualquier medio y la dispersión de los pulsos de luz provocada por su propagación dentro de la fibra, pueden ser extremadamente problemáticas.

Existen dos tipos de atenuación: intrínseca y extrínseca:

- **Atenuación intrínseca:** El propio material tiene picos de absorción situados en la zona infrarroja para las longitudes de onda altas y en la zona ultravioleta para las más bajas, lo cual es inherente al uso de sílice como en la fabricación de la fibra y por tanto inevitable. Las geometrías locales (más pequeñas que la longitud de onda) y las imperfecciones en el índice de refracción también dan como resultado la dispersión espacial de la luz incidente, lo que reduce su potencia.
- **Atenuación extrínseca:** Es el resultado de errores cometidos durante el manejo y la fabricación de la fibra. Si hubo rastros de humedad en el aire durante el proceso de fabricación, los iones  $\text{OH}^-$  se manifestarán dentro de la fibra y crearán un pico de absorción peligroso a 1380 nm. Al manipular la fibra, las macrocurvaturas (doblar la fibra más de lo recomendado por el fabricante) y las microcurvaturas (torsión y estiramiento inapropiados) darán como resultado este tipo de atenuación.

Las dispersiones fundamentales de la fibra óptica son tres: intermodal, intramodal y por modo de polarización.

## 1.2 Amplificación óptica.

El uso de amplificadores ópticos, cuyo objetivo es aumentar la potencia de una señal óptica manteniendo, en la mayor medida posible, sus otras características, es necesario para hacer frente a las limitaciones de potencia en muchos sistemas de comunicación.

Hay dos categorías de amplificadores ópticos. La primera categoría incluye dispositivos que aumentan la luz utilizando los efectos no lineales de la fibra, como los amplificadores *Raman* o *Brillouin*. La segunda clase de amplificadores funciona potenciando la luz a medida que viaja a través de una fibra que tiene propiedades únicas, como las fibras dopadas con tierras raras.

Esta segunda clase va a ser la que tenga lugar en la realización de este trabajo de fin de grado. Utilizaremos fibra dopada con erbio (EDF según sus siglas en inglés: *erbium-doped fiber*) para amplificar la banda de en torno a 1550 nm.

### *Amplificación mediante el dopaje con tierras raras.*

Indiferentemente del dopante, el funcionamiento de este tipo de amplificadores es el mismo; mediante un láser de bombeo óptico a longitudes de onda concretas produce una inversión de población en el núcleo de la fibra, de forma que los iones del medio dopante (EDF en nuestro caso) pasan del estado fundamental al excitado, provocando así emisión estimulada.

Esta inversión de población se produce a lo largo de toda la fibra hasta que la atenuación implícita en esta lo impida. Se define así el término longitud óptima, que se trata de la longitud que deberá tener la fibra dopada para que tenga efectos de amplificación a lo largo de todo su recorrido, sin llegar a tener más atenuación que amplificación en ningún punto de este medio activo.

Dado que cada tipo de dopante o tierra rara amplifica la señal dentro de un rango determinado, será necesario saber en qué longitud de onda se quiere trabajar a la hora de seleccionar el dopaje necesario. La Tabla 1-1 enumera cada dopante junto con su rango de ganancia correspondiente.

Dopante	Rango de $\lambda$ que es amplificado (nm)
Praseodimio (Pr <sup>3+</sup> )	1280-1340
Tulio (Tm <sup>3+</sup> )	1450-1520
Erbio (Er <sup>3+</sup> )	1500-1600

*Tabla 1-1 Relación entre dopantes y el rango de longitudes de onda que amplifican.*

El erbio es uno de los dopantes más utilizados en comunicaciones ópticas ya que trabaja a longitudes de onda situadas en la tercera ventana, la cual ofrece muchas ventajas en las comunicaciones ópticas a causa de su baja atenuación.

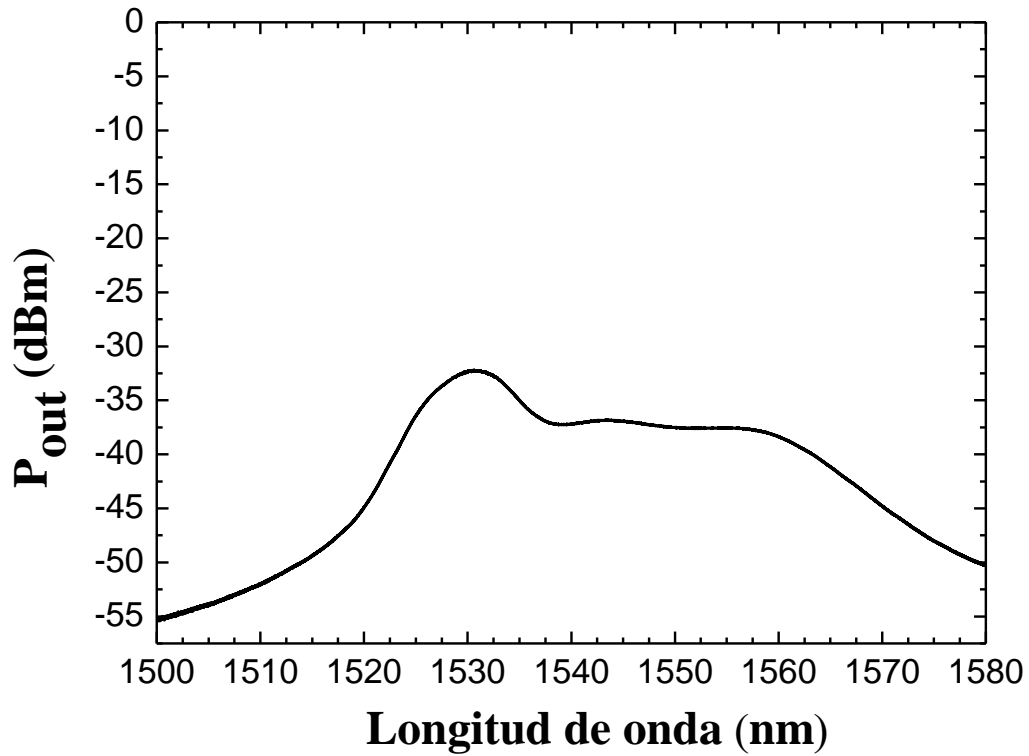


Figura 1-8 Curva de ganancia producida por una fibra dopada con erbio en torno a 1550 nm.

### 1.3 Láseres de fibra óptica.

En este apartado se explican algunos de los fundamentos y configuraciones de los láseres de fibra empelados en la mayoría de las aplicaciones ópticas, y de algunos amplificadores. Finalmente, se presentallas posibles configuraciones de los láseres, todos ellos de fibra óptica.

#### *Fundamentos físicos de la emisión láser.*

Un láser emite luz coherente, que es aquella en la que los fotones tienen la misma fase y dirección de propagación, tal y como se describe en el subapartado sobre los *fundamentos de la emisión óptica*.

Se requerirá un sistema de retroalimentación positiva para garantizar que la emisión estimulada supere a la espontánea. Dos espejos reflectantes que pueden crear cavidades entre ellos y reflejar la luz son algunas de las herramientas que se pueden usar para lograr esto. Esto hace que la luz se refleje varias veces dentro de la cavidad.

A continuación, se muestra un ejemplo de un esquema básico de una cavidad Fabry-Pérot, que consta de dos espejos planos que contienen un material semiconductor y es una de las estructuras de cavidad láser más comúnmente utilizadas.

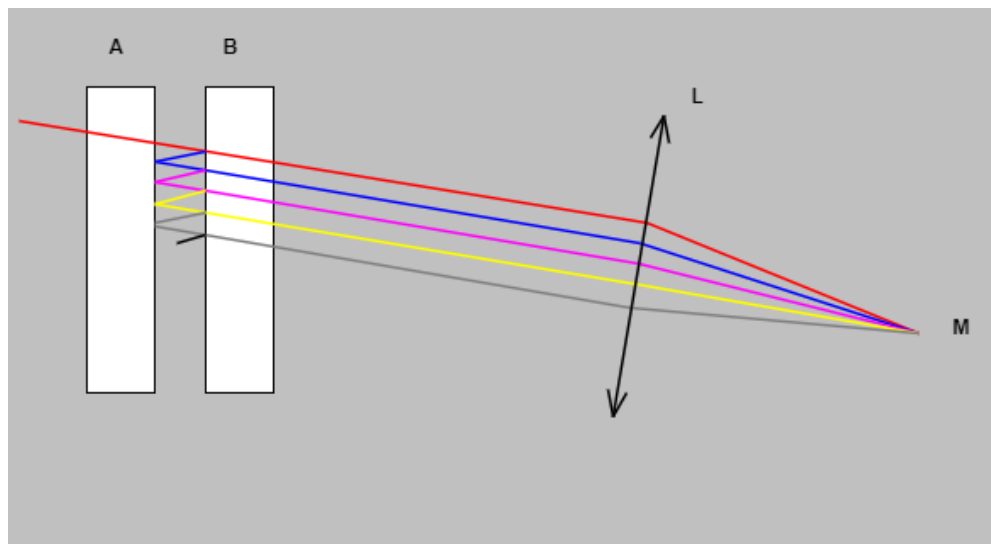


Figura 1-9 Esquema de una microcavidad Fabry-Pérot.[26]

Para lograr la ganancia requerida, se requiere suceda el efecto de inversión de población, lo que solo puede tener lugar si la densidad de portadores inyectados supera un límite predeterminado conocido como densidad de transparencia.

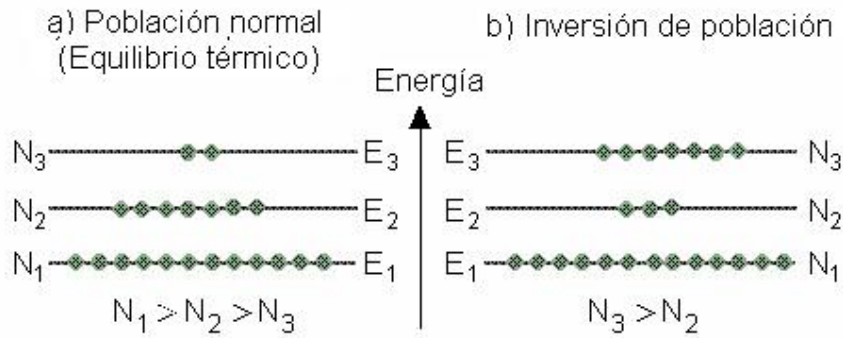


Figura 1-10 Esquema de la inversión de población.[25]

A continuación, se explican las dos principales topologías de los láseres de fibra óptica.

### Topología de láser en línea

Los láseres, ya sean de gas o de estado sólido, necesitan un medio que proporcione ganancia a las longitudes de onda que se pretenden emitir y una realimentación y filtrado selectivo en longitud de onda que favorezca la emisión estimulada frente a la emisión espontánea, a este elemento se le conoce como medio de ganancia o medio activo. En el presente trabajo fin de grado se emplearán fibras dopadas con erbio como medios de ganancia.

Para realizar una realimentación selectiva en longitud de onda se utilizan configuraciones ópticas que van desde la pareja de espejos que forman un resonador Fabry-Pérot a estructuras más elaboradas realizadas en semiconductor o con fibras ópticas. En cualquier caso, habitualmente, estas estructuras reciben el nombre de cavidades.[27]



Figura 1-11 Configuración básica de un láser de fibra óptica. [27]

Entre otros, los dispositivos que se pueden usar para generar reflectores o espejos son circuladores o redes de difracción de Bragg (FBG según sus siglas en inglés: *fiber Bragg grating*). En este último escenario, también funcionarían como un filtro para amplificar solo la longitud de onda deseada, conocida como la longitud de onda de Bragg.

### Topología de láser en anillo

En la siguiente configuración, que se puede ver en la Figura 1-12, para insertar en el medio activo la potencia proveniente del láser de bombeo de longitud de onda 980 nm, se acopla un láser de bombeo a un WDM (*wavelength division multiplexing*) de longitudes de onda 980/1550 nm. De esta forma se obtendrá la curva de ganancia que necesitamos para construir nuestro amplificador. Después, se coloca un acoplador 50:50 (o un circulador) que dirige la mitad de esa potencia a una red de difracción de *Bragg* o FBG. Este FBG selecciona la longitud de onda que se desea amplificar. La potencia reflejada se redirige por la pata del acoplador que cierra la topología en anillo y entra por el puerto de 1550 nm del WDM. Esta topología de láser en anillo será la utilizada para este trabajo de fin de grado. Su funcionamiento está completamente explicado y desarrollado en profundidad en capítulos posteriores.

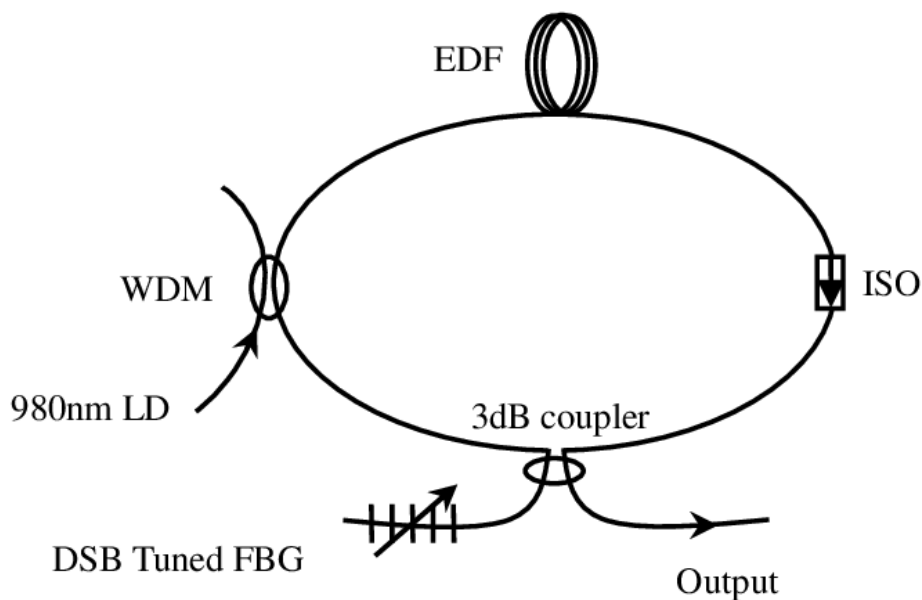


Figura 1-12 - Configuración de láser con filtrado mediante WDM.[28]

### *Láseres de fibra dopada con erbio.*

Este tipo de láseres se basan en el principio de emisión estimulada, con la particularidad de que los iones de erbio, que facilitan en gran medida la emisión estimulada, se han dopado en el núcleo de la fibra. Como la zona de bajas pérdidas de las fibras de sílice, que se utilizan en las comunicaciones ópticas, se sitúa alrededor de 1550 nm, es interesante focalizarnos sobre esta zona.

Los niveles de energía correspondientes a la capa de valencia y la capa conductora ( $E_1$  y  $E_2$ ) para este tipo de láseres son los de las longitudes de onda de 0,98 y 1,48  $\mu\text{m}$ , de forma que cuando  $E_2$  se llena de electrones, se invierte la población entre  $E_2$  y  $E_1$ , lo que da como resultado emitir a una longitud de onda de 1550 nm para una diferencia de energía de 0,80 eV, que corresponde a la diferencia entre estos niveles de energía.

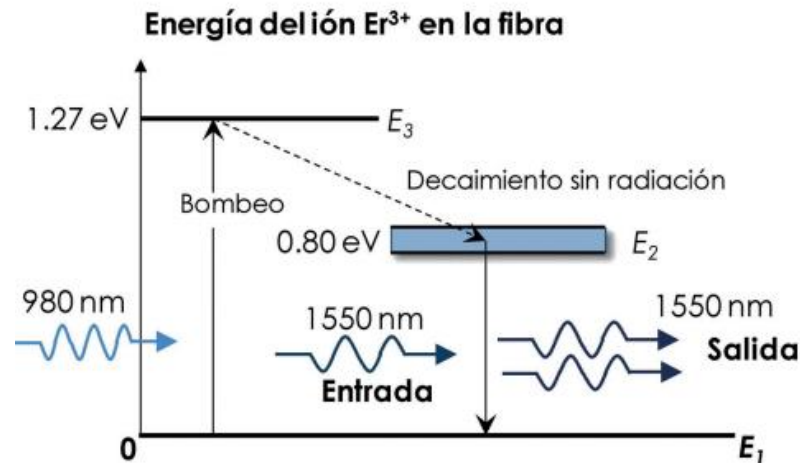


Figura 1-13 Niveles energéticos del Erblio con su correspondiente longitud de onda. [27]

#### 1.4 Sensores ópticos.

Este capítulo describe los tipos de sensores basados en fibra que hacen uso de las mejores tecnologías ópticas, junto con su funcionamiento físico y cómo se implementan en el presente trabajo fin de grado.

El tamaño compacto de los sensores ópticos en comparación con otros sensores con sensibilidades parecidas, es uno de los principales beneficios de usarlos para medir magnitudes físicas. Además de su reducido tamaño, otra de sus principales características es su inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas.

Aunque seguramente, lo más interesante de hacer uso de sensores ópticos es la facilidad que presentan frente a otros sensores para realizar mediciones. La mayoría de sensores deben estar sumergidos en la muestra que se analiza para obtener resultados. En contraposición, tenemos los sensores ópticos que solo debe estar sumergido, en la muestra a analizar, el extremo de la fibra óptica, pudiendo ser reemplazado con facilidad con tan solo el corte transversal de la punta.



### Sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs).

Una red de difracción de Bragg es una microestructura con un índice de refracción espacialmente variable, lo que significa que normalmente se eleva a medida que nos movemos por el espacio.

Su pequeño tamaño, de tan solo unos pocos milímetros, facilita su integración en una fibra óptica, lo que hace que el índice de refracción de su núcleo cambie gradualmente en un lugar específico a lo largo de su longitud.

Por tanto, una red de Bragg es, en esencia, un filtro de banda estrecha porque, dependiendo de la longitud de onda, su estructura resonante hace que funcione como un espejo selectivo. Como resultado, 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 un ancho espectral muy estrecho, centrado alrededor de la longitud de onda correspondiente al período y al índice de difracción de la red de difracción. Esta longitud de onda es conocida como longitud de onda de Bragg,  $\lambda_b$ .

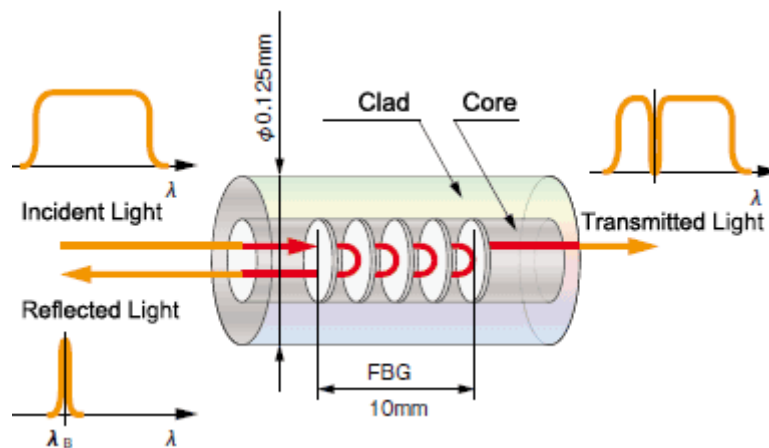


Figura 1-14 - Resumen gráfico del funcionamiento de una red de difracción de Bragg.[29]

Como se aprecia en la Figura 1-14, para que la red de difracción refleje una longitud de onda específica, se introduce una fuente de banda ancha como señal incidente. La señal incidente menos la banda rechazada es finalmente la señal transmitida.

Una FBG es sensible tanto a la deformación como a los cambios de temperatura. Si se estira o comprime, cambiará el índice de refracción de la microestructura, que generará un cambio en la longitud de onda de Bragg proporcional a la deformación aplicada. El fundamento teórico se basa en la ley de Bragg que se resume en la siguiente ecuación.

$$n * \lambda_b = 2 * d * \text{sen } \theta \quad (5)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda que refleja la red de difracción llamada longitud de onda de Bragg,  $n$  es un número entero,  $d$  es la distancia entre es la distancia entre los planos de la red cristalina y  $\theta$  es el ángulo entre los rayos incidentes y la red de dispersión.

## Capítulo 2 - Instrumentación.

En este apartado se presenta una breve introducción sobre los dispositivos utilizados tanto para realizar los distintos sistemas de detección como la instrumentación utilizada para su caracterización.

### 2.1 Dispositivos ópticos.

La necesidad de manejar la luz a lo largo de su recorrido desde la fuente al receptor condicionó la aparición de dispositivos electro-ópticos, tanto activos como pasivos, que permitieran manejar la señal óptica con facilidad. En este apartado se describen algunos de los principales dispositivos empleados en la realización de este proyecto.

#### *Multiplexor por división en longitud de onda (WDM).*

Los WDM son dispositivos pasivos y bidireccionales que son capaces de multiplexar y demultiplexar varias señales sobre una fibra óptica mediante portadoras ópticas de distinta longitud de onda usando la luz procedente de un láser.

En el presente trabajo, utilizaremos un WDM que constará de tres puertos. Dos de estos puertos se emplearán como entrada, multiplexando las longitudes de onda empleadas (980nm y 1550nm). El tercero de estos puertos será de salida, conocido como puerto común. Es importante decir que estas dos funciones se pueden utilizar al mismo tiempo, es decir, este dispositivo puede funcionar tanto como multiplexor y demultiplexor.

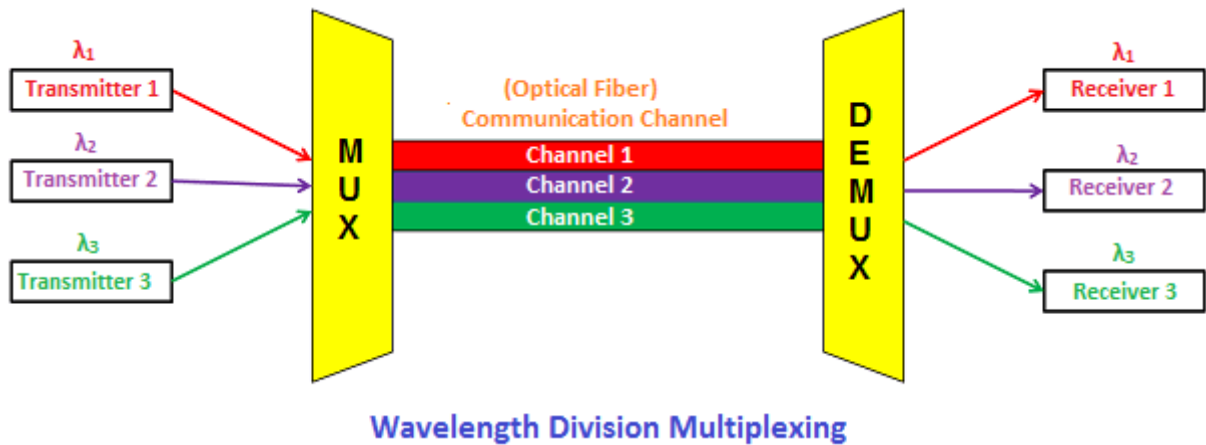


Figura 2-1 Multiplexor / Demultiplexor.[30]

### Acoplador óptico.

Los acopladores ópticos presentan notables diferencias con los dispositivos anteriormente descritos. El WDM divide las distintas longitudes de onda en canales diferentes, mientras que los acopladores de fibra óptica dividen la potencia de la luz y la envían a un canal diferente.

Los acopladores ópticos son bidireccionales y su fundamento teórico está basado en el fenómeno óptico de acoplamiento de campos evanescentes. Este fenómeno explica que el campo modal del pulso guiado en el núcleo viaja más allá de éste y acercándose suficiente otra fibra, el campo terminará acoplándose a la segunda fibra. La Figura 2-2, muestra un esquema del funcionamiento de un acoplador óptico de 2x1.

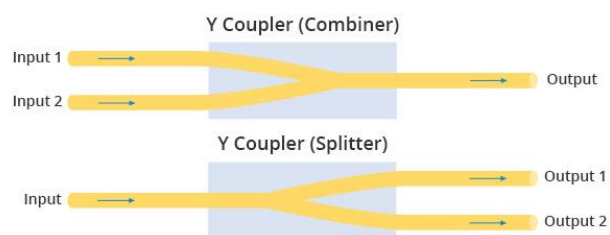


Figura 2-2 Combinador y separador óptico.[31]

### Circulador óptico.

Un circulador óptico es un dispositivo que está diseñado para pasar luz de una fibra óptica a otra. Es un dispositivo que enruta la luz según la dirección de propagación de esta. Tanto el circulador óptico como el aislador óptico se pueden utilizar para hacer

avanzar la luz en una única dirección. Se transmite una señal del puerto 1 al puerto 2 y otra señal se transmite del puerto 2 al puerto 3 pero, como se puede ver en la figura 2-3, la luz no viaja del puerto 3 al 1.

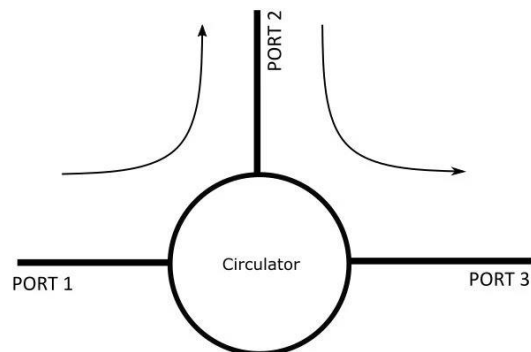


Figura 2-3 Circulador óptico.[32]

### Red de difracción de Bragg (FBG).

Las redes de difracción de Bragg, también conocidas como FBG, son unos elementos basados en microestructuras fotónicas sobre fibra óptica que actúan como filtro de banda estrecha de una determinada longitud de onda. Esto es, si introducimos luz procedente de una fuente de banda ancha, se va a reflejar un espectro muy estrecho centrado en la longitud de onda de Bragg. A la salida tendremos ese espectro menos la banda de rechazo.

Esto nos va a permitir aprovechar esta red de difracción de Bragg que combinada con el resto de los elementos ópticos permitan crear sistemas de láseres de fibra de una o más longitudes de onda.

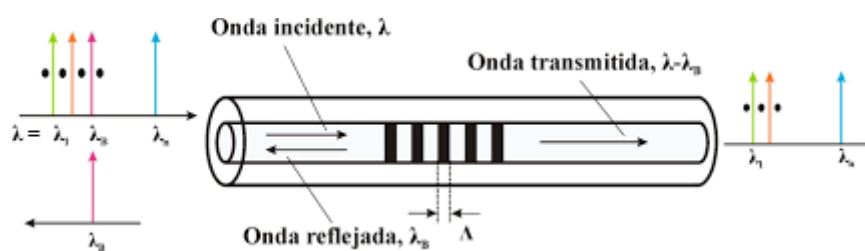


Figura 2-4 Red de difracción de Bragg actuando como filtro.[33]

### *Red de difracción de Bragg con desplazamiento de fase (PS-FBG).*

La diferencia entre estos dispositivos y la red de difracción de Bragg convencional, es que, si introducimos luz procedente de una fuente de banda ancha, muestran una banda de transmisión muy estrecha dentro del espectro de la banda de reflexión, como se puede ver en la Figura 2-5.

Los PS-FBG tienen aplicaciones interesantes en comunicaciones ópticas y detección debido a sus características especiales de filtrado, razón por la que se ha empleado en y caracterizado en nuestro sistema de detección.

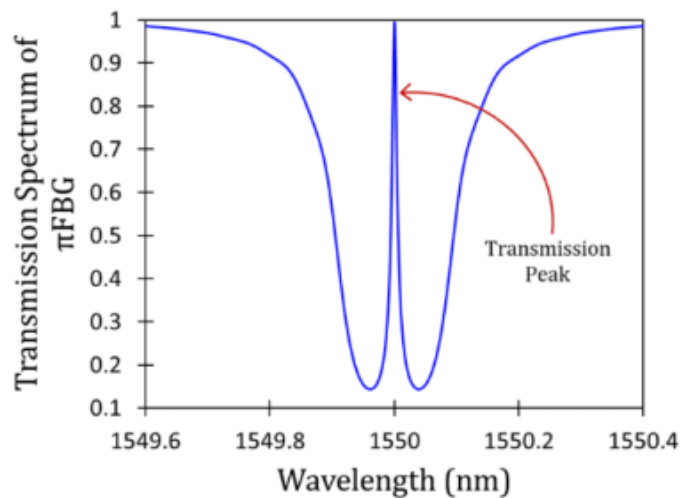


Figura 2-5 Espectro en transmisión del PS-FBG.[34]

### *Láser de bombeo y controlador de temperatura y corriente.*

Los láseres de bombeo tienen como principal función proveer el bombeo necesario a los iones de la fibra óptica, en nuestro caso dopada con erbio, para conseguir una amplificación en la tercera ventana y conseguir así un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA).

Para controlar tanto la temperatura como la corriente inyectada en estos bombeos se necesita utilizar controladores o drivers. En nuestro caso hemos empleado el controlador *CDL1015* de la marca *Thorlabs* que controla un láser de bombeo centrado en una longitud de onda de 976 nm. Cuenta con una pantalla táctil mediante la cual podemos regular fácilmente la corriente de bombeo con la que queremos trabajar y también limitar la temperatura a la que se encuentra nuestro láser (por defecto, 25 grados centígrados).



Figura 2-6 Controlador del láser de bombeo utilizado en el proyecto.[35]

### *Fibra dopada con erbio (EDF).*

La fibra dopada con erbio es la fibra que se usará en estos estudios como medio de ganancia. Concretamente, la EDF empleada fu la fibra M12 (980/125) de la marca *Thorlabs*, altamente dopada de erbio con una gran eficiencia de conversión y diseñada para amplificadores de banda C, la cual va a ser nuestra banda de trabajo.



Figura 2-7 Carrete de EDF M-12 de la marca Thorlabs.[36]

### Láser centrado en DFB 1561 nm.

Este láser es un DFB (*Distributed Feedback Laser*) o, también conocido como láser de retroalimentación distribuida. Es una fuente de luz de alta estabilidad con un ancho de banda espectral muy estrecho con unas fluctuaciones de potencia óptica extremadamente pequeñas. Su uso principal consiste en la transmisión de datos de alta velocidad a larga distancia debido a que trabaja en tercera ventana, en la cual, la atenuación de la fibra óptica es muy baja.

En este trabajo hemos empleado el DFB que incluía un kit educativo de la marca *Amonics*, y que estaba centrado en 1561 nm.

Haremos uso de este dispositivo para realizar unas medidas preliminares de variaciones en el índice de refracción de unos líquidos ya que nos aportará resultados precisos debido a sus características, como la alta estabilidad.



Figura 2-8 Fotografía del láser DFB de la marca Amonics.

## 2.2 Herramientas para realizar fusiones de fibra óptica.

A la hora de trabajar con la fibra óptica, se utilizó el siguiente equipamiento para su fusión:

- *Fusionadora de fibra óptica.* Se utilizó la fusionadora *View 7 arc fusión splicer*, tanto con los modos de operación que esta ofrecía de serie para fusionar puntualmente dos fibras ópticas.



Figura 2-9 Fotografía de la fusionadora View 7 arc fusión splicer.

- **Cortadora de fibra óptica.** Las fibras deben cortarse con precisión y con la menor inclinación posible porque un ángulo de inclinación mayor puede afectar negativamente la fusión de las fibras y provocar pérdidas superiores a las aconsejadas. La cortadora de fibra óptica usada ha sido la *Fitel s326*.

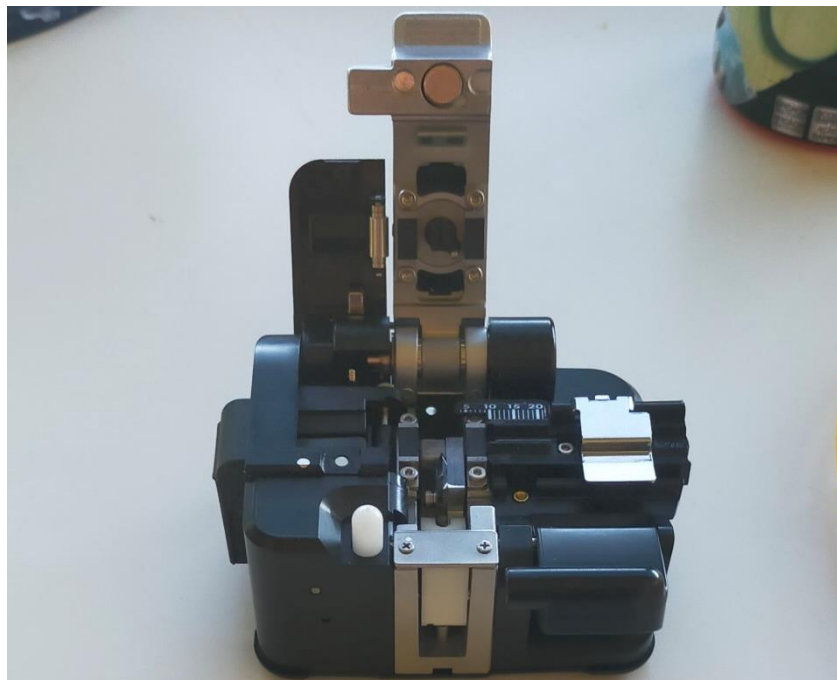


Figura 2-10 Fotografía de la cortado de fibra óptica Fitel s326.



- *Peladora de fibra óptica.* Usada para retirar la capa protectora de las fibras.



Figura 2-11 Fotografía de una peladora de fibra óptica.[37]

## 2.3 Herramientas de caracterización.

### *Medidor de potencia óptica (Power Meter).*

Este dispositivo nos permite cuantificar la potencia óptica de salida de un sistema óptico. Con esta información se podrán calcular también, las pérdidas de potencia ocasionada cuando la luz circula entre la entrada y la salida de un dispositivo o fibra óptica.

Las pérdidas de potencia en la fibra óptica pueden estar ocasionadas tanto por la atenuación propia de cada fibra, la cual es proporcional a su longitud, como por las fusiones, curvaturas o conectores que pueda haber a lo largo del recorrido.

Para este proyecto, dado que las fibras con las que se trabaja son de longitud reducida, no se tendrán en cuenta las pérdidas por atenuación, sin embargo, resultarán de gran importancia las pérdidas debidas a la fusión de la fibra o el estado de los conectores empleados.

El medidor de potencia óptica utilizado para la caracterización de los sensores ópticos en este proyecto fue el *EXFO Multifunction Loss Tester FOT-930 MaxTester II*, que es un medidor de potencia óptica basado en conversión optoelectrónica.

Este tipo de medidores de potencia, necesitan saber en qué longitud de onda se está trabajando para aplicar una corrección a la medida de potencia, en este caso se midió la potencia a 1550 nm.

La Figura 2-12 muestra una imagen de este dispositivo.



Figura 2-12 Fotografía del power meter que se utilizará en el laboratorio en las mediciones de potencia óptica.

### *Inspector de conectores de fibra.*

Para conocer el correcto funcionamiento de los conectores que pertenecen a los dispositivos ópticos se utilizó el inspector de conectores de fibra *EXFO FIP-430B* mediante el software *ConnectorMax2*. Se conecta mediante un puerto USB al ordenador.

Los conectores tanto de entrada como de salida se conectan al otro extremo del inspector de conectores y se evalúan todas las partes de dicho conector.

El programa indica si hay fallos y los marca en color rojo, o si por el contrario el conector está bien muestra unas marcas de color verde.

Hay que tener en cuenta que, el criterio que se ha seguido para dar por bueno el funcionamiento del conector es que el núcleo central tuviera la marca de color verde ya que es por donde viaja la luz de nuestra fibra, y si por el contrario tenía una mancha de color rojo en el centro se desecha por completo dicho conector.

### *Analizador de espectros ópticos (OSA: Optical Spectrum Analyzer).*

Con el fin de visualizar los espectros ópticos en el dominio frecuencial que tendremos a la salida de cada punto de nuestro sistema de detección, se utilizará el analizado de espectros ópticos de la empresa EXFO, concretamente el modelo FTB-500.



*Figura 2-13 Analizador de espectros ópticos utilizado en el proyecto.*

Este modelo en concreto permite definir el rango de medida de longitudes de onda, pudiendo escoger la ventana concreta o una zona personalizada. En nuestro caso, dado que vamos a trabajar en la zona de la amplificación de la fibra dopada con erbio, visualizaremos los espectros ópticos en la ventana C.

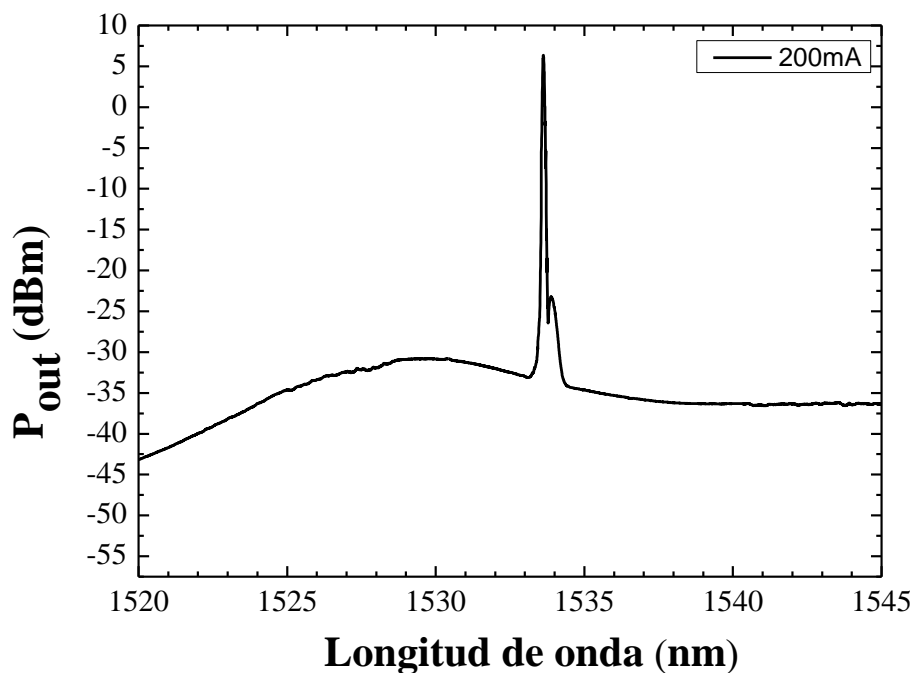


Figura 2-14 Ejemplo de traza tomada con el OSA.

En la Figura 2-14 se observa una traza tomada con el analizador de espectros en el rango de longitud de onda 1500-1580 nm. En ella se puede observar el espectro obtenido al visualizar la respuesta de la amplificación producida por la fibra dopada con erbio y el láser de bombeo inyectando una corriente de 200 mA la respuesta obtenida al introducir un PS-FBG centrado en torno a los 1533 nm.

#### *Filtro óptico configurable: WaveShaper.*

El WaveShaper es un dispositivo que actúa como un filtro óptico configurable. Es programable y admite formas arbitrarias de filtros generados por el usuario. Permite generar la forma de filtro requerida (tanto la amplitud como la fase) y luego cargarla en el software WaveManager, que traduce la especificación del usuario a la forma óptica requerida. También se puede dibujar de forma personalizada la forma del filtro que se desea e implementarla con otro software llamado WaveSketch. Nuestro WaveShaper es el modelo 1000s de la marca *Finisar* que trabaja en las bandas C y L.



Figura 2-15 Fotografía WaveShaper 1000s de la marca Finisar utilizado en el laboratorio.

## Capítulo 3 - Diseño y caracterización de la estructura en anillo.

En este capítulo, vamos a explicar el funcionamiento de nuestro láser con estructura en anillo que se va a utilizar para este capítulo del proyecto.

En la Figura 3-1 se muestra la estructura del láser de fibra en configuración anillo basado en la amplificación de fibra dopada con erbio junto con la pareja de FBG y PS-FBG que tendremos que elegir posteriormente para poder satisfacer las necesidades del sistema de detección.

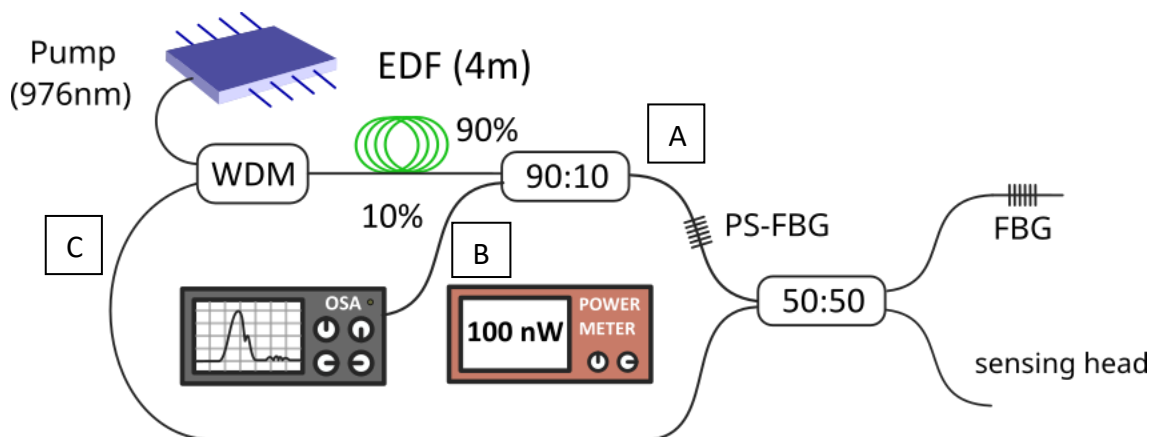


Figura 3-1 Set-up del láser de estructura en anillo.

En esta estructura, el diodo láser de bombeo inyecta potencia óptica a una longitud de onda cercana a los 976nm, pasa por el WDM y llega a la EDF. La EDF es nuestro medio de ganancia que, gracias al erbio, amplificará la señal óptica en torno a los 1500-1600 nm. Después esa potencia la dividiremos mediante un acoplador 90:10, es decir, el 90% de la potencia que viene desde la EDF viajará a través del resto del montaje y el 10% restante lo utilizaremos para medir la potencia óptica en ese punto del set-up bien mediante un medidor de potencia óptica (*power meter*), o bien con el analizador de espectros ópticos (OSA según sus siglas en inglés). Para seguir con la estructura en anillo, después del acoplador 90:10, colocaremos un PS-FBG, un acoplador 50:50 que dividirá la potencia en partes iguales y las dirigirá hacia un FBG y una fibra SMF, cuya punta usaremos como elemento sensor. Esto último tiene como objetivo conseguir que, con la interacción entre el PS-FBG y el FBG, consigamos una mayor potencia reflejada en torno a una longitud de onda que habremos tenido que elegir previamente. Por último, cerraremos la estructura en anillo con el puerto en reflexión de nuestro acoplador 50:50, por el cual viajará un espectro que tendrá reflejada la longitud de onda en el rango de frecuencias de amplificación del erbio y que, por tanto, llegará al puerto de 1550 nm del WDM para cerrar la estructura en anillo. Allí, se multiplexará con la potencia de bombeo de 976 nm para tener aún mayores niveles de potencia. Es interesante destacar que este sistema requiere de potencias muy bajas para funcionar correctamente ya que gracias a la estructura en anillo y a la interacción de la pareja de FBG y PS-FBG conseguiremos suficiente potencia reflejada para realizar nuestras medidas.

Antes de realizar el montaje, se va a proceder a la obtención de los espectros ópticos en cada uno de los puntos más relevantes de la estructura para poder además verificar el correcto funcionamiento de todos los dispositivos.

De la misma manera, se tratará de encontrar una pareja de PS-FBG y FBG que trabajen en la misma longitud de onda para aumentar los niveles de potencia detectada en reflexión.

Todas las medidas que se realizarán a continuación son con la estructura de anillo en abierto, es decir, que la unión entre el acoplador 50:50 y el WDM de la Figura 3-1 no existirá. Lo hacemos con el fin de la correcta caracterización de los dispositivos ópticos uno por uno.

### 3.1 Resultados la estructura en anillo en todos los dispositivos.

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del sistema basado en amplificación mediante fibra dopada con erbio y sus distintos dispositivos, se va a utilizar una intensidad en el láser de bombeo, de 100 mA, 150 mA y 200 mA.

A continuación, encontraremos las figuras obtenidas en los puertos más importantes del WDM y del acoplador 90:10.

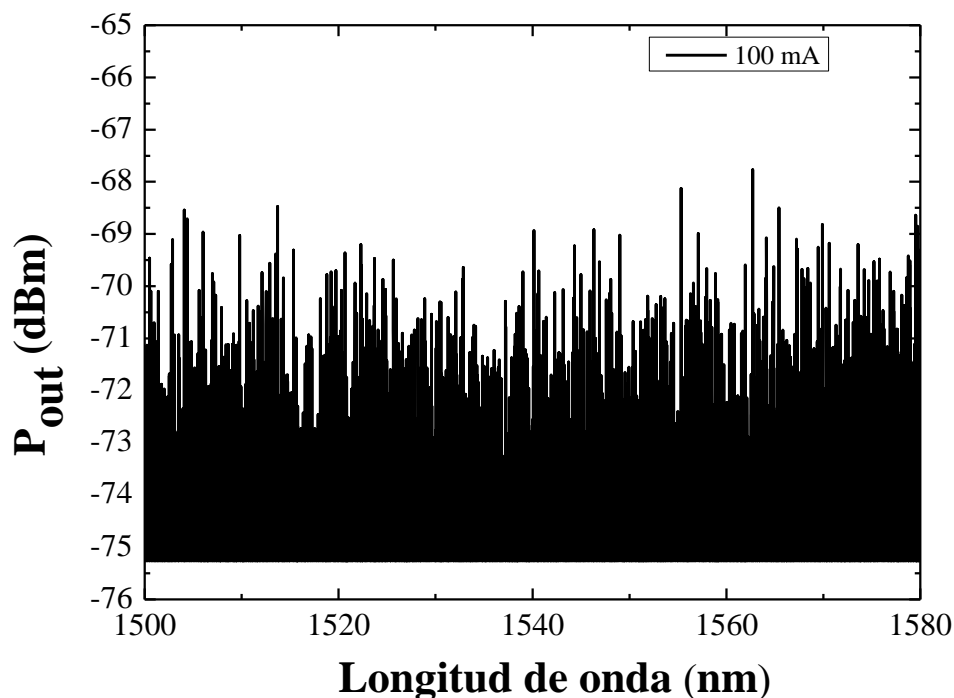


Figura 3-2 Potencia de salida por el puerto de reflexión del acoplador.

En la figura 3-2 podemos apreciar la potencia de salida en el puerto de reflexión del acoplador 50:50. Este acoplador que implementamos es de 2x2 puertos. Uno de esos puertos es el puerto por el cual se puede reflejar una pequeña cantidad de la potencia de entrada. Como es un puerto que no usamos para nuestro set-up, no está dibujado en la Figura 3-1. Como se puede observar solo obtenemos ruido, independientemente de la potencia de bombeo. Por tanto, significa que la potencia se está dividiendo por los puertos que nos interesan y que no se está reflejando nada de potencia por el puerto que no utilizamos. Esta será la única vez que mencionemos este puerto del acoplador y la medida realizada es exclusivamente para la caracterización del acoplador.

A continuación, en las siguientes figuras vamos a observar el puerto del acoplador por el cual tenemos el 90% de la potencia de entrada (punto A de la Figura 3-1) y el puerto de 1550 nm del WDM por el cual se cerrará posteriormente la estructura en anillo (punto C de la Figura 3-1). Como cabía esperar, gracias al láser de bombeo y a la fibra dopada con erbio que es nuestro medio de ganancia, se obtiene la curva característica de la emisión espontánea amplificada (ASE: *Amplified Spontaneous Emission*, según sus siglas en inglés).

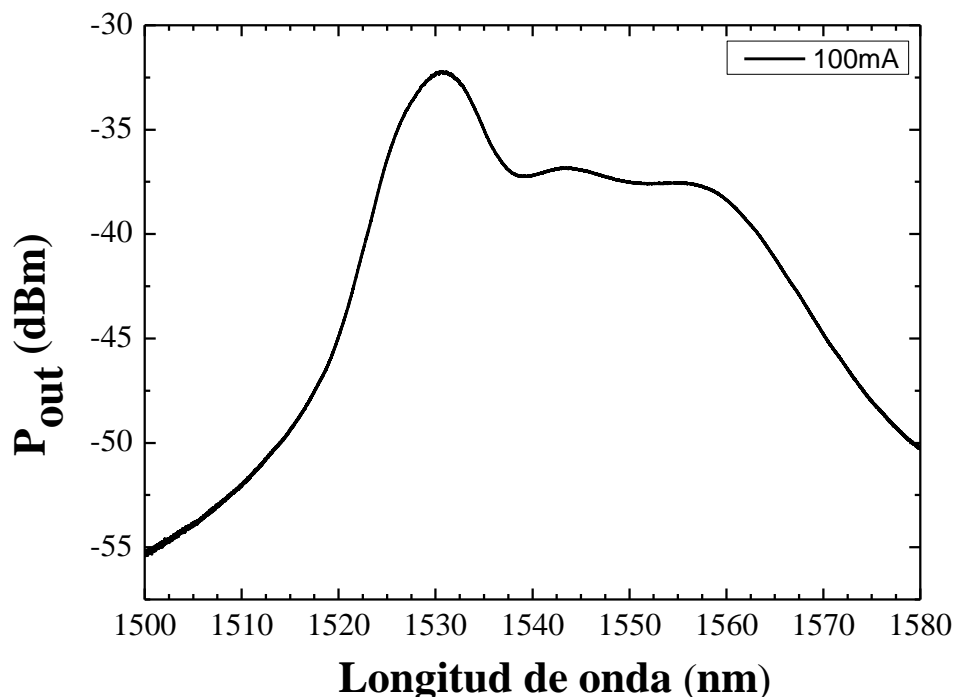


Figura 3-3 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 100mA.

En la Figura 3-3 obtenemos la curva ASE característica de del erbio inyectando una intensidad de 100 mA en la banda de 1500-1580. Este espectro se obtiene en el puerto donde se acopla un 90% de la potencia inyectada en el acoplador 90:10 al cual posteriormente conectaremos los distintos FBG y PS-FBG para caracterizarlos de cara a realizar la estructura en anillo de forma completa.



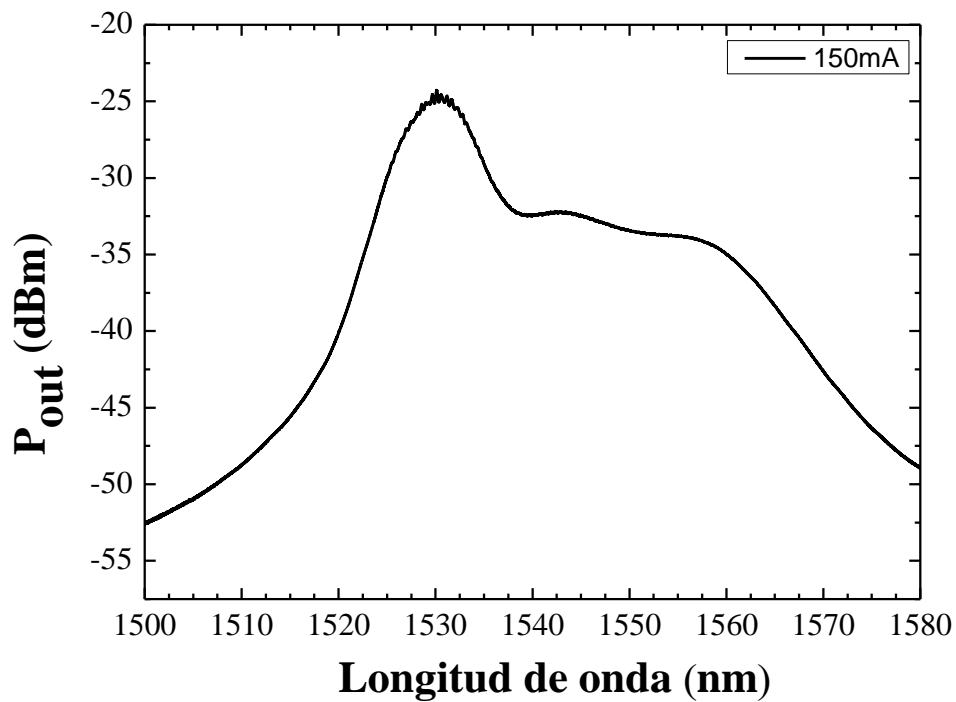


Figura 3-4 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 150mA.

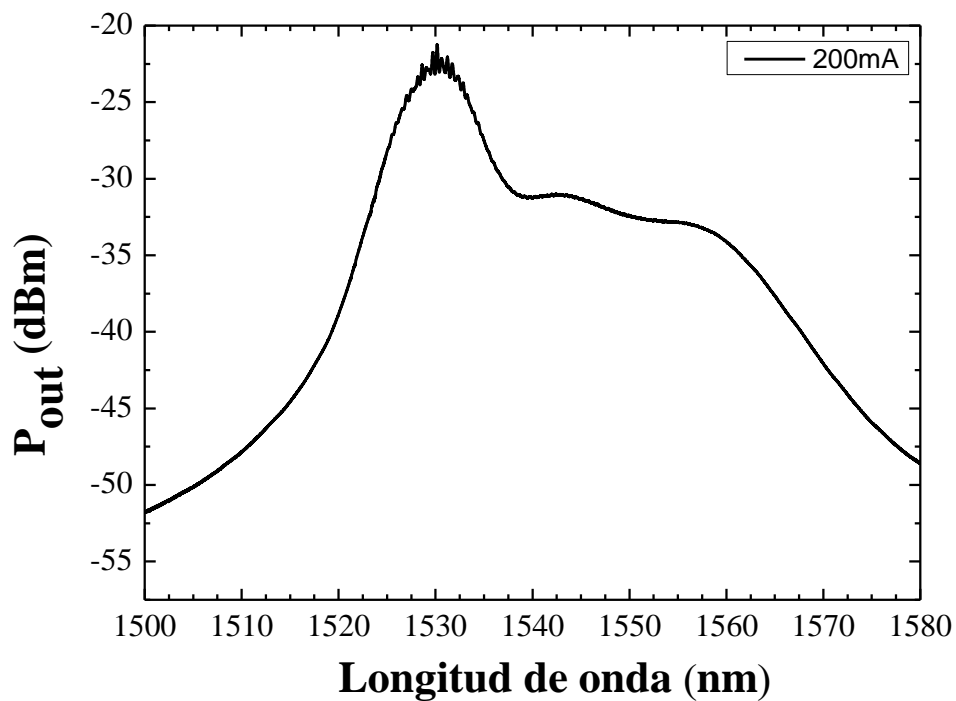


Figura 3-5 Potencia de salida por el puerto del 90% del acoplador con intensidad de entrada 200mA.

Tanto en la Figura 3-4 como en la Figura 3-5, se observa la misma curva que en la Figura 3-3 pero con una mayor potencia de salida debido a que inyectamos primero una intensidad de 150 mA y segundo una intensidad de 200 mA.

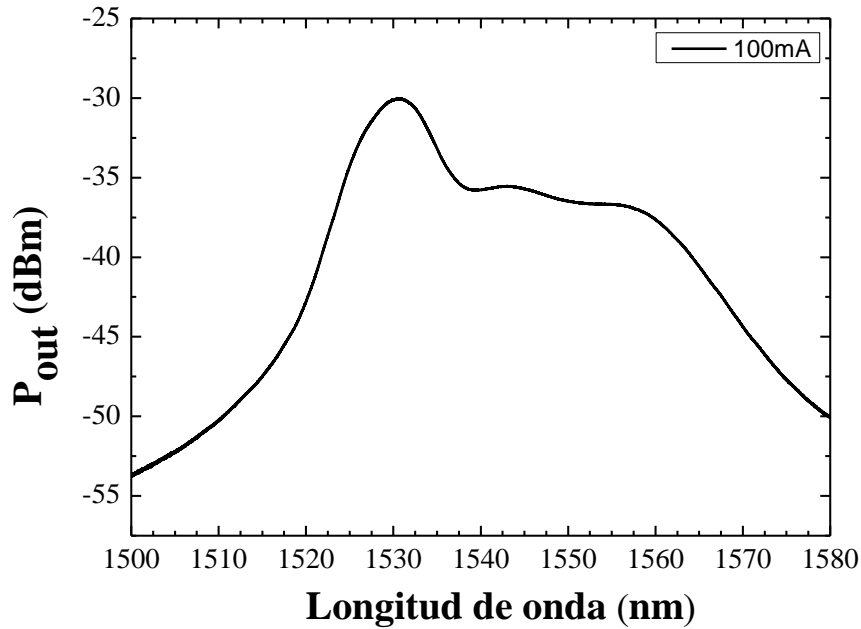


Figura 3-6 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 100mA.

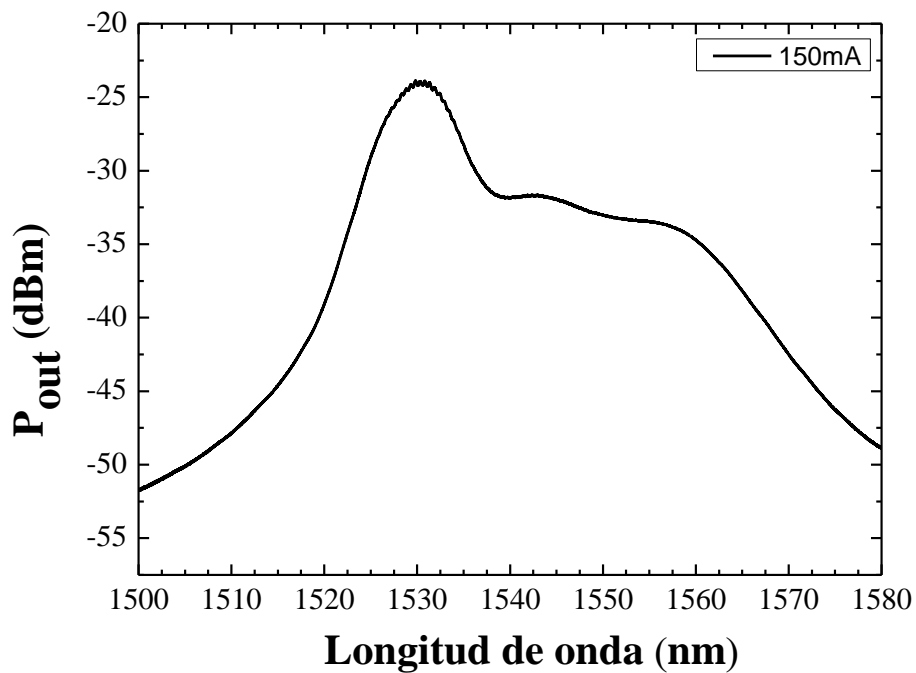


Figura 3-7 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 150mA.

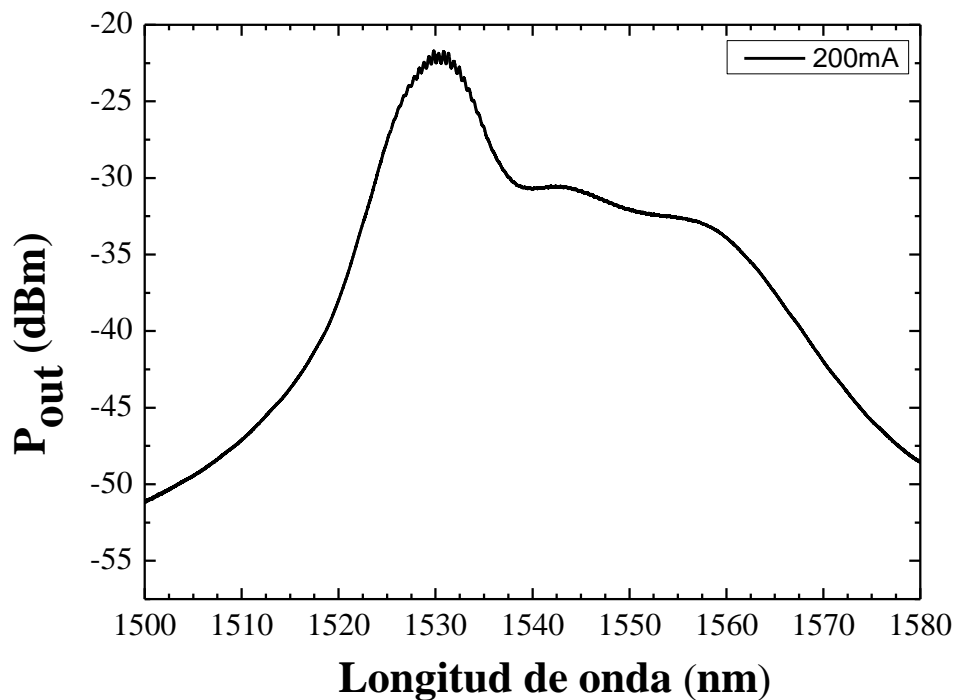


Figura 3-8 Potencia de salida por el puerto de 1550 nm del WDM con intensidad de entrada 200mA.

En las figuras anteriores, se observa el espectro que obtenemos a través del puerto del WDM de longitud de onda 1550 nm. Es decir, estamos viendo el espectro de tercera ventana demultiplexado en el puerto por el que posteriormente cerraremos la estructura en anillo. Se visualizan los mismos espectros que en la Figura 3-3 a la Figura 3-5 con la única diferencia que estos últimos presentaban el 90% de la señal que entraba al acoplador 90:10 y en el puerto de 1550 nm del WDM se puede observar el espectro óptico totalmente amplificado, pero como es lógico, apenas se nota la diferencia entre un puerto y otro.

### 3.2 Medida de los espectros ópticos de FBGs y PS-FBGs.

Para poder implementar correctamente nuestro sistema de medida de índices de refracción, resulta necesario emplear una pareja de redes de difracción del tipo FBG y PS-FBG que ofrezcan una misma longitud de onda central. Por lo tanto, se realizó un primer proceso de caracterización espectral de las redes de difracción disponibles en el laboratorio. En las siguientes figuras se muestran los resultados de los espectros ópticos obtenidos.

Para las medidas de los espectros para caracterizar estos FBG y PS-FBG, únicamente usaremos el láser de bombeo que se inyectará en el WDM para salir al medio de ganancia que es la fibra dopada con erbio para obtener la curva de ASE. La salida de la fibra la conectaremos al acoplador 90:10 para conectar el FBG o el PS-FBG que vayamos a caracterizar a la salida del puerto de 90 del acoplador. De esta manera veremos el espectro resultante del FBG o PS-FBG correspondiente en reflexión.

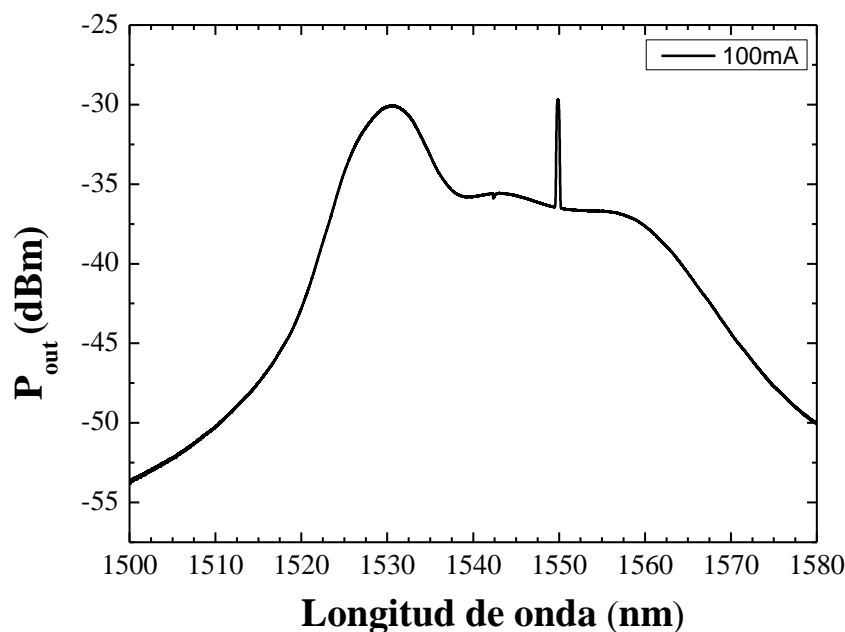


Figura 3-9 Potencia de salida por el puerto del FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA.

Observamos en la Figura 3-9 la curva ASE y la longitud de onda de Bragg que se refleja por la colocación del FBG cuando inyectamos una intensidad de bombeo de 100 mA. Como se trata de un FBG veremos un pico de potencia óptica en la longitud de onda de 1550 nm que es en este FBG la longitud de onda de Bragg.

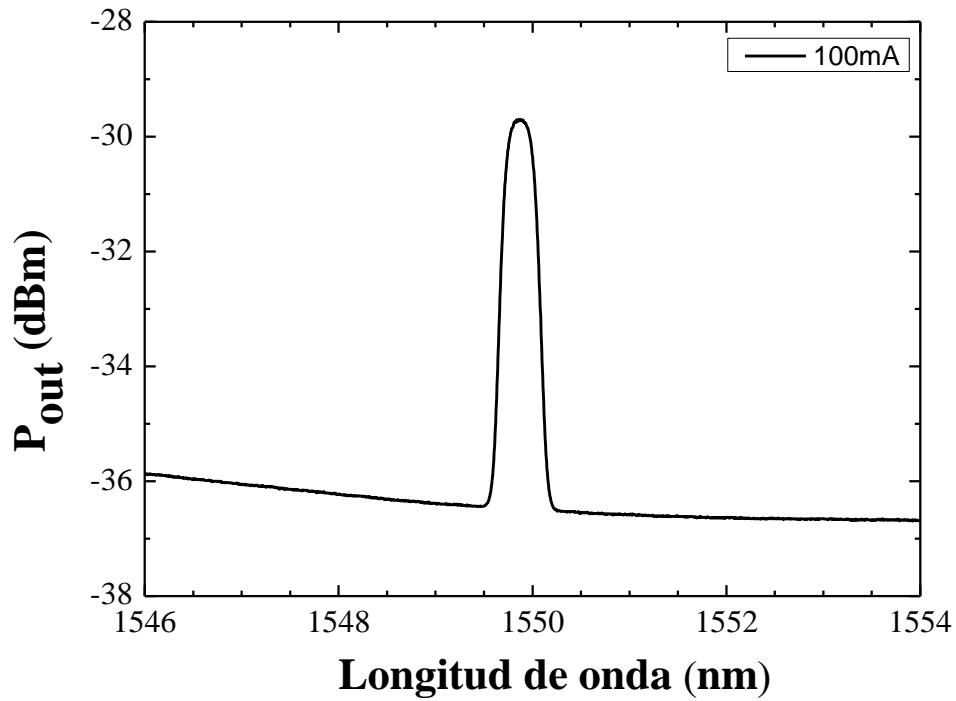


Figura 3-10 Espectro detallado de la Figura 3-9 en la zona de interés.

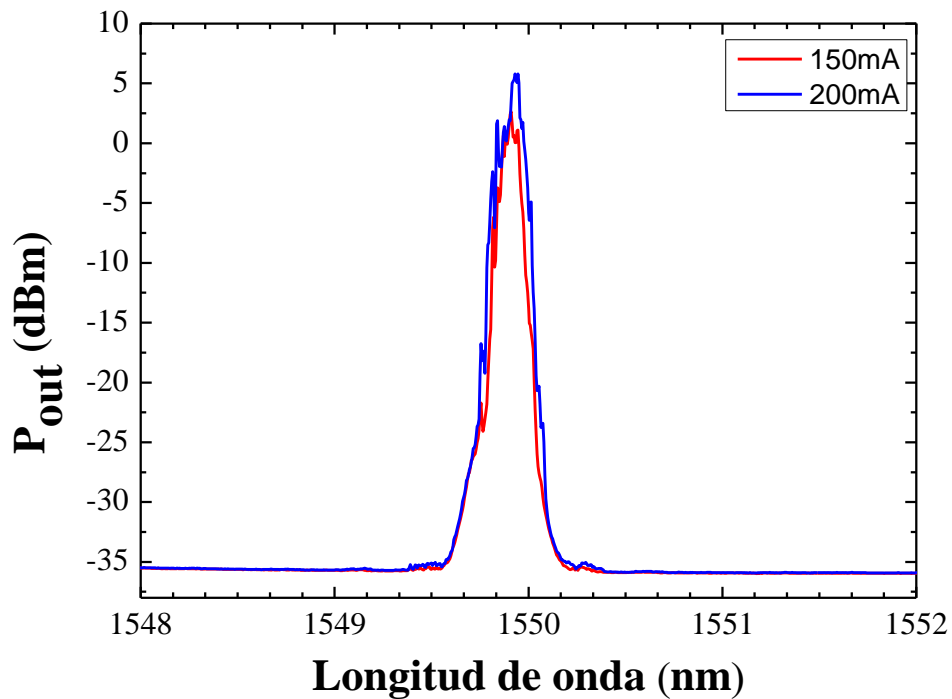


Figura 3-11 Potencia reflejada del FBG 1550 nm con diferentes intensidades de bombeo.

Con los espectros ampliados en la zona de interés, podemos ver en la Figura 3-10 y Figura 3-11 en qué longitud de onda está centrado nuestro FBG, que es alrededor de 1550 nm. Además, parece claro que a partir de inyectar una intensidad de bombeo igual o mayor que 150 mA la potencia que refleja el FBG es más considerable que si inyectamos 100 mA.

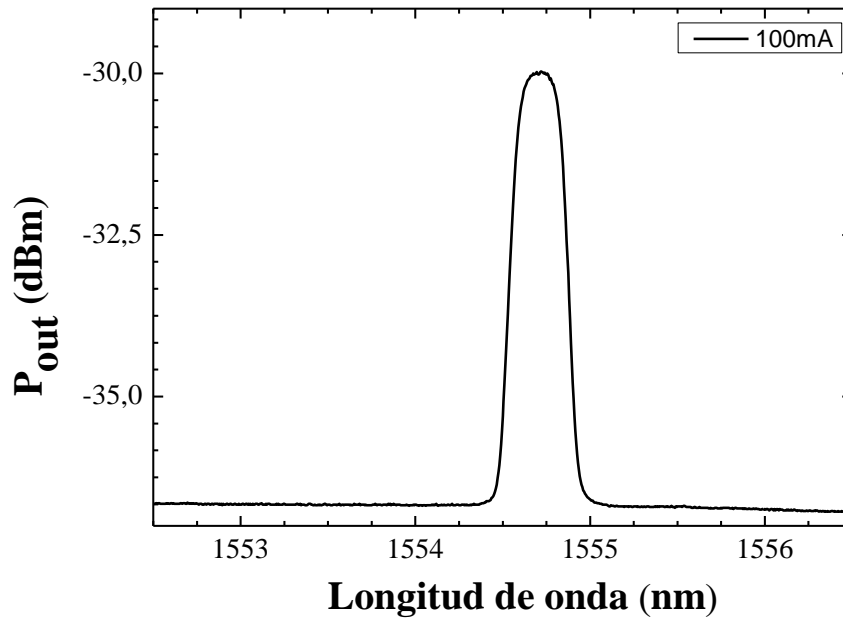


Figura 3-12 Potencia de salida por el puerto del FBG 1554 nm con intensidad de entrada 100mA.

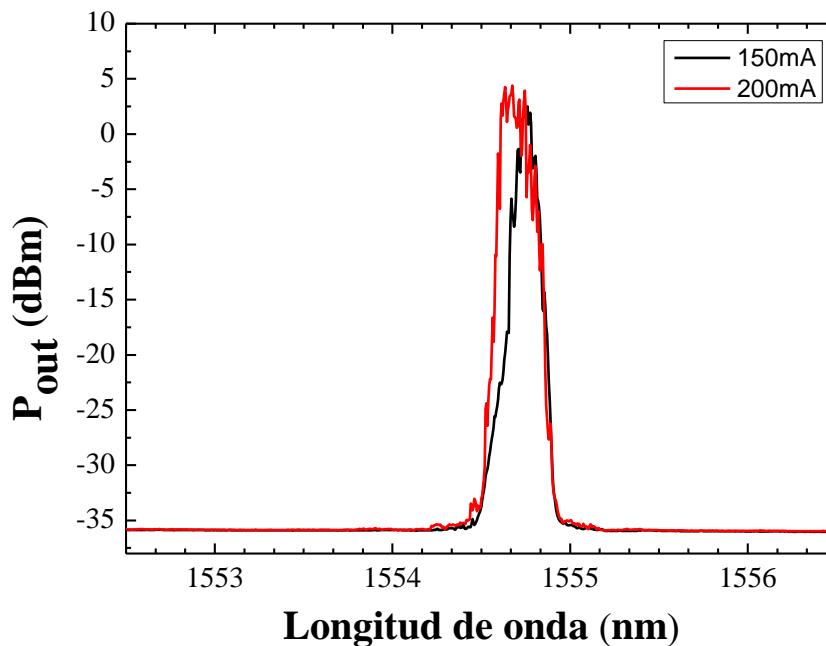


Figura 3-13 Potencia reflejada del FBG 1554 nm con diferentes intensidades de bombeo.

En la Figura 3-12 y en la Figura 3-13, se observa nuevamente otro espectro de un FBG que se encuentra centrado alrededor de 1554,75 nm. Además, observamos cuánta potencia se refleja dependiendo de la intensidad de bombeo que introduzcamos, siendo mucho mayor esa potencia reflejada a partir de un bombeo de 150 mA.

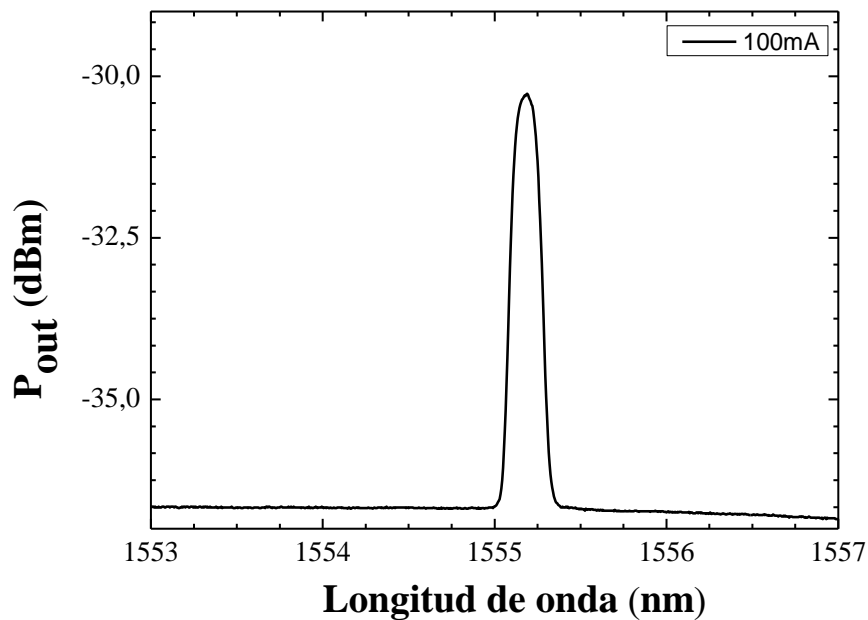


Figura 3-14 Potencia de salida por el puerto del FBG 1555 nm con intensidad de entrada 100mA.

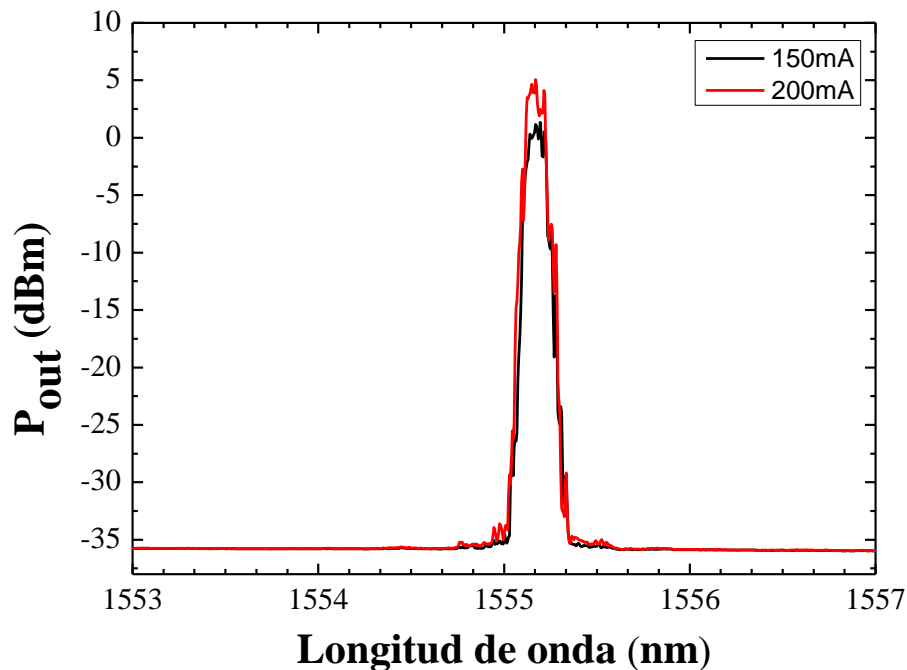


Figura 3-15 Potencia reflejada del FBG 1555 nm con diferentes intensidades de bombeo.

En la Figura 3-14 y en la Figura 3-15 se observa nuevamente otros espectros de un FBG que se encuentran centrados alrededor de 1555,25 nm y también, cuánta potencia se refleja dependiendo de la intensidad de bombeo que introduzcamos, siendo mucho mayor esa potencia reflejada a partir de un bombeo de 150 mA.

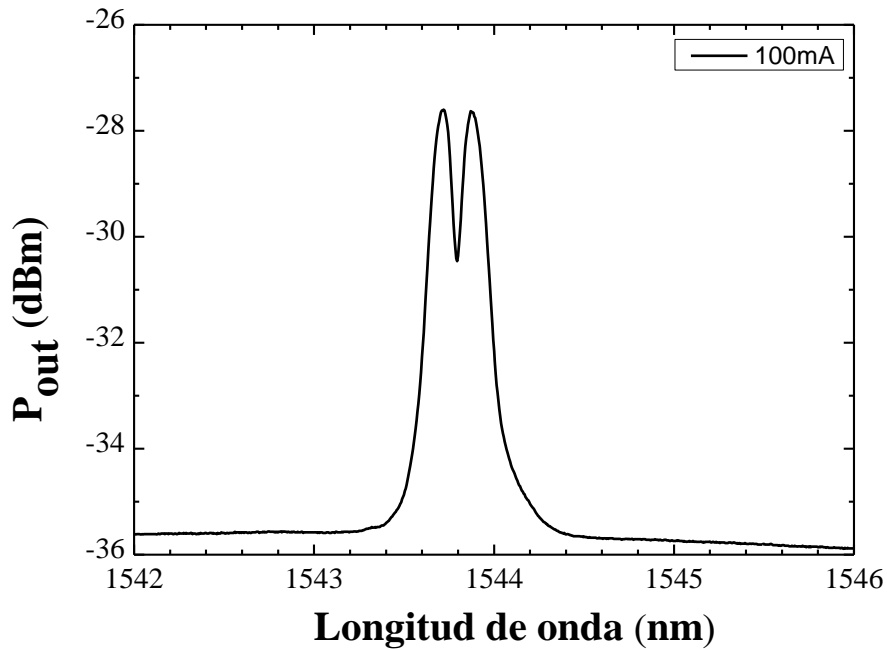


Figura 3-16 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1544 nm con intensidad de entrada 100mA

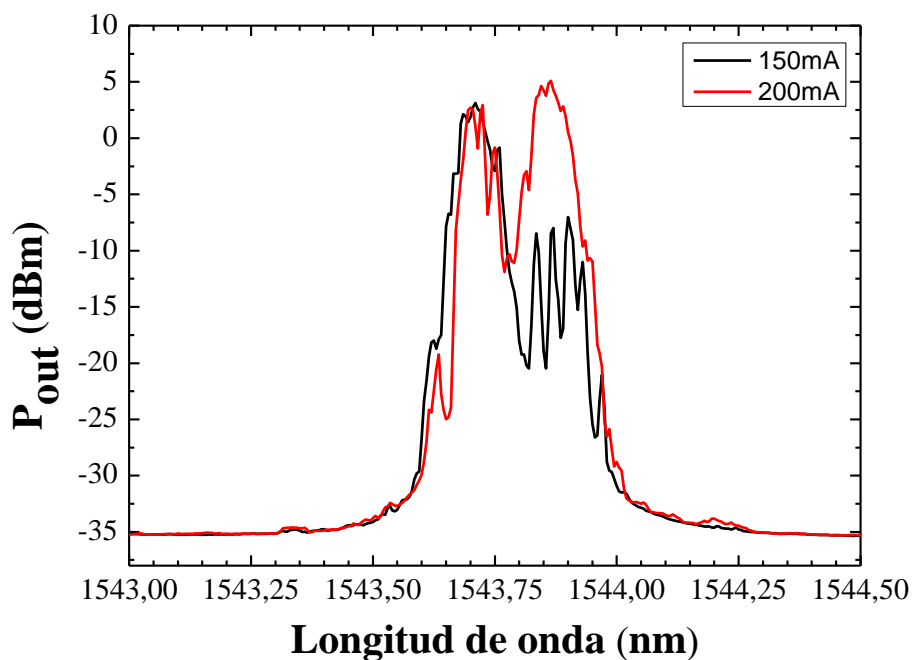


Figura 3-17 Potencia reflejada del PS-FBG 1544 nm con diferentes intensidades de bombeo.



En los casos de la Figura 3-17 y la Figura 3-16, estamos observando los espectros, en esta ocasión de la potencia que refleja un PS-FBG. Está centrado en aproximadamente 1543,8 nm y como en el caso de los FBGs, cuanto más potencia de bombeo introducimos al sistema, más potencia refleja el PS-FBG.

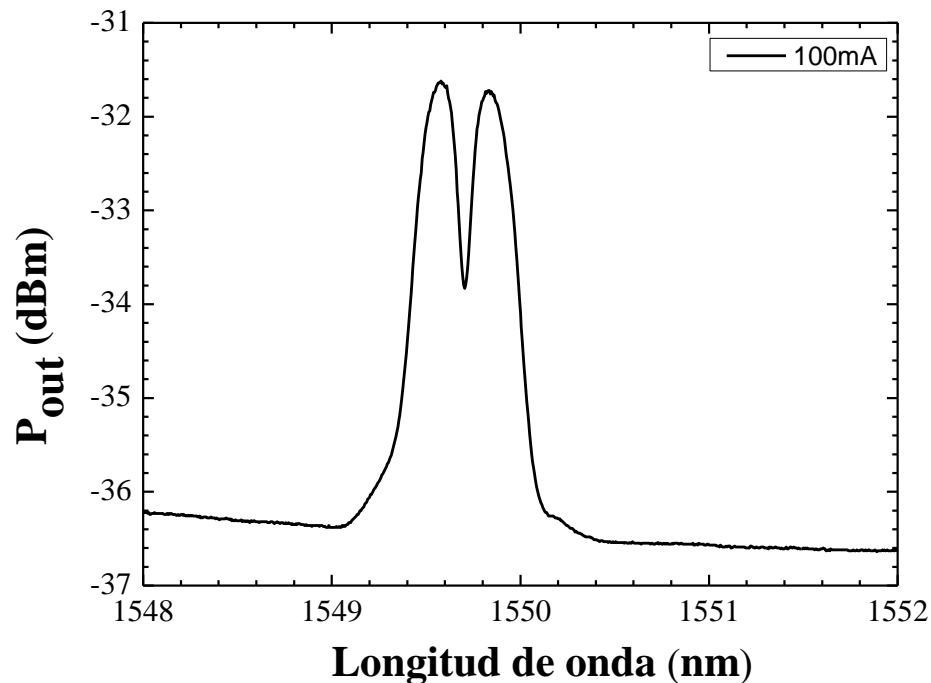


Figura 3-18 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA.

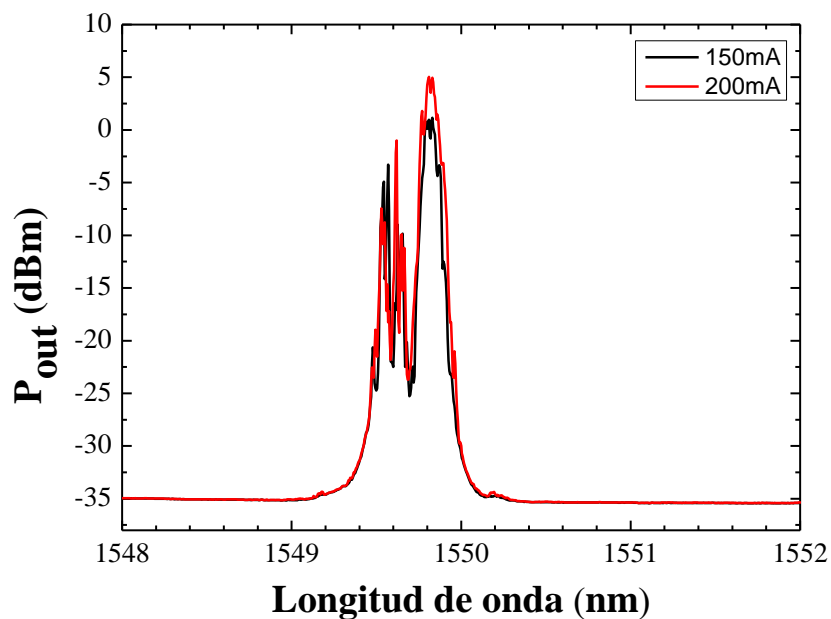


Figura 3-19 Potencia reflejada del PS-FBG 1550 nm con diferentes intensidades de bombeo.

En los casos de la Figura 3-18 y la Figura 3-19, estamos observando los espectros, nuevamente de la potencia que refleja un PS-FBG. Está centrado en aproximadamente 1549,8 nm. Cuanta más potencia de bombeo introducimos al sistema, más potencia refleja el PS-FBG.

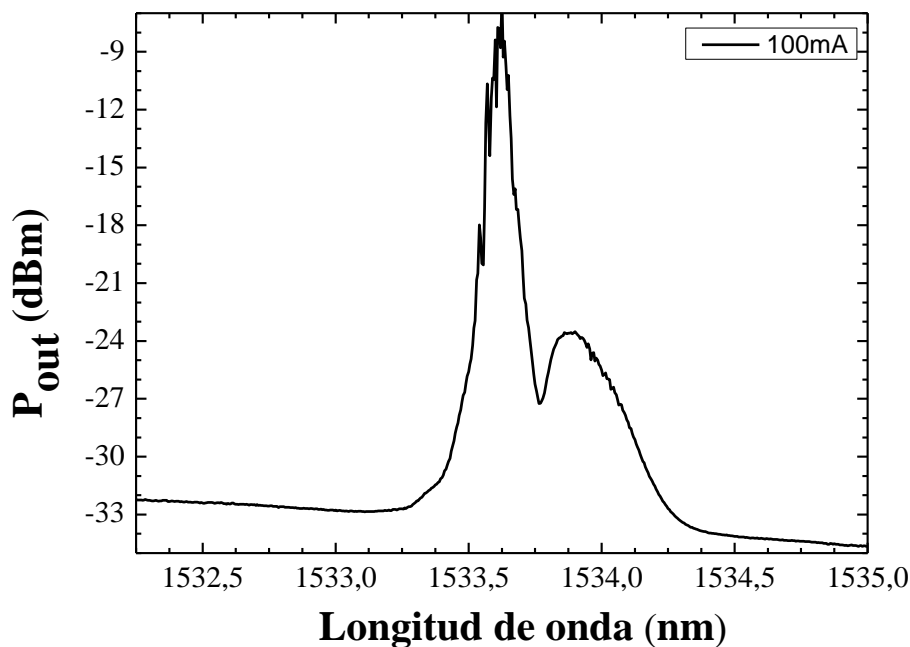


Figura 3-20 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1533 nm con intensidad de entrada 100mA.

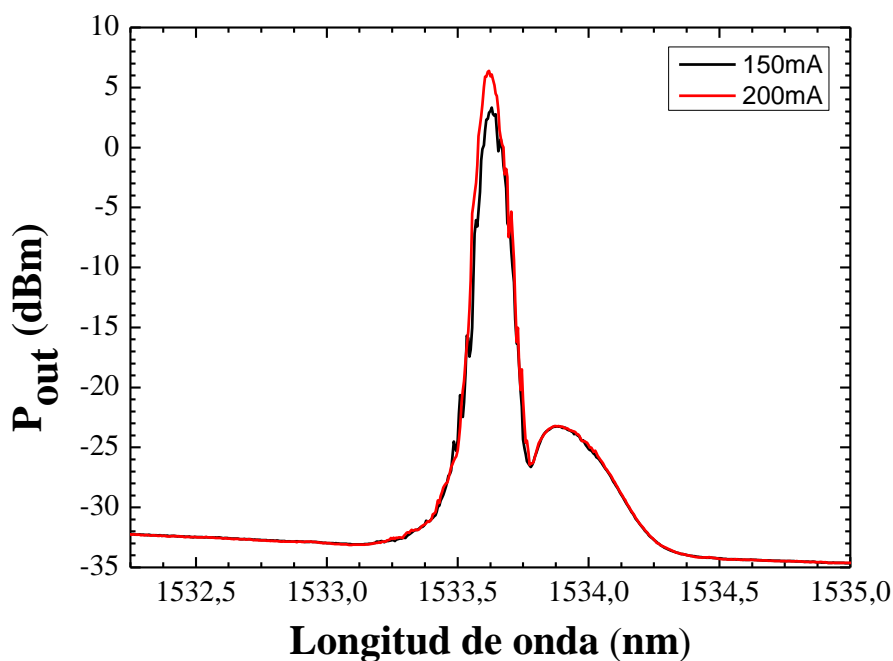


Figura 3-21 Potencia reflejada del PS-FBG 1533 nm con diferentes intensidades de bombeo.

En los casos de la Figura 3-20 y la Figura 3-21, estamos observando los espectros, nuevamente de la potencia que refleja un PS-FBG. Este último, centrado en aproximadamente 1533,75 nm, refleja una potencia que dista bastante de lo que tiene que ser un espectro de un PS-FBG en reflexión porque tiene un pico de potencia muchísimo más alto que el otro. De todas formas, un hecho a destacar es que al encontrarnos en el pico de la curva ASE, la potencia reflejada del PS-FBG inyectando 100 mA de intensidad de bombeo, ha subido en relación a los espectros de los FBG y PS-FBG utilizados anteriormente.

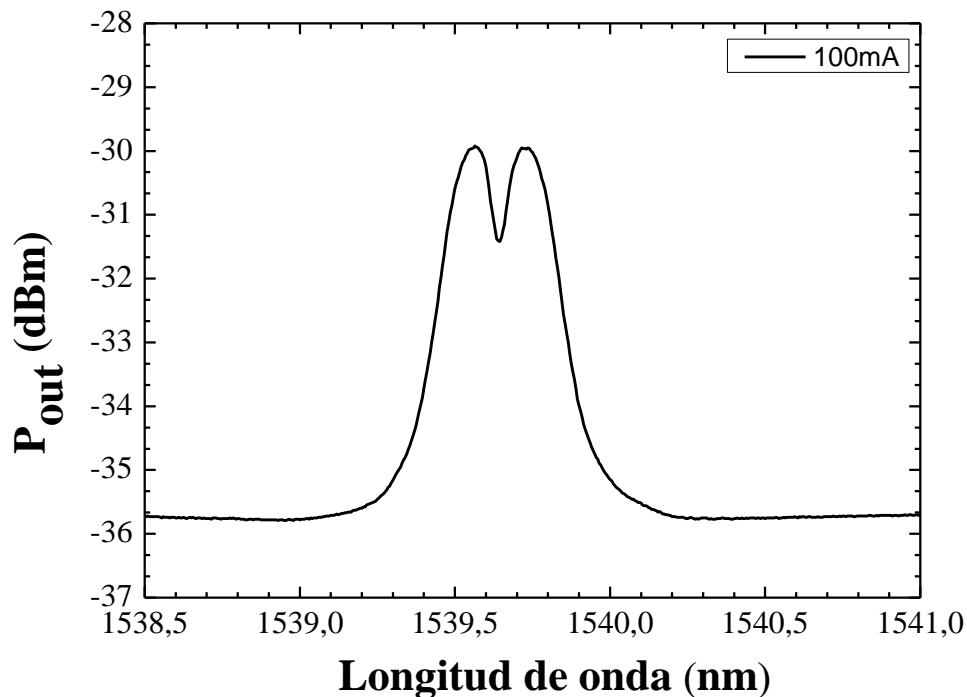


Figura 3-22 Potencia de salida por el puerto del PS-FBG 1539 nm con intensidad de entrada 100mA.

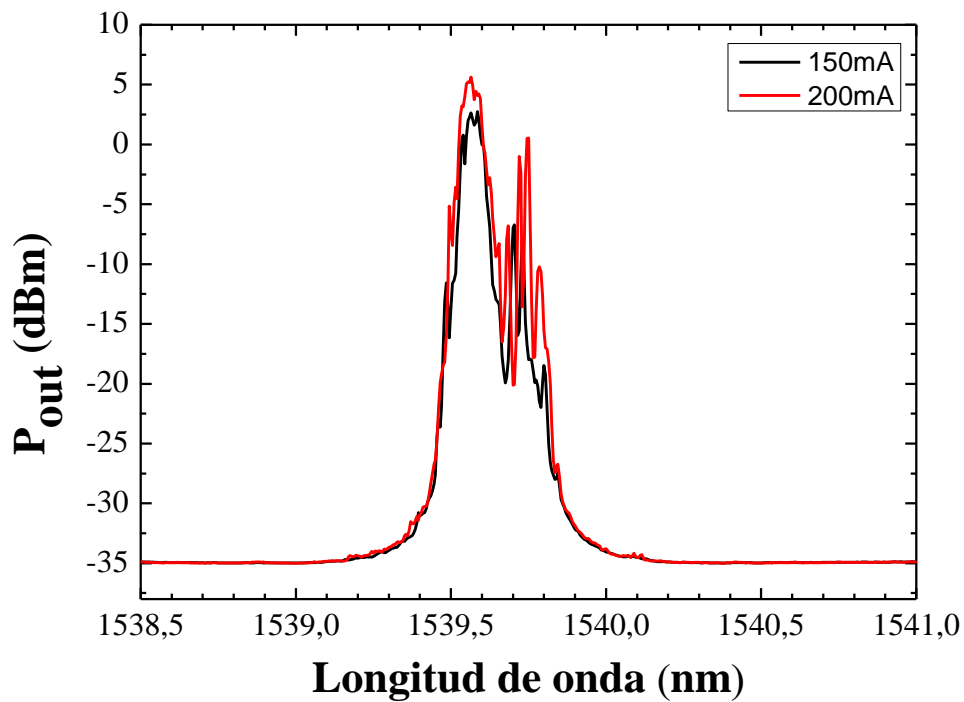


Figura 3-23 Potencia reflejada del PS-FBG 1539 nm con diferentes intensidades de bombeo.

En los casos de la Figura 3-22 y Figura 3-23, estamos observando los espectros, nuevamente de la potencia que refleja un PS-FBG centrado en aproximadamente 1539,6 nm. Refleja una potencia que incrementa considerablemente si aumentamos la intensidad de bombeo por encima de los 150 mA.

En vistas de los resultados obtenidos, podemos observar cómo hay una posible pareja de FBG y PS-FBG que satisfacen nuestras necesidades, y que se encuentra centradas en torno a los 1550 nm. La Figura 3-24 muestra sus espectros, mostrando como ambas respuestas superpuestas presentan una zona de reflexión común.

Por tanto, esta pareja será la que usemos en la configuración de la Figura 3-1 cuya explicación está desarrollada anteriormente y pondremos en funcionamiento como sistema de detección en capítulos posteriores.

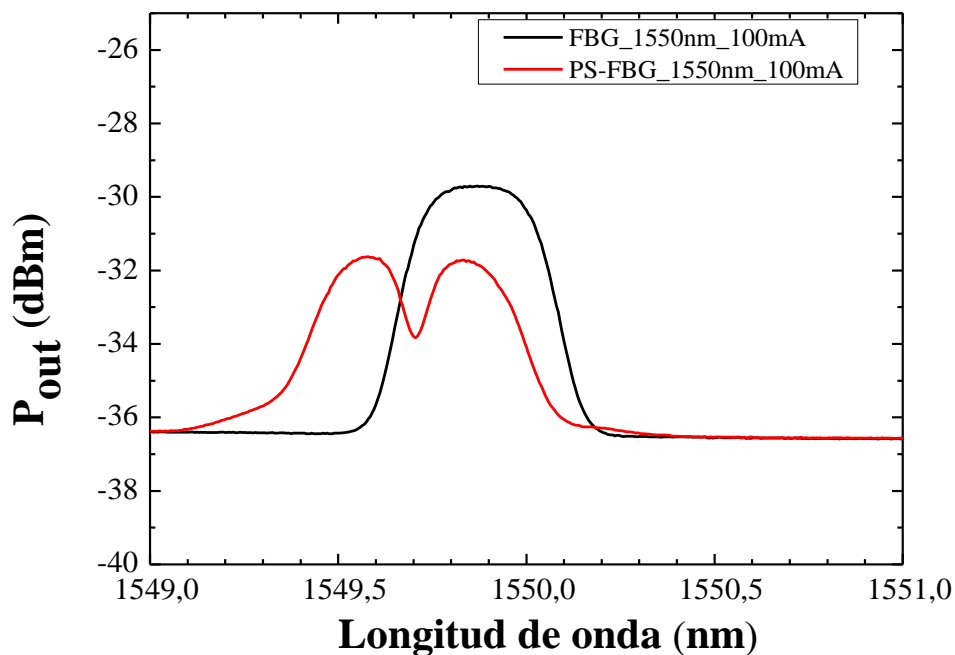


Figura 3-24 Potencias de los FBG y PS-FBG 1550 nm con intensidad de entrada 100mA.

A continuación, conectando el OSA en el punto B de la Figura 3-1, se puede observar el espectro de salida de la interacción de nuestra pareja de FBG y PS-FBG.

El resultado se puede observar en la Figura 3-25.

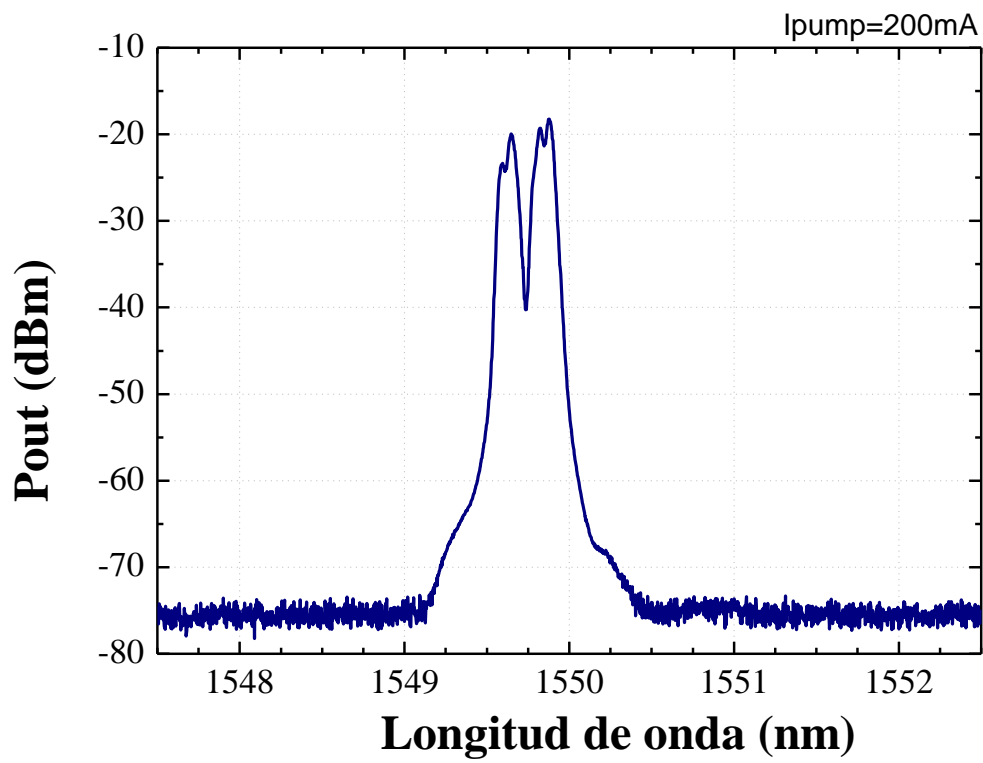


Figura 3-25 Espectro resultante de la interacción de la pareja de FBG y PS-FBG escogida.

## Capítulo 4 - Implementación e introducción a los láseres de fibra óptica usados como sensores de índices de refracción.

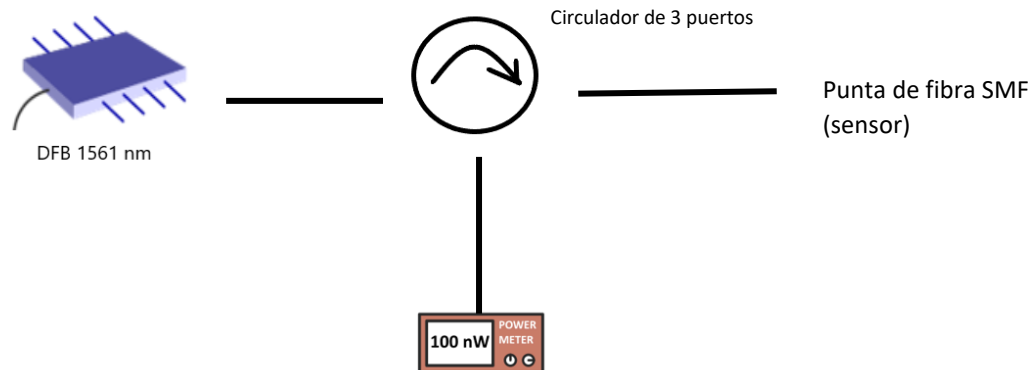


Figura 4-1 Set-up básico de sensor de índices de refracción.

Para introducirnos en el mundo del uso de láseres como sensores de índices de refracción, se ha implementado el sistema de la Figura 4-1. Hemos usado un láser DFB comercial que trabaja en una longitud de onda de 1561 nm. La luz procedente del láser entra al circulator para salir a la punta de fibra SMF que actuará como sensor y, posteriormente, acabar pasando al tercer puerto del circulator donde tenemos colocado el medidor de potencia óptica y veremos las variaciones de potencias que provoca meter la punta que actúa como sensor en líquidos con distinto índice de refracción.

### 4.1 Resultados con láser DFB 1561 nm.

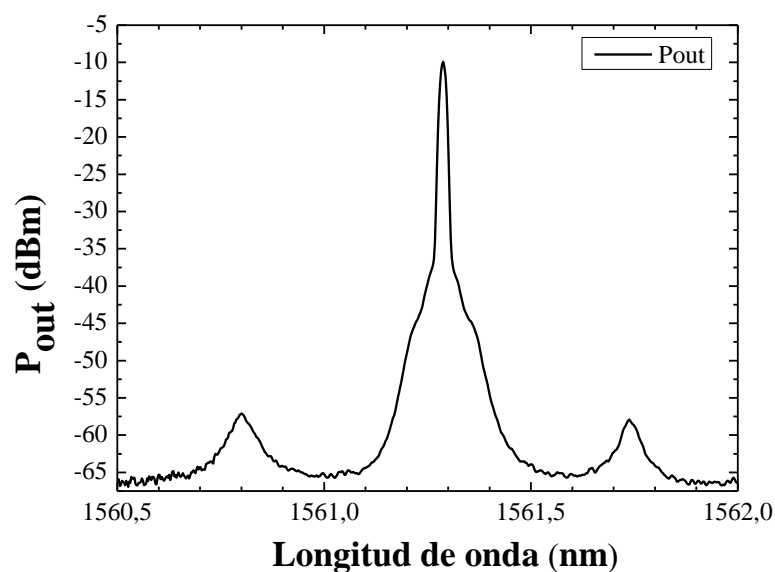


Figura 4-2 Espectro de la potencia de salida del láser DFB centrado en 1561,3 nm.

En la Figura 4-2, observamos el espectro resultante a la salida del láser DFB centrado en 1561,3 nm. Este láser presenta una gran estabilidad en cuanto a potencia óptica y longitud de onda de emisión, es decir, que el espectro es prácticamente el invariante con el paso del tiempo. Por tanto, vamos a poder medir los cambios de índices de refracción con gran exactitud.

A continuación, para corroborar el funcionamiento del sistema como sensor de fibra óptica, se va a empezar con las medidas de nuestra punta de fibra óptica que actuará como sensor en aire, agua ultrapura ( $n = 1,333$ ) y alcohol (isopropílico de  $n = 1,3772$  y etílico del botiquín de primeros auxilios de  $n = 1,361$ ). Seguidamente, se procederá a la medida de distintos líquidos con índice de refracción variados a partir de  $n = 1,4$ .

Cabe destacar que estas medidas siempre se realizarán con la punta que actúa como sensor del sistema de detección aplicándole un corte transversal para realizar correctamente las mediciones.

Vamos a empezar con una potencia óptica medida con el *power meter* de  $9,8 \mu\text{W}$ , cuando la punta de fibra está en contacto con el aire y, a continuación, sumergiremos la punta de fibra óptica que actúa como sensor en los distintos líquidos ya mencionados.

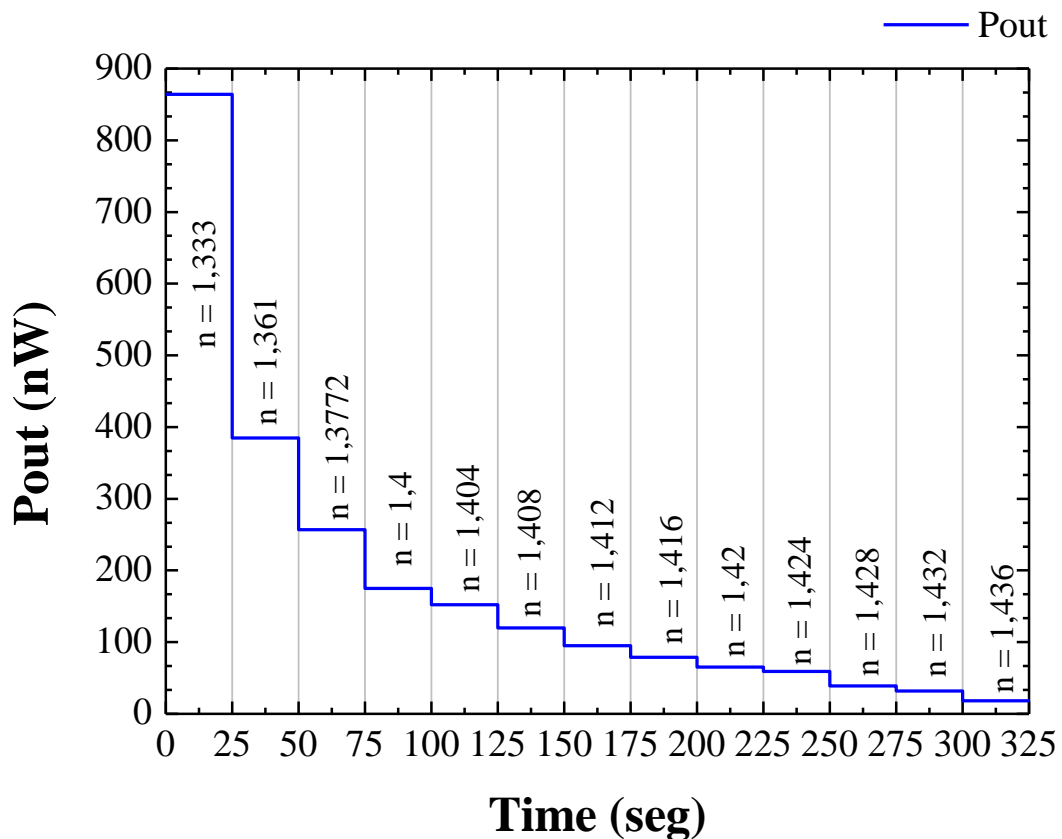


Figura 4-3 Potencia medida con el *power meter* al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en líquidos que poseen distintos índices de refracción.



En la Figura 4-3 se puede observar cómo, gracias al sistema sensor que hemos implementado, se detectan cambios en la potencia medida con el *power meter* a medida que el índice de refracción varía. Como se puede observar, cuanto mayor es el índice de refracción menor será la potencia reflejada.

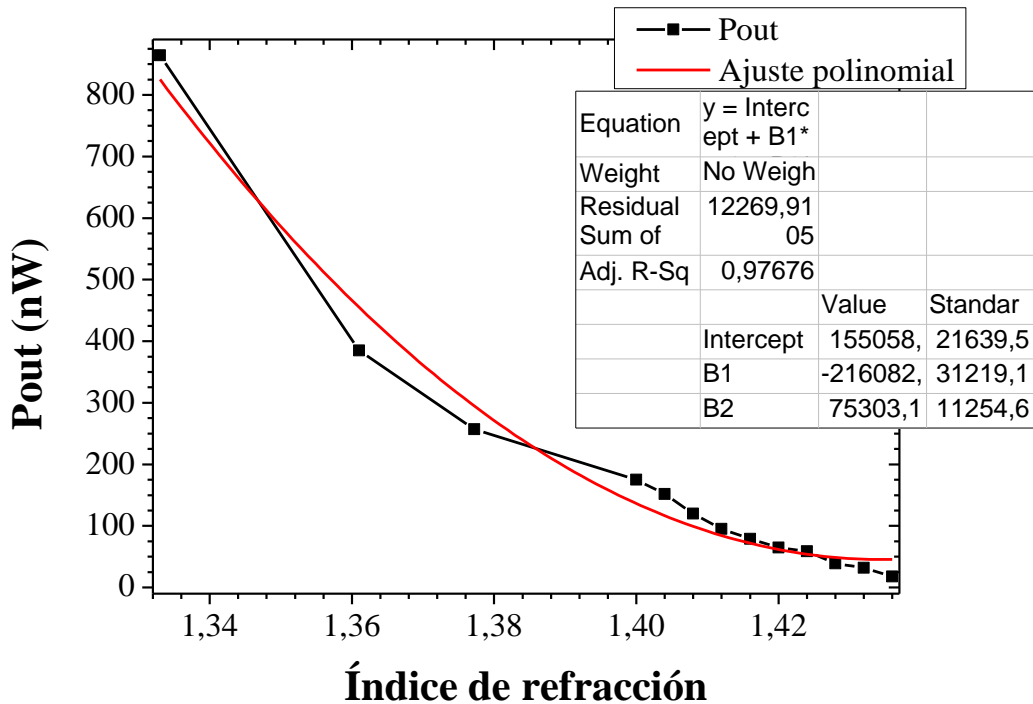


Figura 4-4 Potencia medida en el *power meter* al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación polinomial de los resultados.

En la Figura 4-4, podemos ver la representación de la potencia que capta el *power meter* con respecto al índice de refracción del líquido en el que es sumergida la punta. Se trata de determinar cómo de lineal es la recta resultante de la unión de todos los puntos representados.

#### 4.2 Implementación del WaveShaper como filtro para el DFB.

En este apartado, vamos a seguir con la línea del anterior, pero añadiendo al montaje de la Figura 4-1 una herramienta de filtrado conocida como WaveShaper que colocaremos entre el láser DFB y el circulador.

Como ya hemos comentado en el capítulo de Instrumentación., el WaveShaper admite formas arbitrarias de filtros generados por el usuario. Por tanto, vamos a usar un filtro que crearemos nosotros con el software WaveSketch con el fin de que el espectro de potencia de salida del láser DFB sea más afinado y que el pico de potencia sea de unos pocos nanómetros.

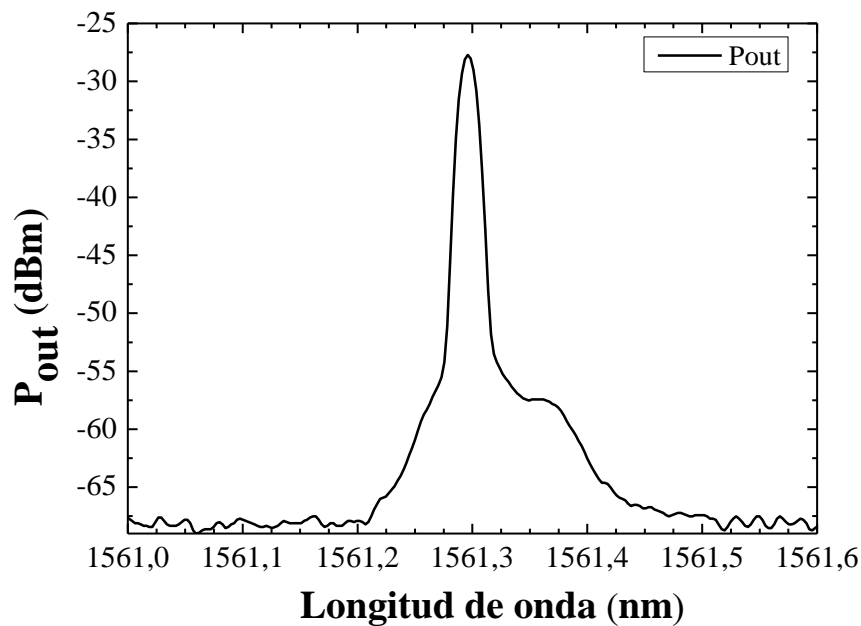


Figura 4-5 Espectro de la potencia de salida del láser DFB centrado en 1561,3 nm después de aplicar el filtrado con el WaveShaper.

En la Figura 4-5, hemos representado el espectro después haberle aplicado el filtro que hemos dibujado a mano en el WaveSketch. Se aprecia que el pico de potencia del láser sigue centrado en aproximadamente 1561,3 nm, pero ha bajado la potencia debido al filtro aplicado. Aun así, es una potencia considerable para llevar a cabo las medidas de los distintos líquidos mencionados con anterioridad para ver si nuestro sistema funciona igual de bien que en el experimento del apartado anterior.

El filtro utilizado se puede observar en la Figura 4-6. Los puntos de 0 atenuación están situados en 191,999 THz (1561,43 nm) y 192,008 THz (1561,35 nm). Y el punto de 30 dB de atenuación se encuentra en 192,002 THz (1561,40 nm).

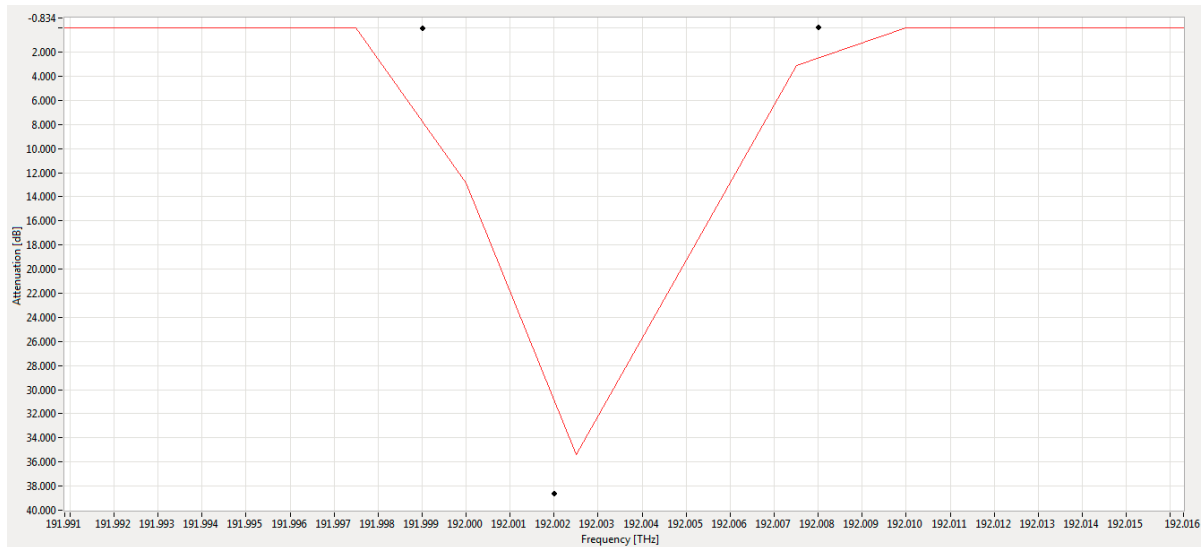


Figura 4-6 Captura del programa WaveSketch en el que se observa la forma del filtro aplicado al láser DFB.

Empezaremos las mediciones teniendo 235 nW cuando la punta que actúa como sensor se encuentra al aire.

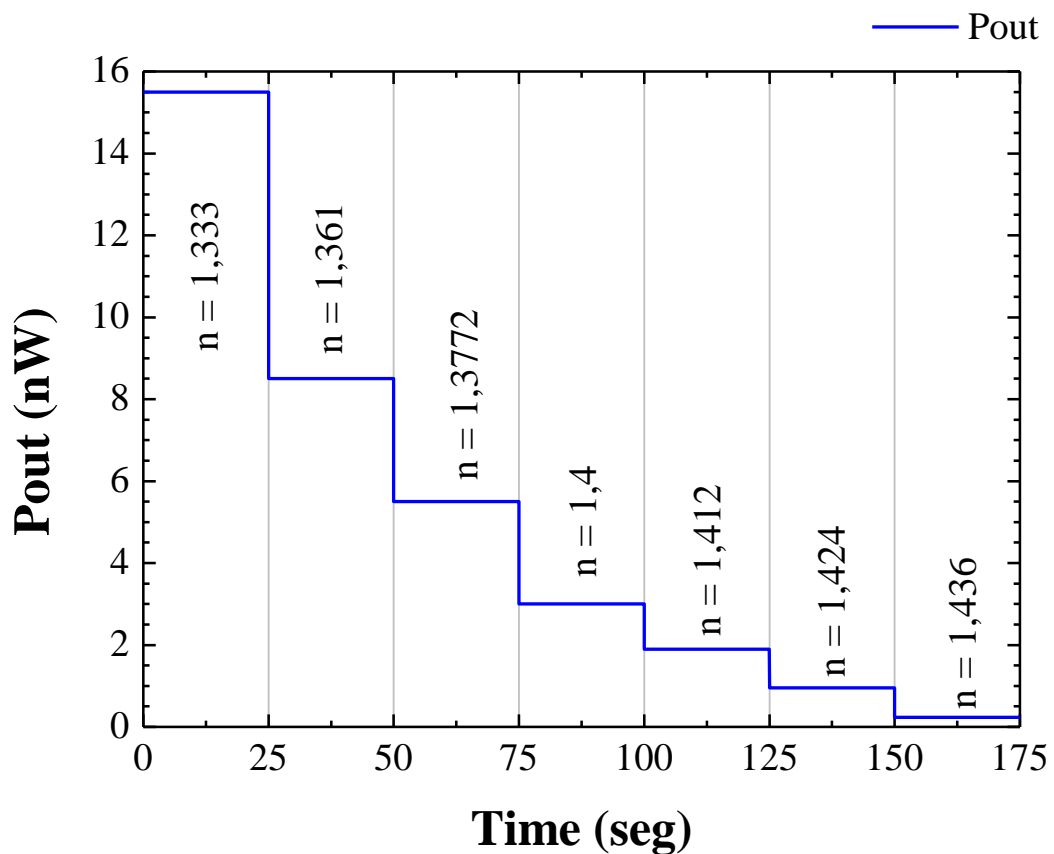


Figura 4-7 Potencia medida por el power meter en el sistema montaje que incluye el WaveShaper al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción.

En la Figura 4-7, se puede observar cómo gracias al sistema sensor que hemos implementado junto con el WaveShaper, también se detectan cambios en la potencia

medida por el *power meter* a medida que el índice de refracción varía. Es decir que, a mayor índice de refracción menor potencia. Lo único destacable es que observamos ese cambio de potencia con respecto a la Figura 4-3 en cuanto a que como hemos aplicado un filtrado al láser, éste tiene menor potencia como se aprecia en la Figura 4-5. Por tanto, al sumergir la punta que actúa como sensor en los distintos líquidos, el orden de potencias medidas es bastante más pequeños llegando al orden de pico-watios, estando muy al límite de la potencia umbral que consigue captar nuestro *power meter*. Sin embargo, se comprueba que la implementación de WaveShaper no impide el correcto funcionamiento de este sistema básico de detección de cambios en el índice de refracción.

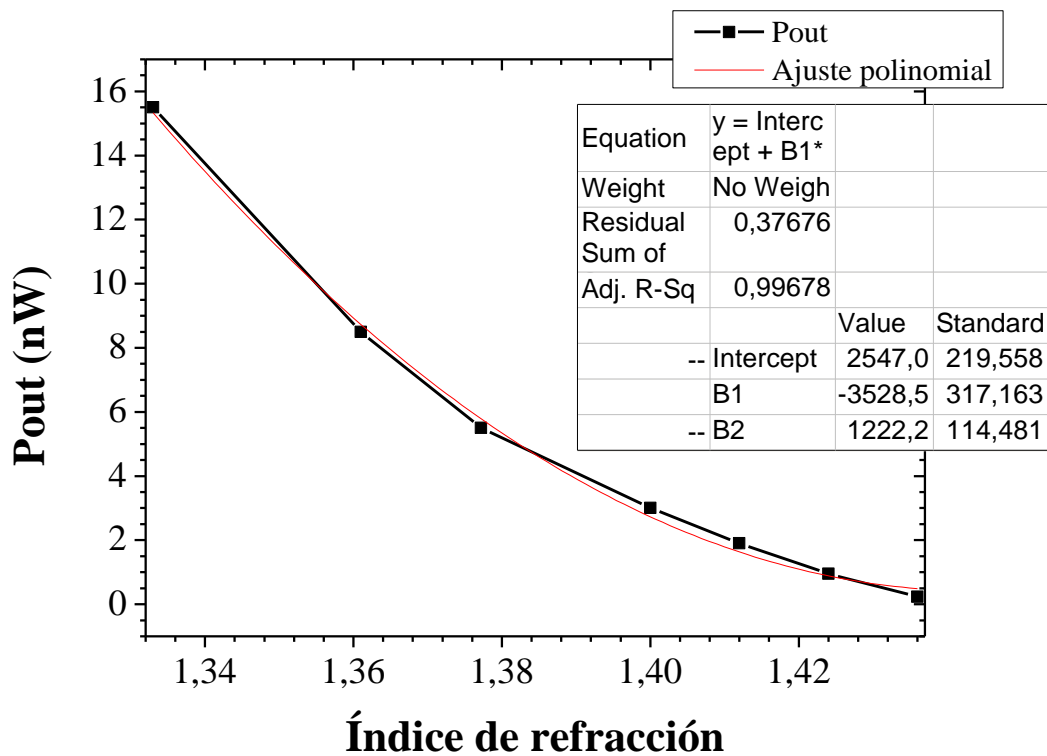


Figura 4-8 Potencia medida con el *power meter* al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en distintos líquidos que poseen distintos índices de refracción con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación polinomial de los resultados.

En la Figura 4-8, podemos ver la representación de la potencia que capta el *power meter* con respecto al índice de refracción del líquido en el que es sumergida la punta.

Comparando esta última gráfica con la de la Figura 4-4, se puede observar que la gráfica de la Figura 4-8 se ajusta más a la aproximación polinomial que la otra. Esto puede ser debido a que gracias al WaveShaper, hemos afinado el espectro del láser DFB y hemos conseguido tener aún más estabilidad en lo que se refiere a la potencia óptica. Por tanto, hemos conseguido gracias a esta herramienta optimizar nuestro sistema de detección preliminar.

## Capítulo 5 - Implementación y caracterización de la cavidad en anillo como sensor de índices de refracción.

Retomando de nuevo donde los habíamos dejado en el capítulo 3, una vez caracterizados los elementos de nuestra estructura experimental y habiendo conectado todos los dispositivos, ya tenemos preparado nuestro sistema de detección basado en una estructura en anillo que teníamos en la Figura 3-1.

En los últimos años, la detección del índice de refracción (IR) se ha llevado a cabo utilizando diferentes sensores basados en fibra óptica y su aplicación, se ha extendido a muchas áreas con impacto en la calidad de vida humana, como el monitoreo de radiación ionizante, cirugía, sismografía, o imágenes médicas. Estos sensores de fibra óptica destacan por su amplio ancho de banda, inmunidad a interferencias electromagnéticas, resistencia a la corrosión química, tamaño reducido y biocompatibilidad, entre otros.[13]

El principio físico relacionado con el mecanismo de funcionamiento de la fibra utilizada como sensor de detección se basa en la variación de intensidad inducida por el mesurando de la reflexión de Fresnel en la interfaz de fibra a líquido que vamos a medir. Al llegar al entorno, la luz se refleja parcialmente. De esta forma, la medida de las variaciones del índice de refracción se consigue con los cambios de intensidad de la señal óptica reflejada.[38]

Para corroborar el funcionamiento del sistema, se va a empezar con las medidas de nuestro sensor en contacto con aire, agua (ultra pura y oxigenada) y alcohol (isopropílico y etílico del botiquín de primeros auxilios). Seguidamente, se procederá a la medida de distintos líquidos con índice de refracción variados.

Cabe destacar que todas estas medidas siempre se realizarán con la punta de fibra SMF que se utiliza como elemento de detección con un corte transversal para realizar correctamente las mediciones y que nuestro láser de bombeo inyectará una intensidad de 200 mA para todas las medidas de este capítulo.

Estas mediciones experimentales se realizan a temperatura ambiente y no se emplean técnicas de compensación de temperatura o aislamiento de vibraciones. El diodo láser está controlado por temperatura para garantizar que la salida del láser sea lo más estable posible y, debido a que esta configuración se basa en circuladores, se garantiza el funcionamiento unidireccional, evitando el efecto indeseable de quemado de agujeros espaciales (SHB). Como se demostrará en las siguientes secciones, una de las principales ventajas de este sistema es que ofrece la posibilidad de utilizar fuentes de luz económicas y métodos de detección no sofisticados lo que se traduce en una reducción de su coste económico.[13]

## 5.1 Medidas preliminares con agua pura y alcohol isopropílico.

Para hacer las primeras medidas de nuestro sistema de detección vamos a utilizar dos líquidos que encontramos fácilmente en el laboratorio Teralab, como son el agua ultrapura y el alcohol isopropílico con el que limpiamos las fibras ópticas.

Vamos a realizar las medidas en el siguiente orden: aire, agua y alcohol. El sentido de hacerlo en ese orden es que, sabiendo que el índice de refracción del agua ( $n=1,333$ ) es mayor que el del aire ( $n=1,00028$ ) y el del alcohol ( $n=1,3772$ ) mayor que el agua, comprobar que cuando aumenta el índice de refracción baja la potencia detectada por nuestro sensor y, por tanto, aumentan las pérdidas.

Además, para estas medidas preliminares probaremos a intercambiar la posición del PS-FBG y el FBG y también a prescindir del PS-FBG para saber cómo afecta a la potencia medida por el *power meter*.

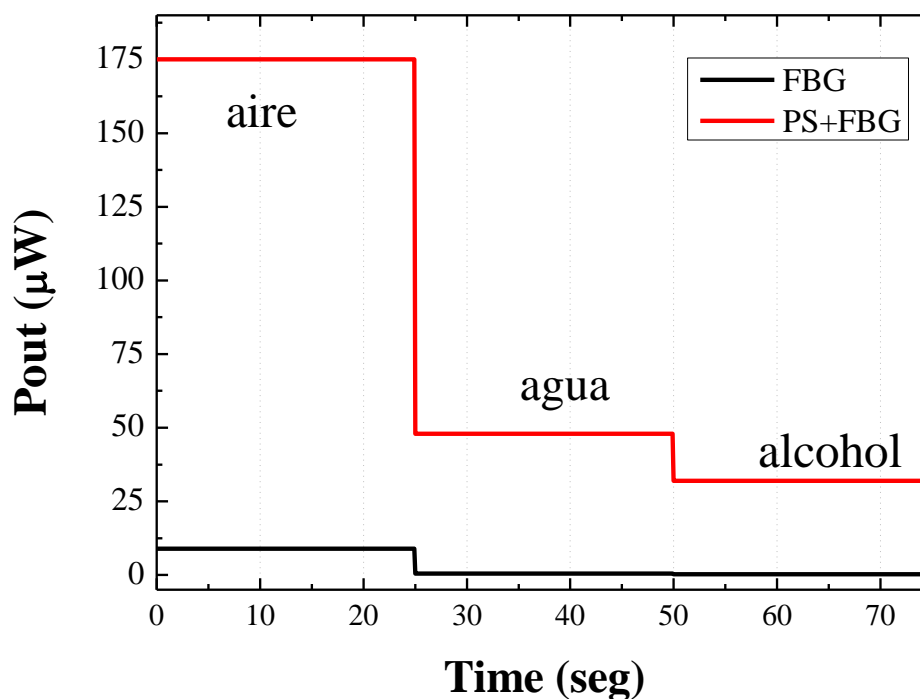


Figura 5-1 Potencia en  $\mu\text{W}$  medida por el *power meter* cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG.

En la Figura 5-1, observamos la potencia medida por el *power meter* cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en los líquidos mencionados, a lo largo del tiempo. Primeramente, hacemos las mediciones de potencia con el set-up de la Figura 3-1 y luego, repetimos las mediciones prescindiendo del PS-FBG. Se aprecia que cuanto más aumenta el índice de refracción, más se reduce la potencia medida y que si eliminamos el PS-FBG la potencia que se refleja es mucho menor por lo que la

diferencia de unas mediciones y otras en cuanto a potencia se refiere es muy considerable.

Del mismo modo, obtenemos en la Figura 5-2 la gráfica de las potencias medidas, pero en dBm con el objetivo de ver la comparación entre las mediciones con PS-FBG y FBG y con únicamente FBG en escala logarítmica ya que como la diferencia en lineal es tan grande, así podemos ver las variaciones de potencias de las dos mediciones con más claridad.

Por otra parte, en la siguiente Figura 5-3, se presentan estos mismos datos, pero en función de las pérdidas, medidas en dBm. Conforme aumentamos el índice de refracción de los líquidos en los que introducimos la punta de la fibra que hace de sensor, la potencia disminuye y por tanto aumentan las pérdidas en comparación a nuestra potencia de referencia que es la que obtenemos con la punta de la fibra en el aire.

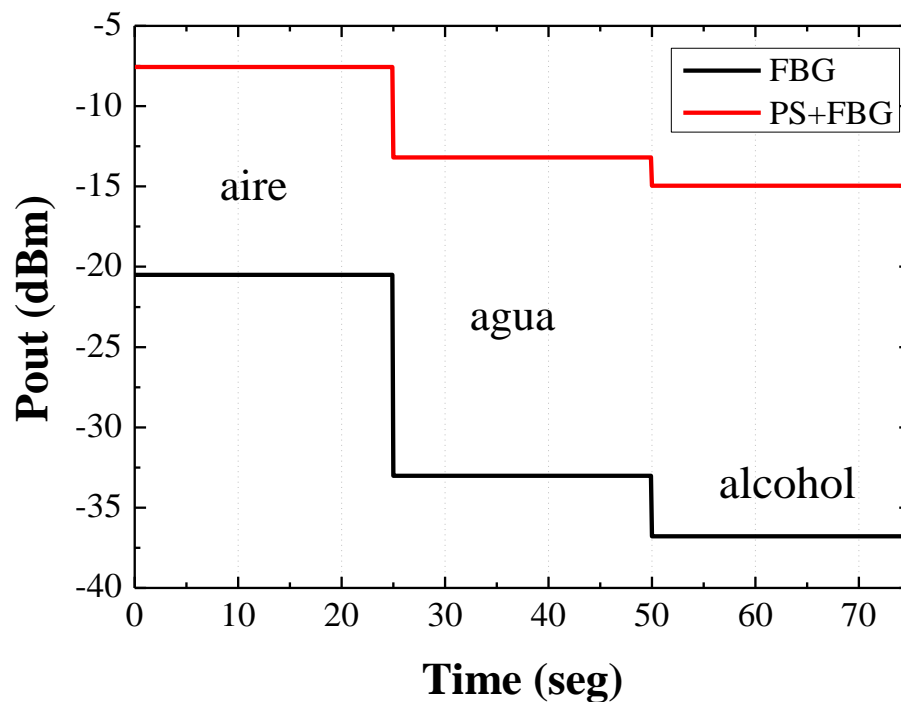


Figura 5-2 Potencia en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG.

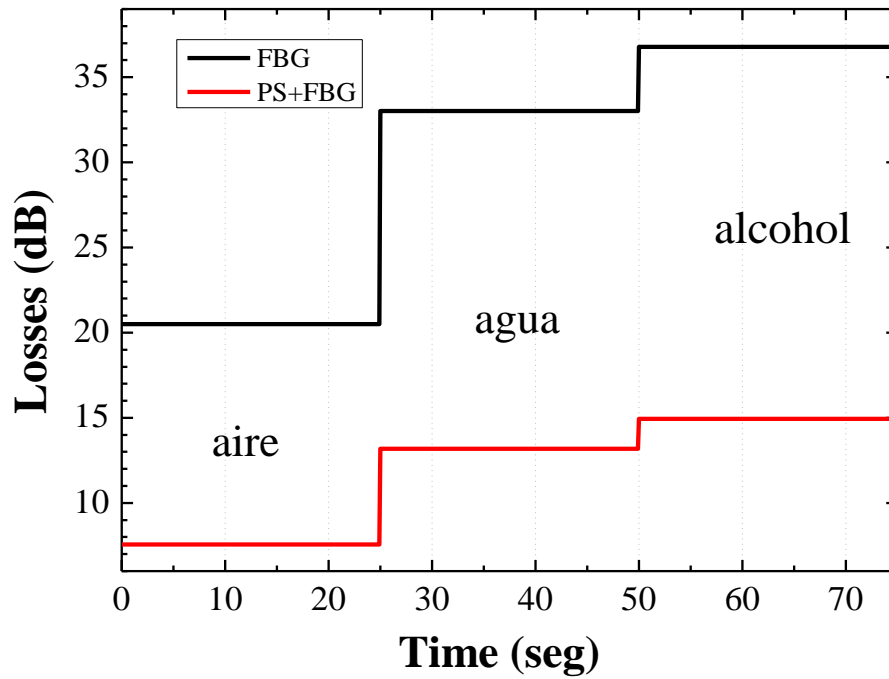


Figura 5-3 Pérdidas en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol con FBG y PS-FBG + FBG.



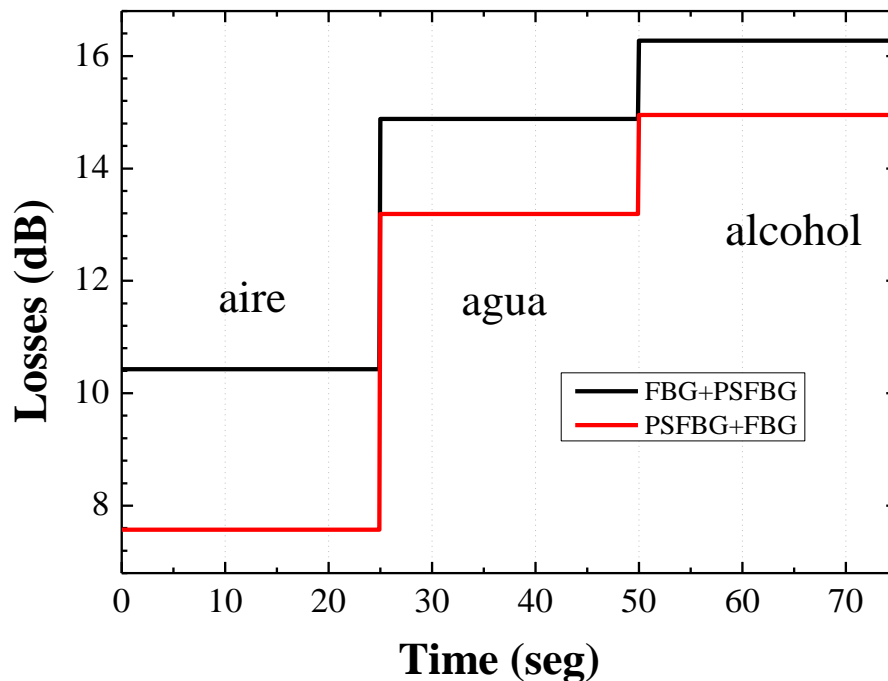


Figura 5-4 Pérdidas en dBm medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua y alcohol aplicando el intercambio de los FBG.

En la Figura 5-4, obtenemos nuevamente las pérdidas que se producen con respecto a la potencia de referencia que tenemos en el aire, pero en esta ocasión se han realizado unas terceras mediciones intercambiando las posiciones del FBG y del PS-FBG. Observamos que las pérdidas de la tercera medición comparadas con las medidas del set-up original siguen siendo menores, pero no tan pequeñas como cuando decidíamos prescindir del PS-FBG.

Así pues, con estas medidas preliminares, podemos concluir que nuestro sistema de detección funciona de forma correcta debido a que, como habíamos planteado inicialmente, aumenta las pérdidas de potencia conforme es sumergido en líquidos de mayor índice de refracción.

Por último, podemos también afirmar que el funcionamiento óptimo del sistema de detección como está descrito en la figura 3-1, ya que cuando colocamos PS-FBG y luego el FBG en ese orden, las pérdidas son menores que en el resto de casos que hemos probado.

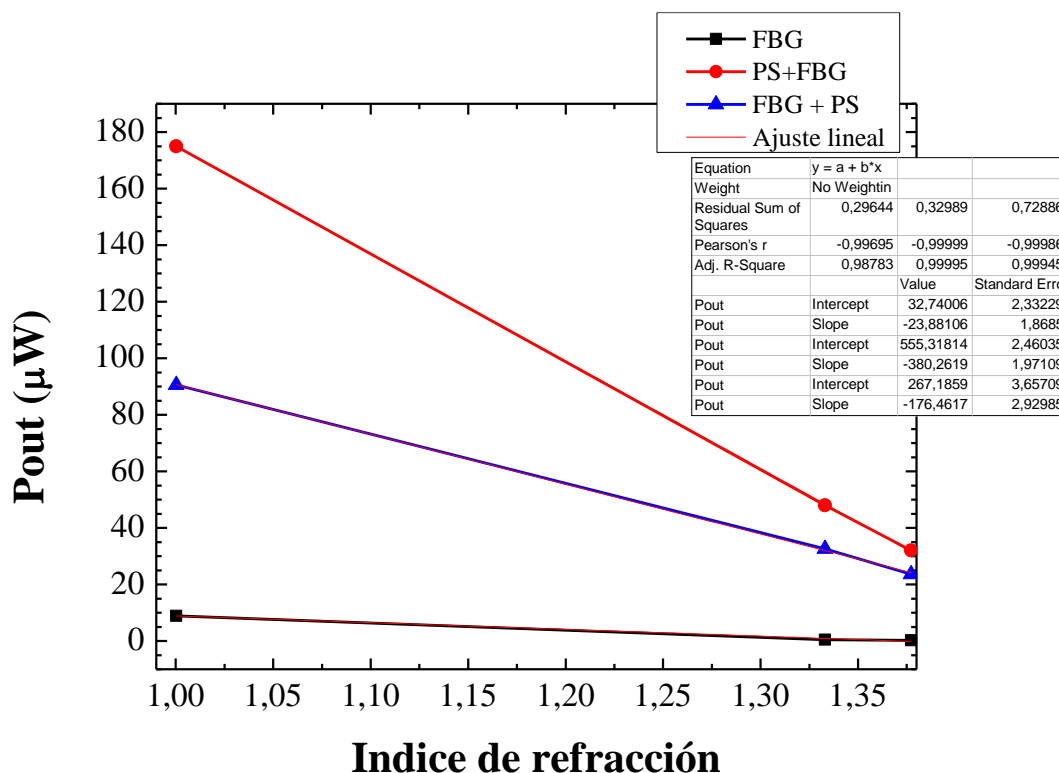


Figura 5-5 Potencia medida con el power meter al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en agua ultrapura y alcohol isopropílico con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación lineal de los resultados.

Para observar la linealidad de los resultados obtenidos, se obtiene la Figura 5-5, en la que incluimos las potencias medidas hasta ahora con respecto a los índices de refracción. Se incluye la aproximación lineal de los resultados para obtener la pendiente de las rectas.

Se observa que la recta que une las potencias medidas cuando utilizamos PS-FBG + FBG tiene una pendiente de  $-380,26 \mu\text{W}/\text{RIU}$  y un error asociado a ella de  $1,97 \mu\text{W}/\text{RIU}$ . Cuando utilizamos el orden inverso FBG + PS-FBG obtenemos una pendiente de  $-176,46 \mu\text{W}/\text{RIU}$  y un error asociado de  $2,92 \mu\text{W}/\text{RIU}$ , el cual es el mayor de los tres. Por último, obtenemos la recta que representa la unión de las potencias medidas cuando realizamos el experimento con un único FBG, que tiene una pendiente de  $-23,88 \mu\text{W}/\text{RIU}$ , que es la menor de todas, y un error de  $1,87 \mu\text{W}/\text{RIU}$  que también es el menor de todos.

## 5.2 Medidas con distintos líquidos.

En este apartado vamos a introducir, a parte de los líquidos del apartado anterior, agua oxigenada y alcohol etílico de 96º del botiquín de primeros auxilios. Es interesante comparar estos tipos de líquidos con distintos índices de refracción porque son líquidos al alcance de cualquiera.

Se va a proceder también, al igual que en el experimento anterior, a la realización de medidas con el montaje original, con la utilización únicamente del FBG e intercambiando el FBG y el PS-FBG para cerciorarnos de las conclusiones a las que hemos llegado con las medidas realizadas en el apartado anterior.

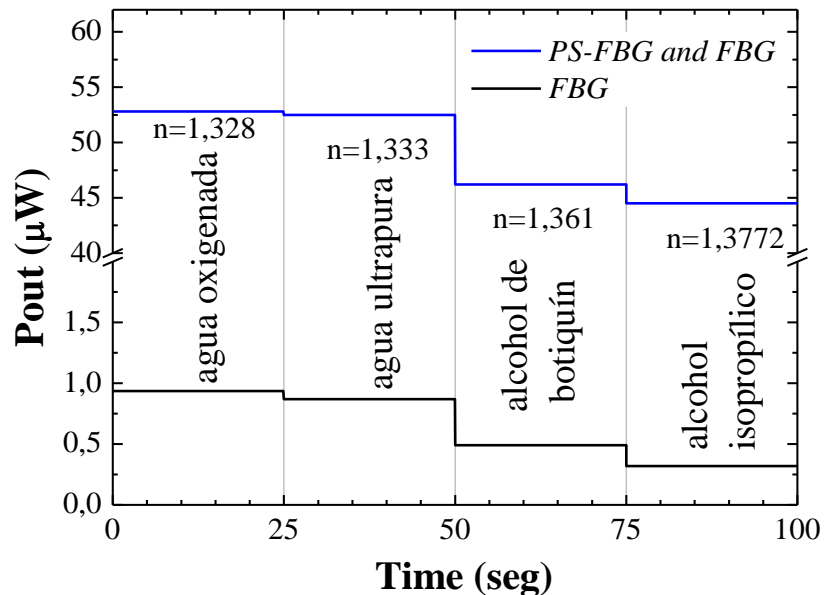


Figura 5-6 Potencia en  $\mu\text{W}$  medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en  $\text{H}_2\text{O}_2$ , agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG y PS-FBG + FBG.

En la Figura 5-6, observamos la potencia medida por el *power meter* cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en los nuevos líquidos, a lo largo del tiempo. Al igual que en el apartado anterior, primeramente, hacemos las mediciones de potencia con el set-up de la Figura 3-1 y luego, repetimos las mediciones prescindiendo del PS-FBG. Se aprecia que cuanto más aumenta el índice de refracción, más se reduce la potencia medida y que si eliminamos el PS-FBG la potencia que se refleja es mucho menor por lo que la diferencia de unas mediciones y otras en cuanto a potencia se refiere es muy considerable ya que como se observa en la gráfica, la diferencia es de alrededor de  $50 \mu\text{W}$ .

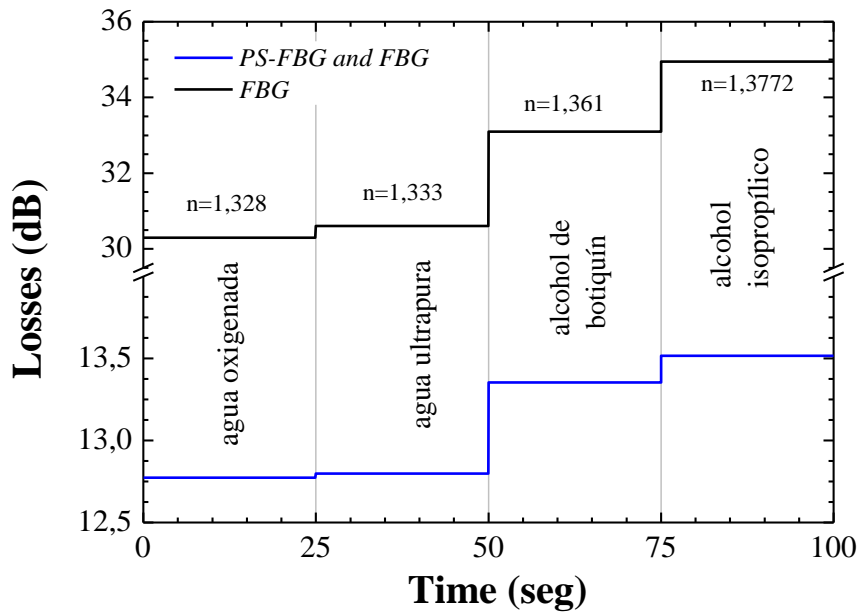


Figura 5-7 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG y PS-FBG + FBG.

En la Figura 5-7, se muestran los datos obtenidos en función de las pérdidas, expresadas en dBm. Conforme aumentamos el índice de refracción de los líquidos en los que introducimos la punta de la fibra que hace de sensor, la potencia disminuye y por tanto aumentan las pérdidas de potencia medida en el *power meter*.

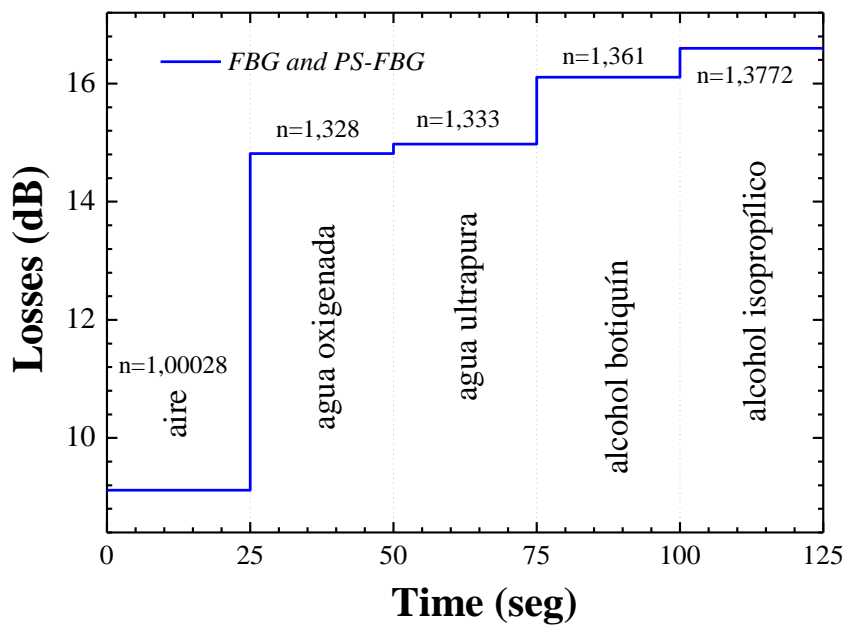


Figura 5-8 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico con FBG + PS-FBG.

Una vez realizadas la tercera medición de los líquidos intercambiando el PS-FBG y el FBG en la Figura 5-8, vemos la gráfica de las pérdidas con respecto a la potencia medida por el *power meter* en el aire en la cual éstas aumentan a medida que se incrementa el índice de refracción. Al igual que en el apartado anterior, observamos que como mejor funciona nuestro sistema es en el orden de colocación PS-FBG y FBG de nuestro set-up de la Figura 3-1 porque es el modo en el que tenemos menos pérdidas y más potencia capta el *power meter* debido a la reflexión producida por el PS-FBG y el FBG en la longitud de onda en la que están centrados (alrededor de 1550 nm).

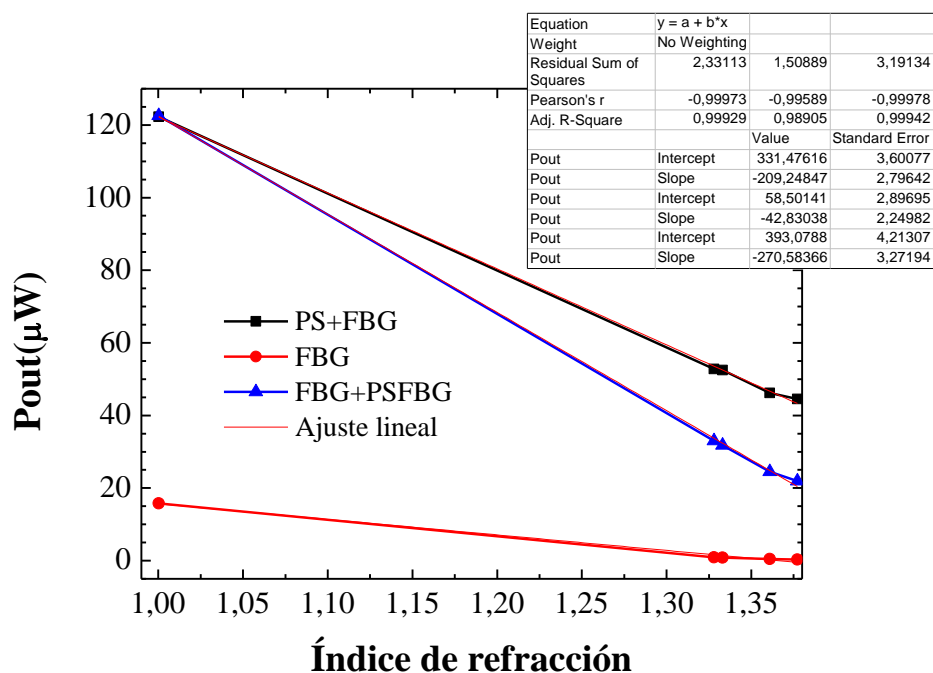


Figura 5-9 Potencia medida con el *power meter* al sumergir la punta de fibra óptica que actúa como sensor en agua ultrapura y alcohol isopropílico, agua oxigenada y alcohol de botiquín con respecto al índice de refracción. Se incluye también una aproximación lineal de los resultados.

Para observar la linealidad de los resultados obtenidos, se obtiene la Figura 5-9, en la que incluimos las potencias medidas hasta ahora con respecto a los índices de refracción. Se incluye la aproximación lineal de los resultados para obtener la pendiente de las rectas. Para comparar las pendientes de estas rectas y su error hay una tabla resumen de todos los datos obtenidos al final de este capítulo.

Así pues, se ha demostrado experimentalmente que añadiendo un PS-FBG además del FBG en la estructura en anillo mostrado en la Figura 3-1 y publicado en el artículo [13], mejoran notablemente los resultados obtenidos.

Por último, destacar que el presente trabajo mostrado en esta memoria de trabajo fin de grado ha sido enviado para su consideración y posterior publicación en el congreso europeo *European Optical Society Annual Meeting 2023 (EOSAM)*, que se celebrará en Dijon, Francia, del 11 al 15 de septiembre de 2023. En el siguiente enlace se puede encontrar la información referente a este evento:

<https://www.europeanoptics.org/events/eos/eosam2023.html>

### 5.3 Medidas con líquidos de índices de refracción calibrados a partir de 1,3.

En este experimento, vamos a proceder a la medida de diferentes líquidos de la marca comercial *Cargille Laboratories* [39]. Estos líquidos tienen la característica de que tienen calibrado su índice de refracción, lo que nos permitirá llevar a cabo una caracterización mucho más precisa de nuestro sistema de sensores. Los índices de refracción de estos líquidos para esta primera ronda de medidas serán los calibrados entre 1,3 a 1,395 con saltos de 0,005.

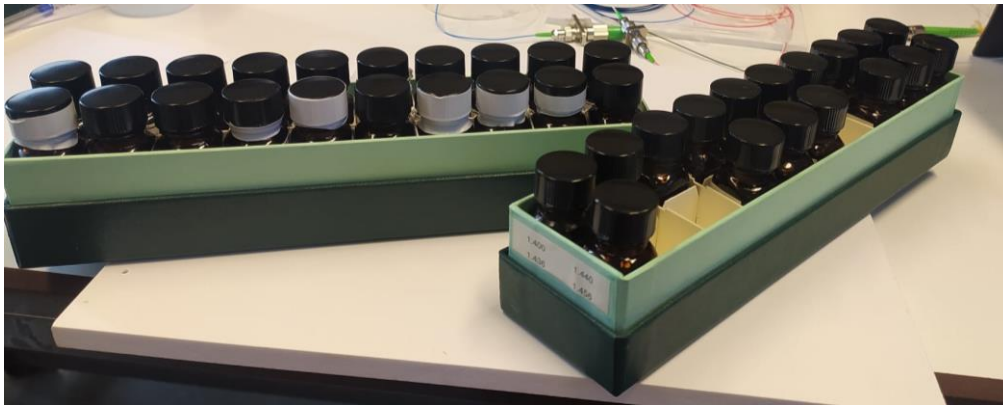


Figura 5-10 Cajas contenedoras de los botes de los líquidos con índices de refracción calibrados.

Para la realización de las medidas, utilizaremos portaobjetos en los que depositaremos gotas de los diferentes líquidos con un índice calibrado donde sumergir la punta de fibra que actuará como sensor de nuestro sistema.



Figura 5-11 Fotografía con diferentes portaobjetos en los que depositar las gotas de los líquidos con índices de refracción entre 1,3 y 1,32 para la posterior medición.

Para la realización de medidas con diferentes botes con otros índices de refracción, será imprescindible limpiar cada portaobjeto con alcohol y esperar unos minutos a que se seque. Todo ello con el objetivo de que, a la hora de sumergir el sensor, podamos asegurar que no está mezclado ningún otro líquido que haga variar el índice de refracción del líquido, es decir, que la muestra no esté contaminada y la potencia obtenida sea correcta.



Figura 5-12 Fotografía con diferentes portaobjetos donde depositar las gotas de los líquidos con índices de refracción entre 1.3 y 1.32 para la posterior medición.

Antes de proceder a la caracterización de nuestro sistema mediante la medida de estos líquidos calibrados hay que destacar que, si medimos los líquidos con el índice de refracción ordenados de menor a mayor obtendremos unas potencias que irán descendiendo y eso es lo que tenemos que comprobar a nivel práctico.

A continuación, se comienza con la realización de las medidas del lote de los líquidos de índices de refracción que comienzan a partir de  $n = 1,3$ .

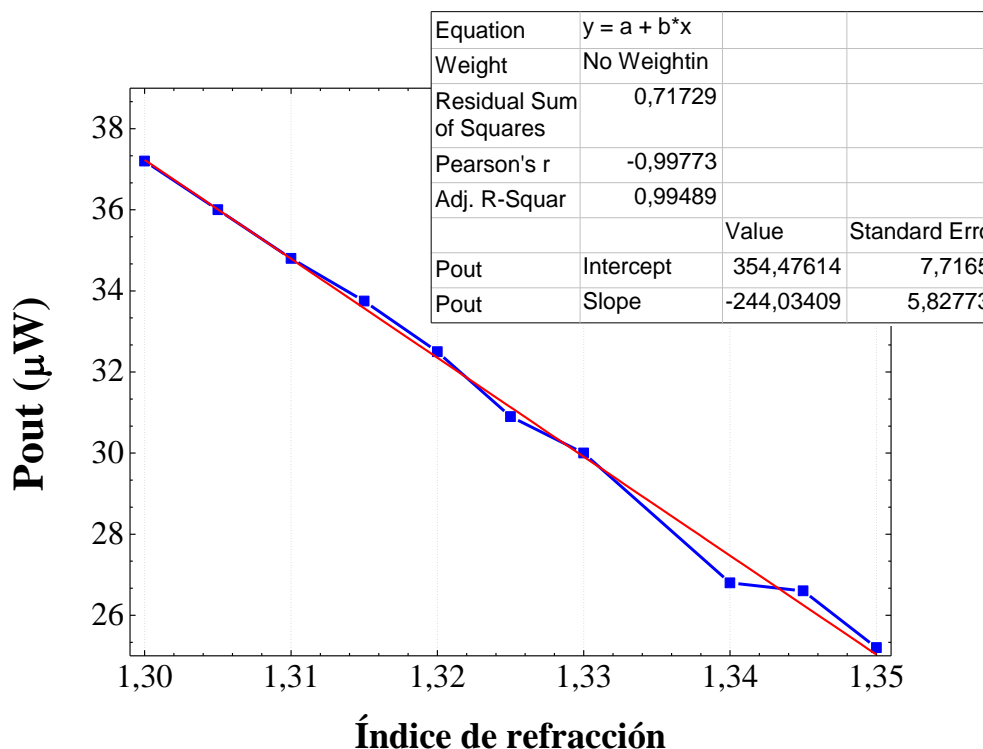


Figura 5-13 Potencia reflejada, medida en  $\mu W$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,3 – 1,35. Se muestra además la aproximación lineal de los resultados obtenidos.

En la Figura 5-13, podemos observar las potencias reflejadas obtenidas al sumergir el sensor en los diferentes líquidos. El eje x representa los índices de refracción y el eje y la potencia medida por el *power meter*. Tenemos un rango de potencias medidas que comprende entre aproximadamente 37  $\mu W$  y 25  $\mu W$ . Al igual que en las mediciones de los apartados anteriores cuando el índice de refracción aumenta, la potencia reflejada medida disminuye. En este caso, entre líquido y líquido, el paso que hay con respecto a sus índices de refracción 0,005. Se muestra además en la figura la recta de aproximación lineal que obtenemos gracias a la estadística.

Esta recta de aproximación nos proporciona la pendiente que en este caso es -244,03  $\mu W/RIU$  y el error estándar con respecto a este valor de pendiente de los datos obtenidos que es 5,83. También, obtenemos el punto de intercepción de la recta con el eje y (354,48  $\mu W$ ), y el error estándar con respecto a ese punto de los datos, que es 7,72.

Como se puede observar, las medidas obtenidas no son perfectamente lineales, pero obtenemos un error de los datos obtenidos conforme la pendiente y el punto de intercepción aceptables.

El error puede deberse a que haya quedado algún resto de otro líquido como puede ser el alcohol con el que limpiamos la propia fibra óptica o el líquido de la muestra anterior. También podría deberse a que los FBGs son muy sensibles a la temperatura, y el



espectro se haya desplazado ligeramente y por tanto no estemos captando toda la potencia que se debería reflejar. Y, por último, podría deberse a que sin darnos cuenta hayamos curvado en exceso la punta de la fibra óptica que actúa como sensor y hayamos introducido unas pérdidas indeseables.

En definitiva, el sistema no es perfecto, pero podemos cerciorarnos de que funciona con bastante precisión refiriéndonos a estos índices de refracción basándonos en los datos que hemos obtenido.

#### 5.4 Medidas con líquidos de índice de refracción calibrados a partir de 1,4.

En este siguiente experimento, vamos a proceder a la medida de los siguientes líquidos del lote de *Cargille Laboratories*. Los índices de refracción de los líquidos para estas medidas son los calibrados entre 1,4 a 1,46 con saltos de 0,004.



Figura 5-14 Botes de líquido de índices de refracción de entre 1,4 – 1,412.

Para estas medidas, se ha seguido el mismo procedimiento experimental que en el apartado anterior.

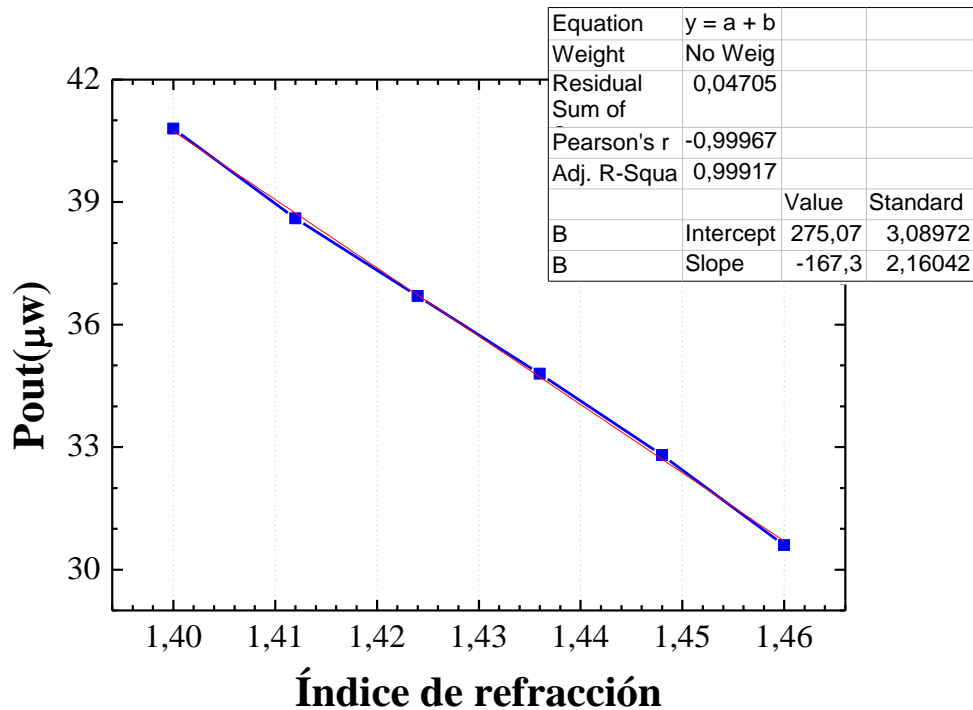


Figura 5-15 Potencia reflejada, medida en  $\mu\text{w}$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,4 – 1,46. Se muestra además la aproximación lineal de los resultados obtenidos.

Una vez realizadas las medidas de los líquidos que tienen índices de refracción de entre 1,4 – 1,46, obtenemos unas potencias que van disminuyendo poco a poco conforme aumenta el índice de refracción de los líquidos. En este caso, obtenemos una pendiente de  $-167,38 \mu\text{w}/\text{RIU}$  con un error de 2,16 y un punto de intercepción con el eje y de 275,07  $\mu\text{w}$  con un error de 3,09. Hemos mejorado los resultados con respecto al anterior experimento, de hecho, en este experimento hemos conseguido reducir notablemente el error, tanto de la pendiente como del punto de intercepción, en aproximadamente 4 puntos con respecto al anterior.

Una vez realizada esta caracterización con 6 muestras calibradas, se amplió el número de líquidos evaluados. Como se puede observar en la Figura 5-16, este comportamiento deja de ser tan lineal partir de un índice de refracción de 1,46. A partir de este valor nuestro sistema de detección adquiere un comportamiento menos lineal e incluso en vez de disminuir la potencia, ocurre un aumento de la misma. Por ejemplo, se probó a sumergir la fibra en el siguiente bote de índice de refracción 1,464 y la potencia en lugar de seguir descendiendo, subió a aproximadamente 31,5  $\mu\text{w}$  y no varió en exceso en posteriores mediciones con líquidos de índices de refracción mayores con el de 1,48 como vemos en la Figura 5-16.

Se desconoce si esto es debido a que las muestras están contaminadas o si nuestro sistema no es capaz de medir bien la potencia pasando un cierto umbral de índices de refracción. Al comienzo de este trabajo de fin de grado, se hizo efectiva la compra de un refractómetro para comprobar los índices de refracción exactos que tienen los distintos líquidos utilizados, pero se retrasó en exceso la entrega y, por tanto, no sabemos con

exactitud si todos los valores medidos tienen el valor de índice de refracción que debieran tener.

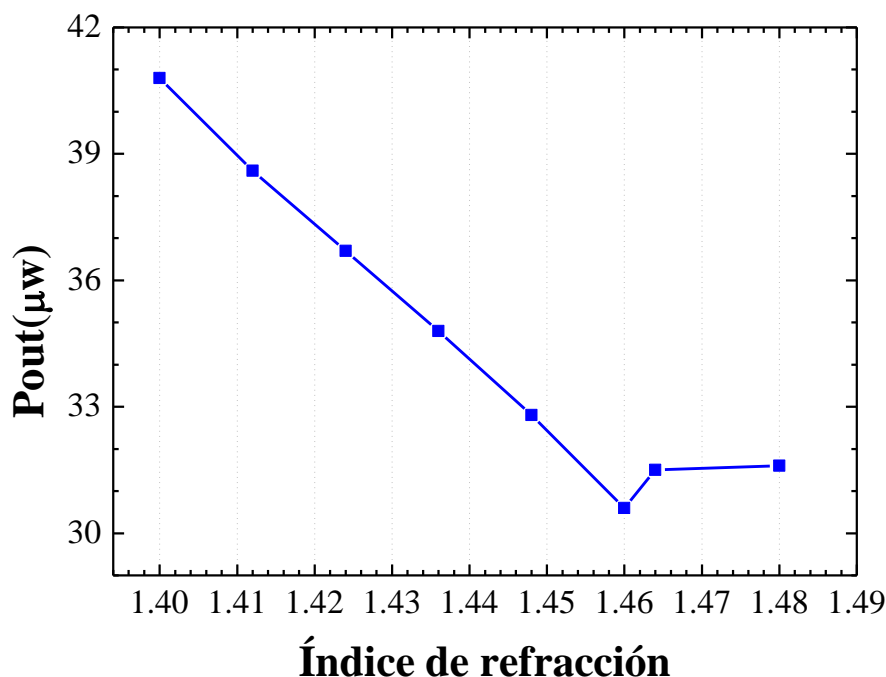


Figura 5-16 Potencia reflejada, medida en  $\mu w$ , obtenida al sumergir el sensor en los líquidos de índices de refracción comprendidos entre 1,4 – 1,48.

Por tanto, podemos aseverar que nuestro sistema trabaja correctamente entre los índices de refracción 1,3 y 1,46, ya que presenta un comportamiento lineal entre el índice de refracción medido y la potencia reflejada, además de unos valores de error reducidos.

Por último, con el objetivo de recopilar todos los datos recogidos en este capítulo se puede observar la siguiente tabla.

Configuración del set-up	Pendiente
PS-FBG + FBG (2 líquidos)	-380,26 ± 1,97 $\mu w$ /RIU
FBG + PS-FBG (2 líquidos)	-176,46 ± 2,92 $\mu w$ /RIU
FBG (2 líquidos)	-23,88 ± 1,87 $\mu w$ /RIU
PS-FBG + FBG (4 líquidos)	-209,25 ± 2,80 $\mu w$ /RIU
FBG + PS-FBG (4 líquidos)	-270,58 ± 3,27 $\mu w$ /RIU
FBG (4 líquidos)	-42,83 ± 2,25 $\mu w$ /RIU
PS-FBG + FBG (índices calibrados 1,3)	-244,03 ± 5,82 $\mu w$ /RIU
PS-FBG + FBG (índices calibrados 1,4)	-167,38 ± 2,16 $\mu w$ /RIU

Tabla 5-1 Resumen de las pendientes y sus errores de las rectas que unen las potencias de las distintas potencias medidas en este capítulo.

## Capítulo 6 - Optimización del sistema de detección basado en la estructura de láser de fibra óptica en anillo con la implementación de un WaveShaper.

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos capítulos anteriores, el PS-FBG de la estructura en anillo descrita en “Diseño y caracterización de la estructura en anillo.”, es sustituido por un WaveShaper. Como ya hemos comentado con anterioridad es un dispositivo que admite formas arbitrarias de filtros generados por el usuario. Por tanto, vamos a usar un filtro que crearemos mediante el software WaveSketch. El objetivo será optimizar este filtro para hacerlo coincidir con el espectro del FBG y poder modificar su respuesta.

Hay que añadir que, en esta parte del trabajo, se ha empleado un PS-FBG no comercial y centrado también alrededor de los 1550 nm. La razón de la sustitución fue que en el nuevo tendremos acceso a uno de los extremos de nuestro reflector y por tanto podremos realizar mediciones con líquidos sumergiendo la punta de fibra que actuaba como sensor en los capítulos anteriores, a la que añadiremos también el extremo de nuestro FBG como punta que actúe también de sensor.

El espectro del PS-FBG no comercial se puede observar en la siguiente figura.

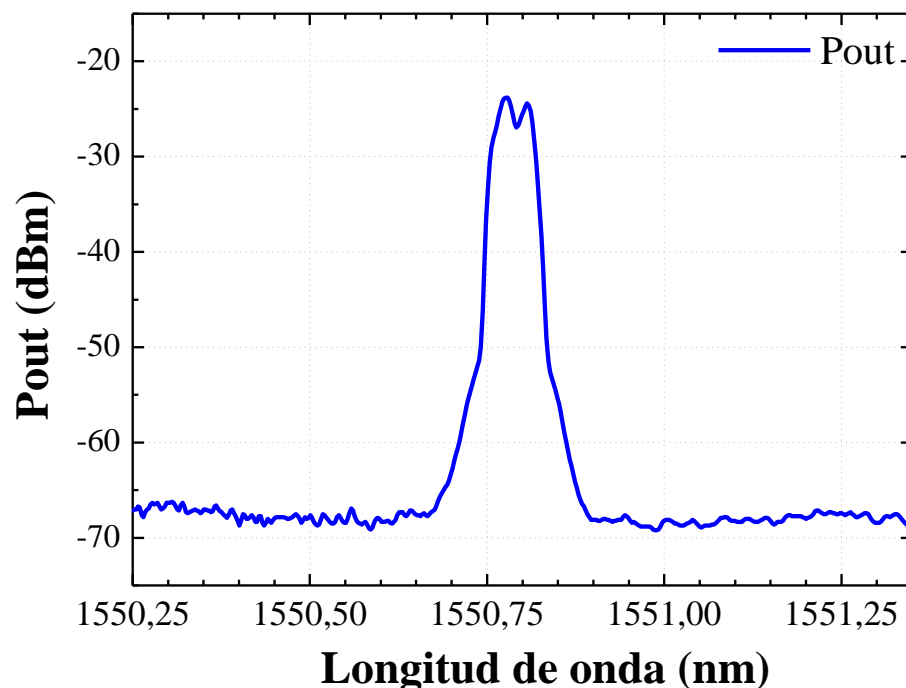


Figura 6-1 Espectro en reflexión del PS-FBG no comercial centrado en 1550,75 nm.

Además de la comentado, por último, se agregará al set-up otro acoplador óptico 90:10 entre el puerto del WDM que cierra el anillo y el puerto del acoplador 50:50 que también cerrará la estructura. Esto es debido a que el WaveShaper no trabaja en reflexión, por tanto, si colocamos el *power meter* en el sitio donde va colocado originalmente, no podríamos captar ningún tipo de cambio de potencia al sumergir las fibras ópticas que utilizamos como sensor en líquidos de índices de refracción variados. Colocaremos el *power meter* en el puerto de 10% de potencia de salida en el nuevo acoplador.

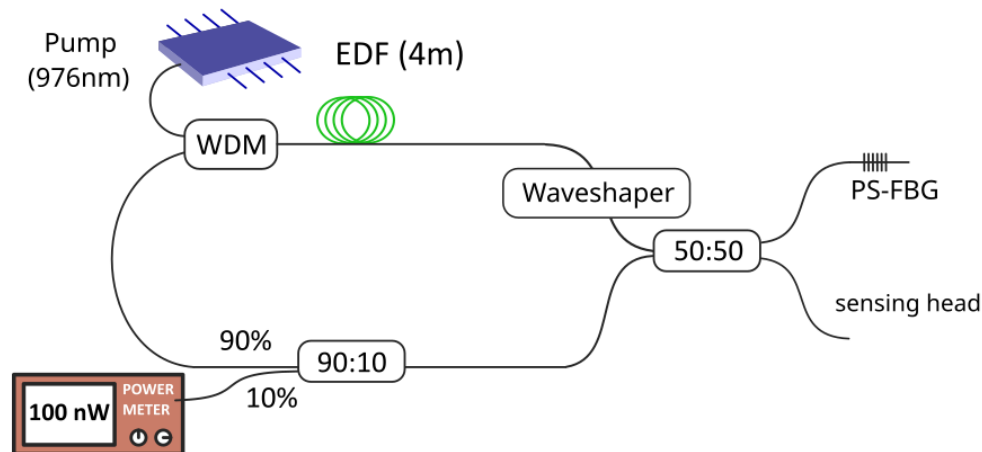


Figura 6-2 Set-up del láser de estructura en anillo implementando el WaveShaper.

## 6.1 Caracterización de un láser con la aplicación del filtrado del WaveShaper.

Usaremos el WaveShaper para obtener un nuevo láser de fibra óptica centrado en 1550 nm que tenga una estabilidad suficiente para poder realizar nuevas mediciones. Para ello se van a aplicar una serie de filtros a nuestro espectro del PS-FBG de 1550 nm para determinar cuál de ellos nos garantiza la mayor estabilidad posible del láser con el que realizar unas medidas posteriores de las que podamos sacar unas conclusiones acertadas.

### *Filtro paso banda.*

En primer lugar, aplicaremos un filtro paso banda al espectro del PS-FBG. Se trata de un filtro paso banda de anchura espectral de 0,078 nm y centrado en 1549,783 nm. Se ha escogido la mínima anchura de filtro posible que permite nuestro dispositivo de filtrado para poder hacer la anchura de nuestro láser lo más fina posible y así obtener una mejor estabilidad en la potencia óptica.

Esto dará lugar al espectro que obtenemos a continuación.

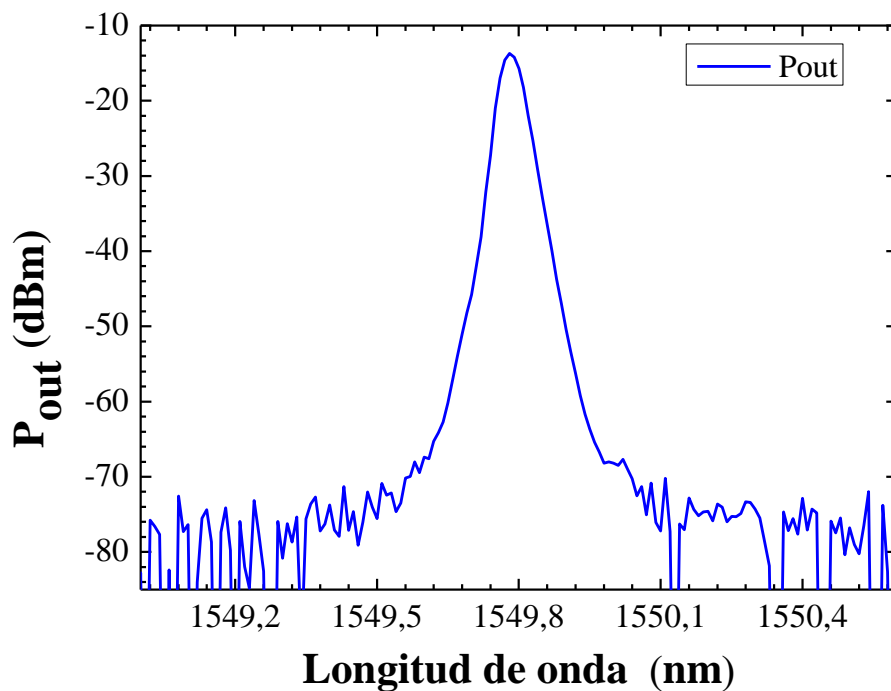


Figura 6-3 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro paso banda centrado en 1549,78 nm y de anchura 0,078 nm.

Para estudiar la estabilidad que nos ofrece este láser y garantizar así el buen funcionamiento, se van a medir los máximos de potencia y en qué longitud de onda se encuentran centrados. Para esto se ha creado un programa en *Matlab* que obtenga cada segundo una traza del OSA para el espectro de la Figura 6-3 para ver el comportamiento del láser a lo largo del tiempo.

Una vez medidas 1500 trazas del analizador de espectros ópticos, se va a proceder al estudio de los máximos de potencia y en qué longitud de onda quedan centrados.

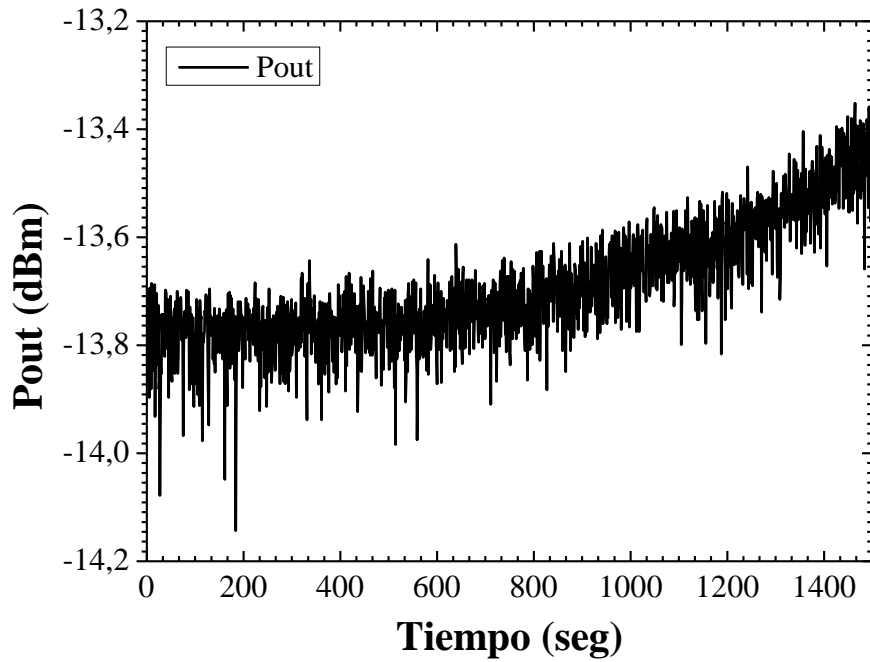


Figura 6-4 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda.

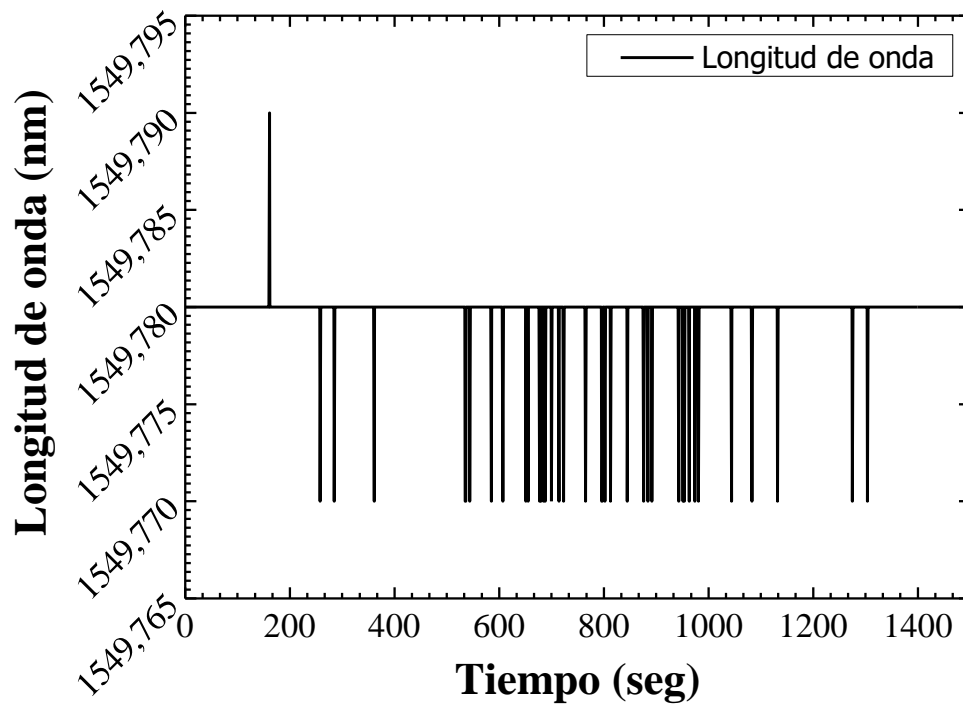


Figura 6-5 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda.

En la Figura 6-4, observamos que los máximos de potencia se encuentran, en el primer tramo de la gráfica, en torno a -13,8 dBm. Sin embargo, en el segundo tramo, la potencia aumenta con el tiempo considerablemente. Esto puede ser debido a que como ya hemos comentado anteriormente, el PS-FBG es muy sensible a la temperatura, y es posible que en el laboratorio donde se han realizado las mediciones haya aumentado la temperatura en el momento de las capturas y haya comenzado a aumentar la potencia.

En contraposición, en la Figura 6-5, observamos una estabilidad significativa en cuanto a longitud de onda de los máximos de potencia se refiere. La mayor parte de los máximos se encuentran en 1549,78 con una desviación tanto hacia arriba como hacia abajo de tan solo 0,01 nm.

Para evaluar estos resultados, escogeremos el intervalo de la Figura 6-4 en el que la potencia se mantiene aceptablemente estable.

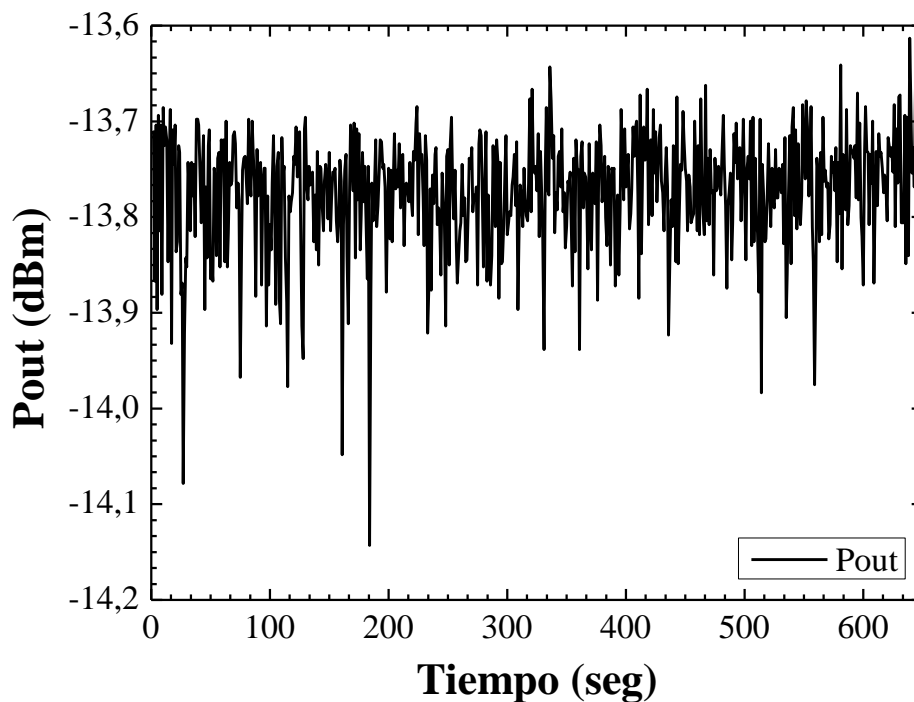


Figura 6-6 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro paso banda en las primeras 650 muestras.

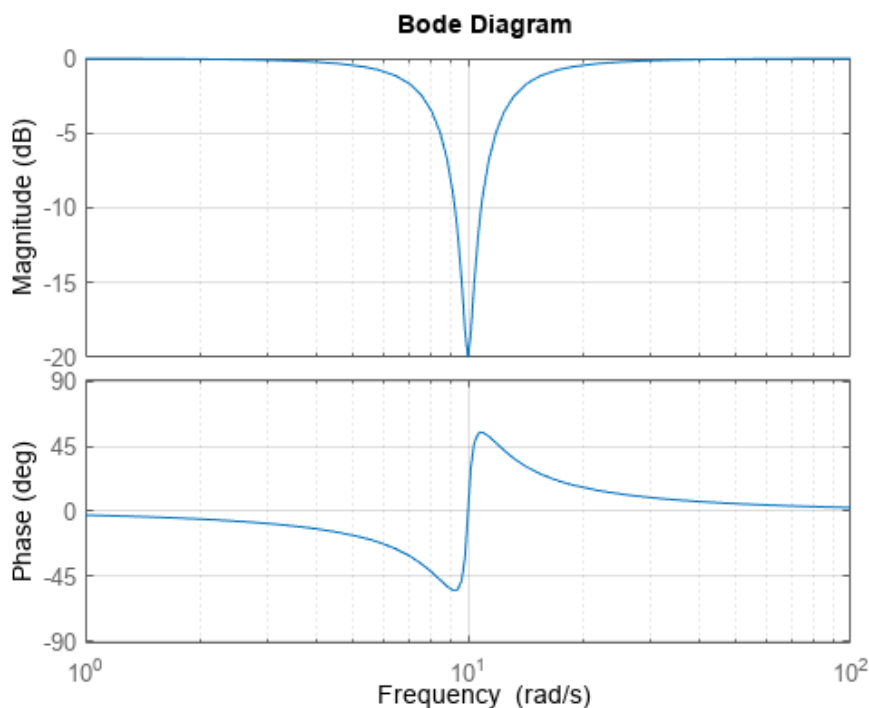
Los resultados obtenidos demuestran una baja estabilidad en cuanto al pico de potencia máxima del láser a lo largo del tiempo, pero una precisión muy grande con respecto a la estabilidad del pico en la longitud de onda en la que este se encuentra.



### *Filtro Notch (Filtro Rechazo banda).*

En segundo lugar, vamos a aplicar un filtro rechazo banda al espectro del PS-FBG. Se trata de un filtro que rechaza una banda centrada en 1549,864 nm y una anchura espectral que viene predefinida por el software de 0,797 nm. Este filtro, en contraposición de filtro paso banda que nos permitía quedarnos con la parte del espectro que nos interesaba, nos permitirá eliminar la parte del espectro que no nos interesa.

La Figura 6-7 muestra un ejemplo de este tipo de filtros.



*Figura 6-7 Ejemplo del espectro en magnitud y en fase que conforma un filtro notch.[40]*

La aplicación de este tipo de filtrado dará lugar al espectro que obtenemos a continuación.

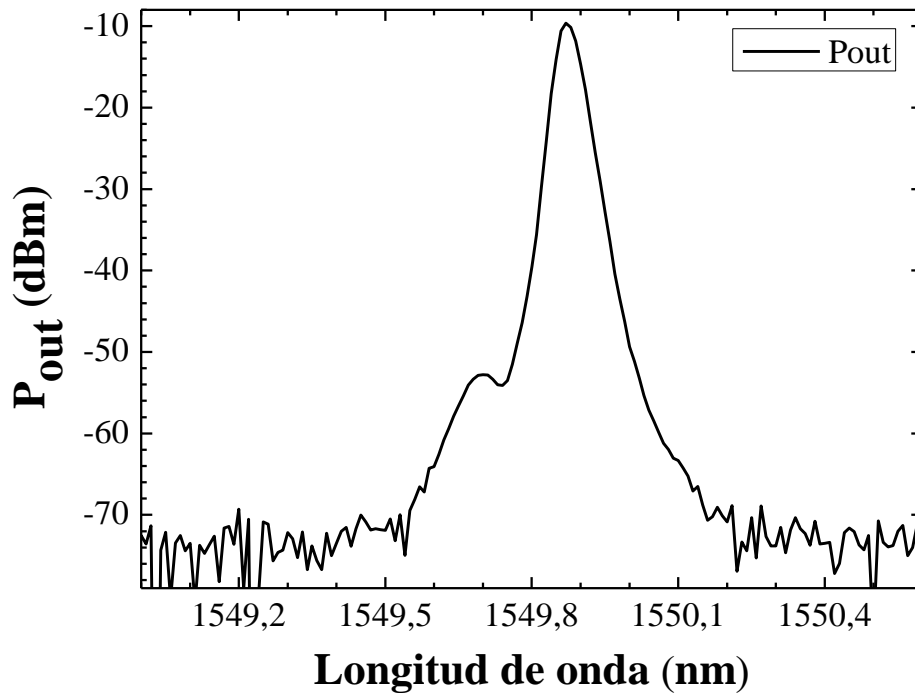


Figura 6-8 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro rechazo banda centrado en 1549,864 nm.

Para estudiar la estabilidad que nos ofrece este láser y garantizar así el buen funcionamiento, se van a agrupar los máximos picos de potencia y en qué longitud de onda se encuentran centrados. Para esto volvemos a aplicar el mismo programa en *Matlab* que obtenga cada segundo una traza del OSA para el espectro que podemos ver en la Figura 6-8 para ver el comportamiento del láser a lo largo del tiempo.

En esta ocasión, vamos a captar 1900 trazas del analizador de espectros ópticos. Después procederemos al estudio de los máximos de potencia y en qué longitud de onda quedan centrados.

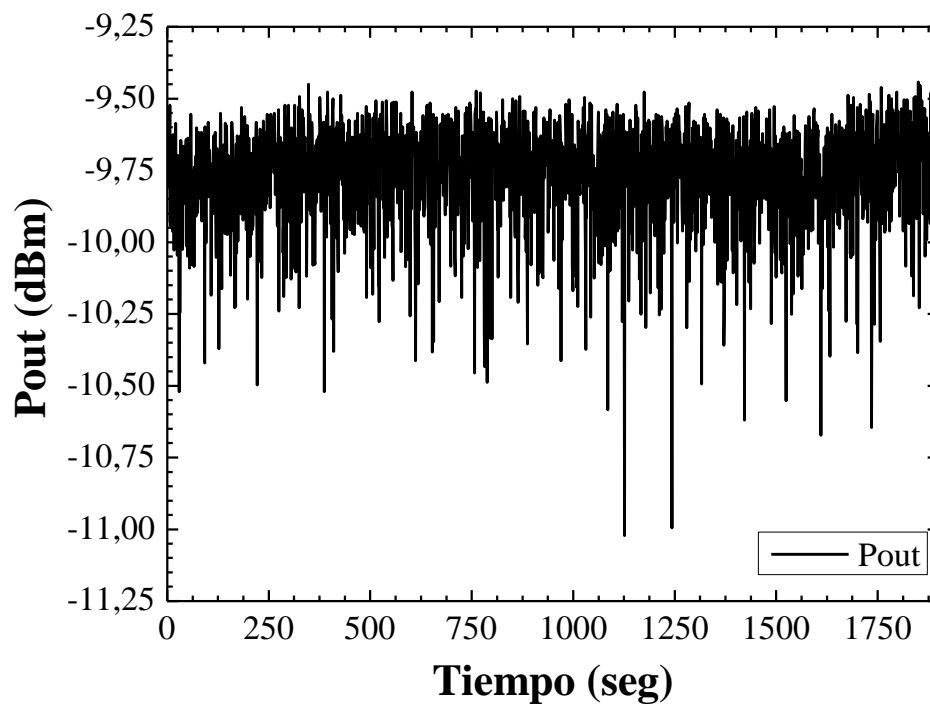


Figura 6-9 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro rechazo banda.

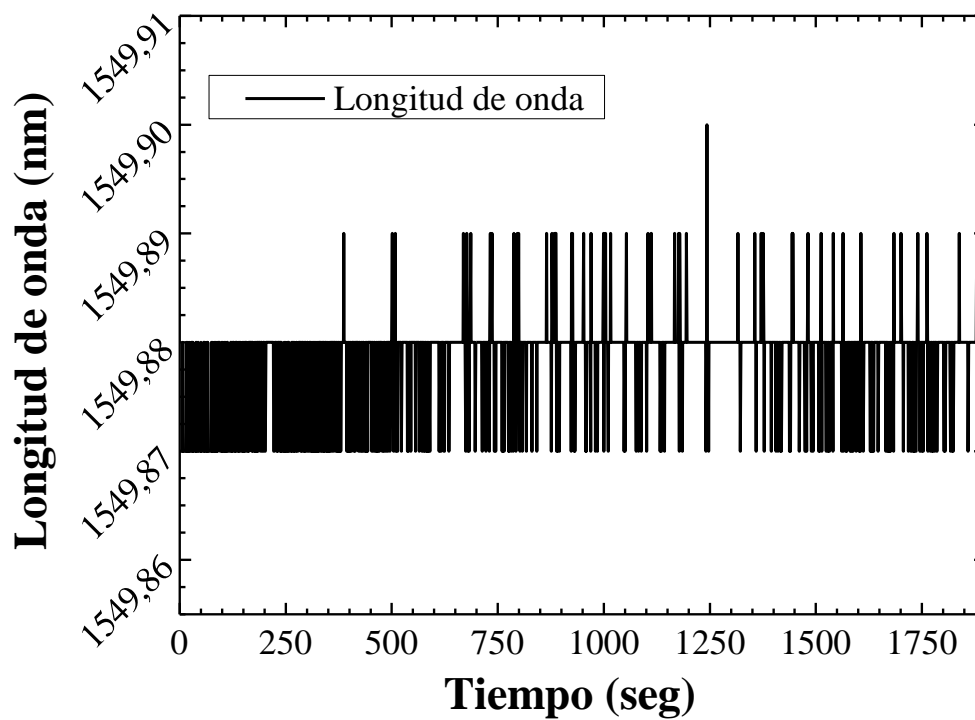


Figura 6-10 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro rechazo banda.

En la Figura 6-9, se observa una potencia máxima bastante uniforme que oscila alrededor de -9,8 dBm con algún pico de potencia hacia debajo de -11 dBm aproximadamente de manera excepcional.

En la Figura 6-10, observamos que los máximos de longitud de onda se encuentran alrededor de 1549,88 nm que oscilan entre 0,01 nm tanto hacia arriba como hacia abajo, de la misma manera que ocurría con el filtro paso banda anterior.

Una vez agrupados los datos, los promedios estadísticos que arrojan son de una media de -9,7655 dBm y una desviación típica de 0,1881 dBm en cuanto a potencia. En cuanto a longitud de onda son de una media de 1549,9 nm con una desviación típica de 0,045 nm.

### *Filtro FBG en transmisión configurado manualmente con WaveSketch.*

En primer lugar, aplicaremos un filtro con la forma de un FBG en transmisión que configuraremos manualmente con el software *WaveSketch*. La idea era poder tener un filtro flexible en el que poder cambiar el ancho de filtro a nuestro gusto y tener también la posibilidad de tener una anchura espectral distinta entre el punto de más atenuación y los de atenuación 0 dB, a diferencia del filtro rechazo banda, que nos obligaba a tener la misma anchura espectral entre los puntos de atenuación 0 dB y el punto de atenuación máximo. Con esto conseguiremos determinar en qué punto tiene más estabilidad el láser y luego estudiarla.

La forma del filtro es como la del Notch que hemos observado en la Figura 6-7. La única diferencia es que hemos configurado la anchura del filtro manualmente. Los puntos que hemos colocado en 0 dB de atenuación, están situados en 1550,60 nm y 1550,75 nm. El punto situado en 30 dB de atenuación está situado en 1550,66 nm. La aplicación de dicho filtro se observa en la siguiente figura.

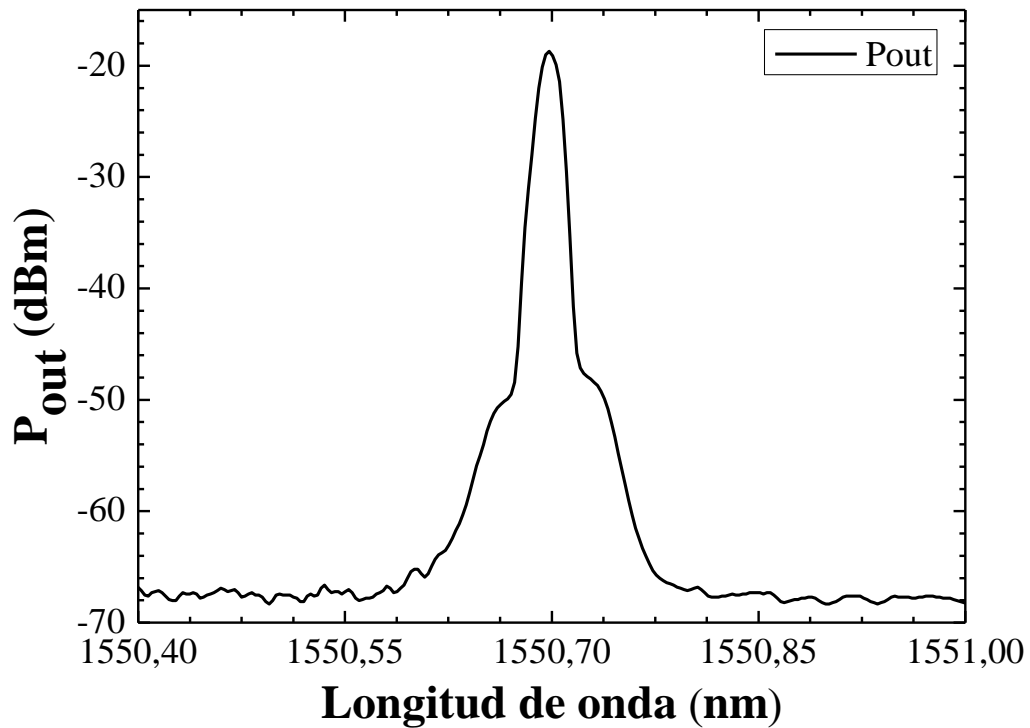


Figura 6-11 Espectro en reflexión del PS-FBG cuando se le aplica un filtro generado manualmente.

Para estudiar la estabilidad que nos ofrece este láser y garantizar así el buen funcionamiento, se van a agrupar los máximos picos de potencia y en qué longitud de onda se encuentran centrados. Para esto volvemos a aplicar el mismo programa en *Matlab* que obtenga cada segundo una traza del OSA para el espectro que podemos ver en la Figura 6-11 para ver el comportamiento del láser a lo largo del tiempo.

En esta ocasión, vamos a captar 2500 trazas del analizador de espectros ópticos. Después procederemos al estudio de los máximos de potencia y en qué longitud de onda quedan centrados.

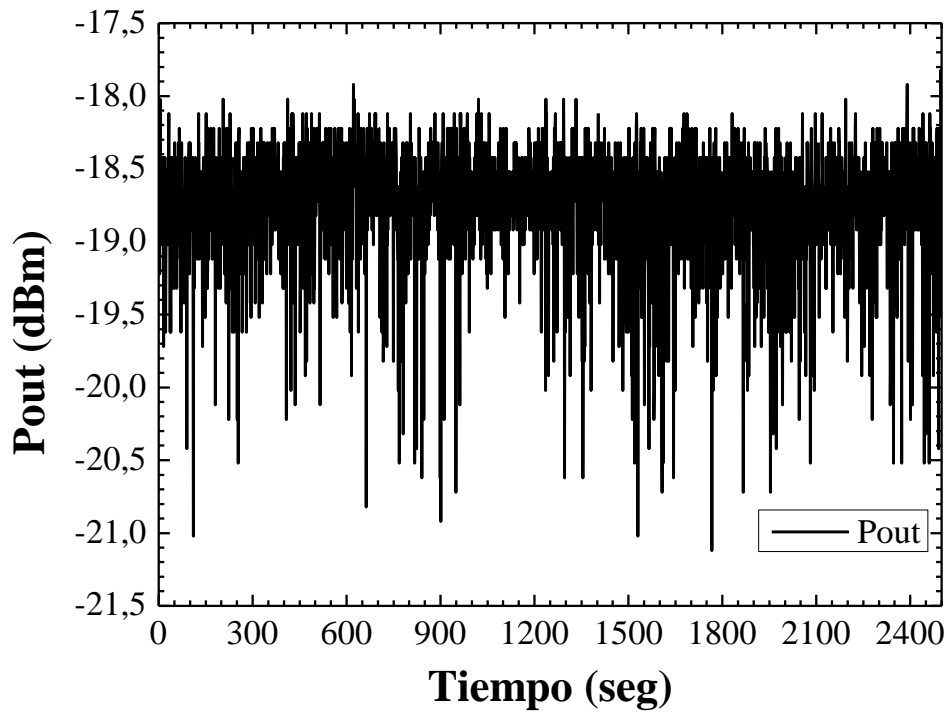


Figura 6-12 Máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro configurado manualmente.

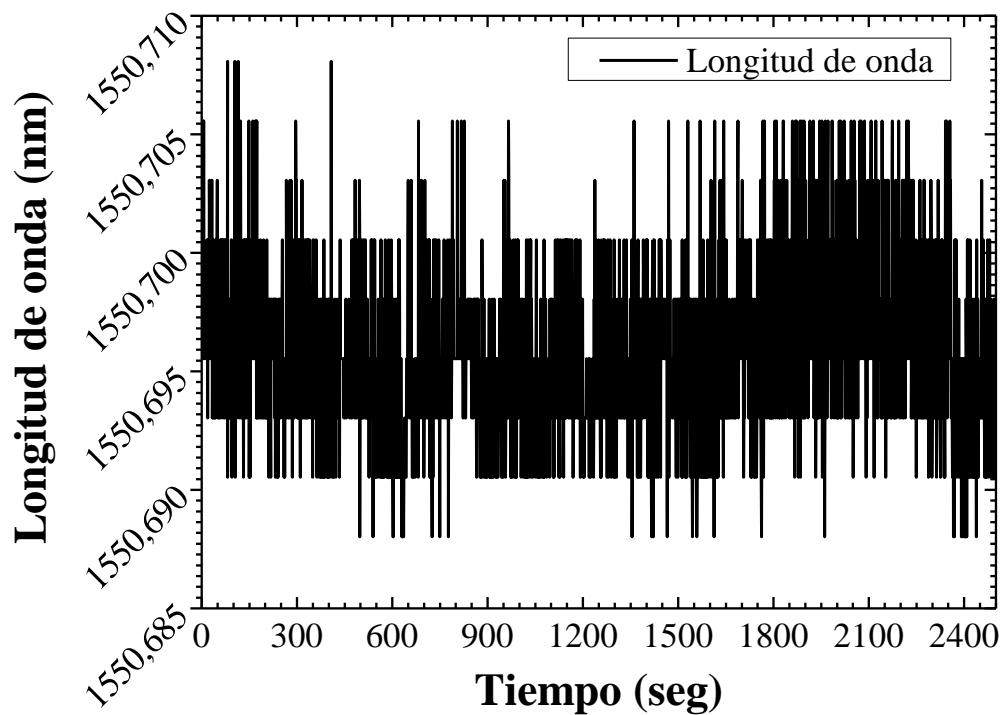


Figura 6-13 Longitud de onda en nm donde se encuentran los máximos picos de potencia captados por el OSA a lo largo del tiempo con la aplicación un filtro configurado manualmente.

En la Figura 6-12, se observa una potencia máxima que oscila alrededor de -18,6 dBm con bastantes picos de potencia hacia abajo de hasta -21 dBm aproximadamente por lo que no podemos asegurar que se trate de una gran estabilidad.

Sin embargo, en la Figura 6-13, observamos que los máximos de longitud de onda se encuentran alrededor de 1550,695 nm aproximadamente que oscilan entre 0,01 nm tanto hacia arriba como hacia abajo, de la misma manera que ocurría con los otros dos filtros anteriores.

En cuanto a los promediados estadísticos, refiriéndonos a la potencia, tenemos una media de -18,7562 dBm con una desviación típica de 0,4425 dBm. En cuanto a la longitud de onda, obtenemos una media de  $1,550696 \times 10^3$  nm con una desviación típica de 0,0037 nm.

A la vista de los resultados experimentales obtenidos, el mejor láser, en términos de estabilidad, es el resultante de aplicar un filtro sintonizable del tipo paso banda.

## 6.2 Mediciones de líquidos con diferentes índices de refracción con dos puntas de fibra óptica actuando como sensores.

En vista de los resultados obtenidos en el apartado anterior no podemos asegurar que ningún láser cumpla con la estabilidad necesaria para llevar a cabo unas medidas en las que obtengamos unos resultados fiables.

Por tanto, en lugar de escoger uno filtro de los anteriores, vamos a conectar el power meter en lugar del OSA y vamos a ir moviendo arbitrariamente los puntos que forman el filtro del programa WaveSketch alrededor de las longitudes de onda en las que se refleja la potencia del PS-FBG. Así pues, nos quedaremos con el filtro que nos proporcione mayor estabilidad en la potencia medida en el power meter.

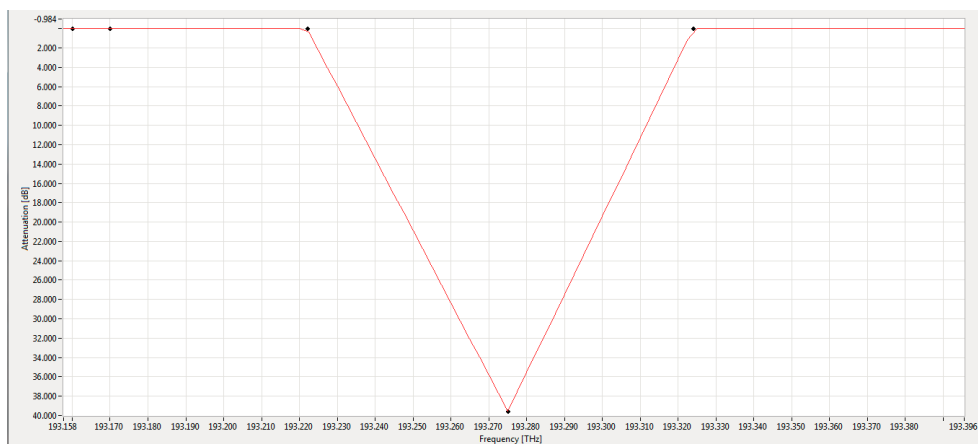


Figura 6-14 Captura del programa WaveSketch en el que se observa la forma del filtro aplicado al espectro del PS-FBG no comercial.

Los puntos del filtro de atenuación 0 dB están situados en 193,222 THz (1551,54 nm) y 193,324 THz (1550,73 nm). El punto de atenuación 30 dB se encuentra en 193,275 THz (1551,11 nm).

Una vez establecido el filtro que nos puede aportar mayor estabilidad, se realizaron unas mediciones similares a las del capítulo anterior, con la diferencia de que este nuevo sistema nos permite tener acceso a uno de los extremos del PS-FBG y, por tanto, tener dos puntas de fibra que actúen como sensores de variación de índices de refracción siguiendo con el mismo marco teórico explicado en el Capítulo 5 -Implementación y caracterización de la cavidad en anillo como sensor de índices de refracción.

Para la realización de este experimento, vamos a utilizar líquidos con diferentes índices de refracción. Usaremos agua ultrapura ( $n = 1,333$ ), alcohol del botiquín de primeros auxilios que hay en el laboratorio fotónica Terlab ( $n = 1,361$ ) y alcohol isopropílico ( $n = 1,3772$ ).

El experimento va a consistir en introducir la punta de fibra del extremo del PS-FBG de 1550 nm en un líquido, mientras la otra punta de fibra desnuda que usaremos como sensor se va introduciendo en todos los líquidos. Así, veremos cómo afecta a la potencia



medida por el *power meter* el hecho de que la punta del PS-FBG esté sumergida en un líquido o en otro.

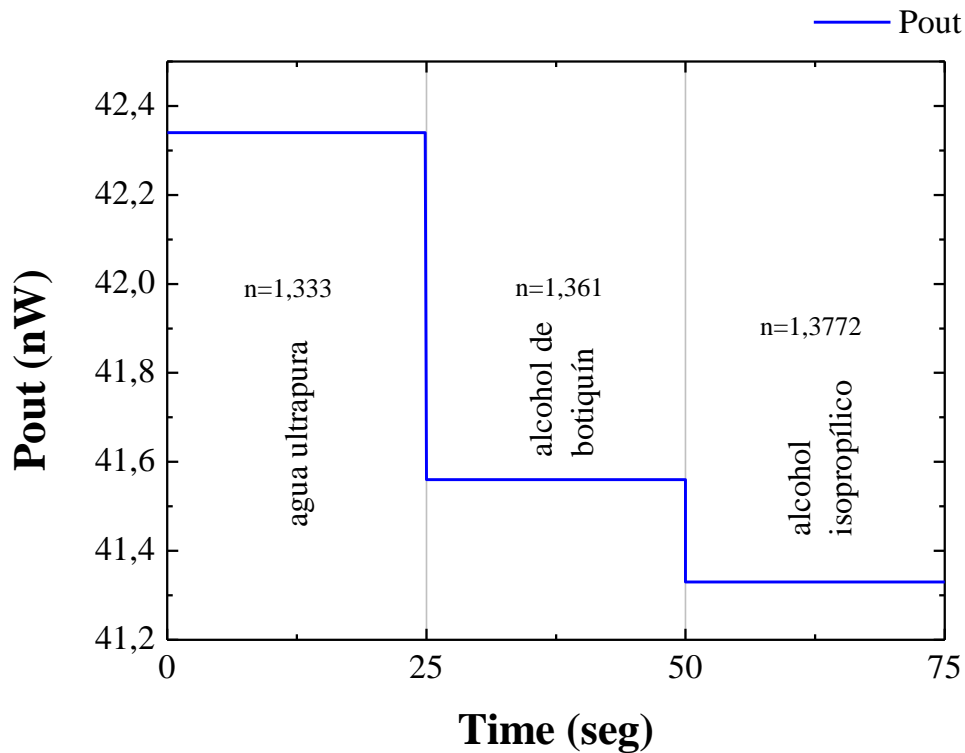


Figura 6-15 Potencia en nW medidas por el *power meter* cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está al aire.

En la Figura 6-15, se observan las potencias medidas en el *power meter* a lo largo del tiempo cuando introducimos la punta de fibra que actúa como sensor en los distintos líquidos de este experimento cuando el extremo del PS-FBG está al aire. Observamos que a medida que aumenta el índice de refracción de los líquidos, la potencia medida se reduce.

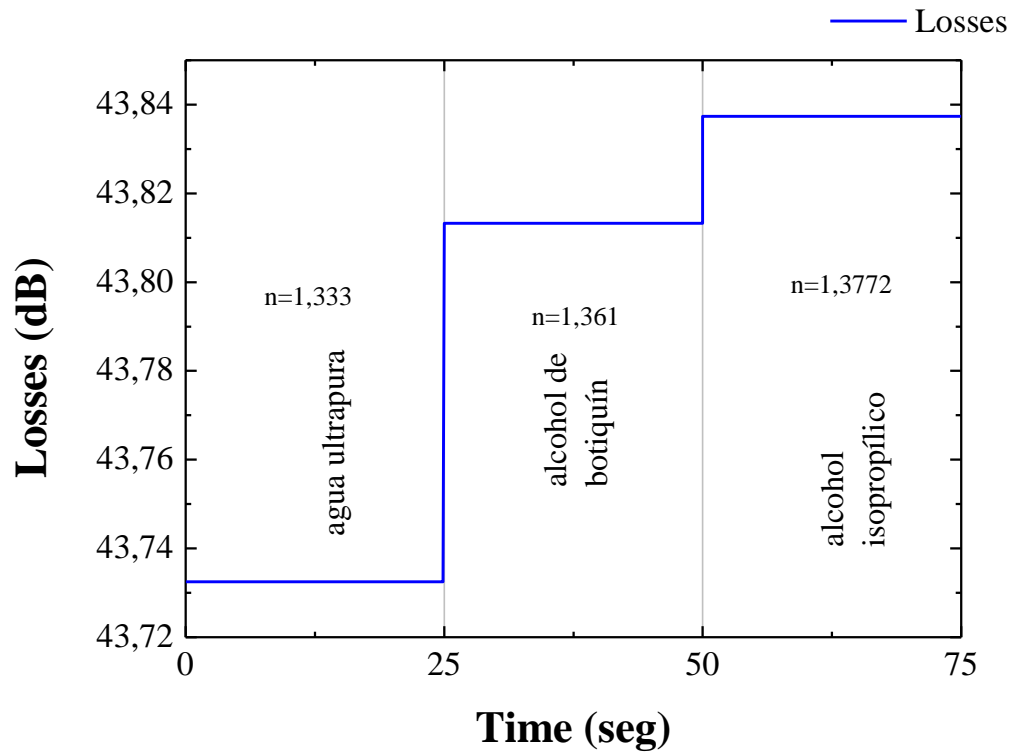


Figura 6-16 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está al aire.

En la Figura 6-16, se observan las pérdidas en dBm que sufre la potencia medida conforme aumenta el índice de refracción cuando sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor en los diferentes líquidos y el extremo del PS-FBG está en contacto con el aire.

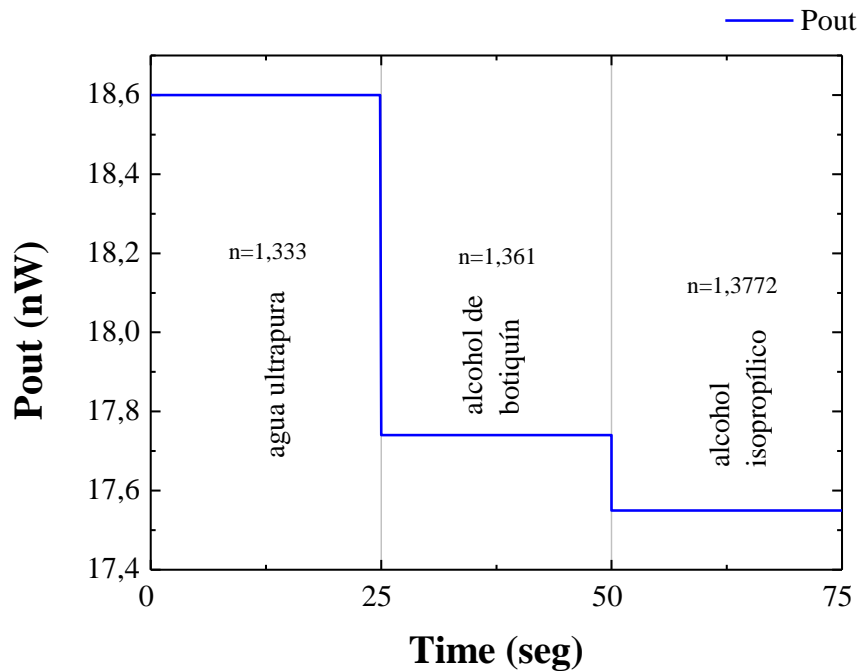


Figura 6-17 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en alcohol de botiquín.

En la Figura 6-17, podemos apreciar como igual que en la Figura 6-15, la potencia medida se reduce en cuanto aumenta el índice de refracción en el que sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor. Sin embargo, al haber sumergido la punta del PS-FBG en un líquido y no en el aire, vemos como se reduce significativamente la potencia medida (25 nW de diferencia aproximadamente). Así pues, esto prueba que la punta de PS-FBG también puede actuar como sensor debido a que también refleja los cambios en el índice de variación con respecto del aire.

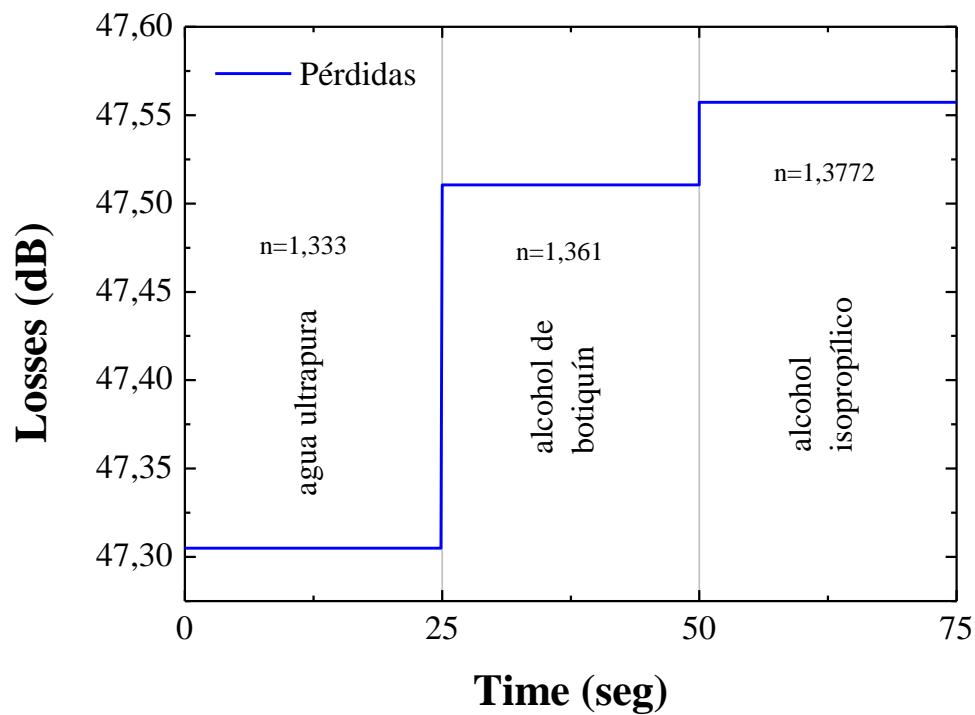


Figura 6-18 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en alcohol de botiquín.

En la Figura 6-18, se observan las pérdidas en dBm que sufre la potencia medida conforme aumenta el índice de refracción cuando sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor en los diferentes líquidos y el extremo del PS-FBG En alcohol de botiquín.

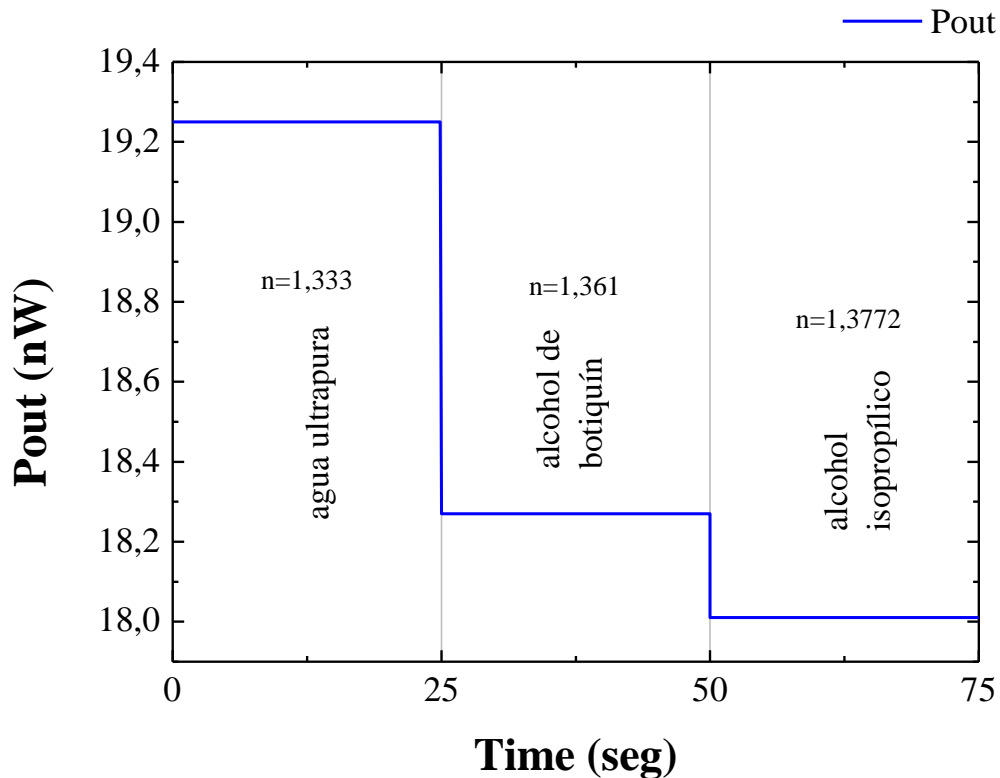


Figura 6-19 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en agua ultrapura.

En la Figura 6-19, podemos apreciar como la potencia medida se reduce en cuanto aumenta el índice de refracción en el que sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor. Además, al haber sumergido la punta del PS-FBG en un agua ultrapura (que tiene menor índice de refracción que el alcohol de botiquín), vemos como aumenta ligeramente la potencia medida con respecto a la Figura 6-17.

Esto, vuelve a demostrar que la punta del PS-FBG también puede actuar como sensor debido a que también refleja los cambios en el índice de variación debido a que, a menor índice de refracción en el extremo del mismo, más potencia refleja.

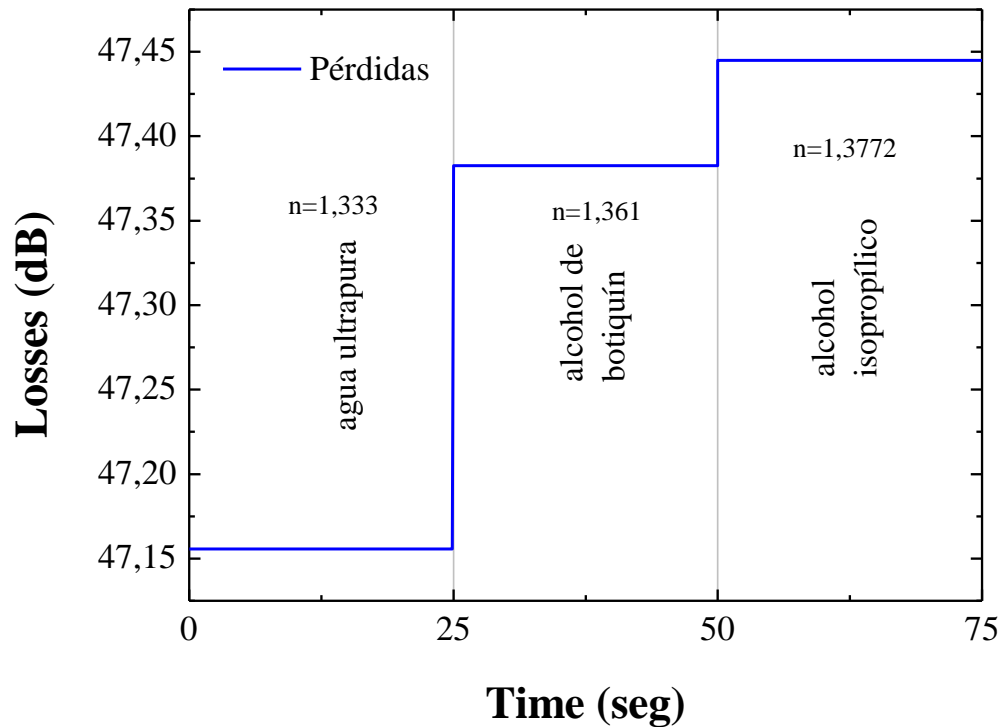


Figura 6-20 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en agua ultrapura.

En la Figura 6-20, se observan las pérdidas en dBm que sufre la potencia medida conforme aumenta el índice de refracción cuando sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor en los diferentes líquidos y el extremo del PS-FBG en agua ultrapura.

De la misma manera, vamos que las pérdidas obtenidas son menores que las de la Figura 6-18 debido a la sumersión de del extremo del PS-FBG en un líquido de menor índice de refracción.

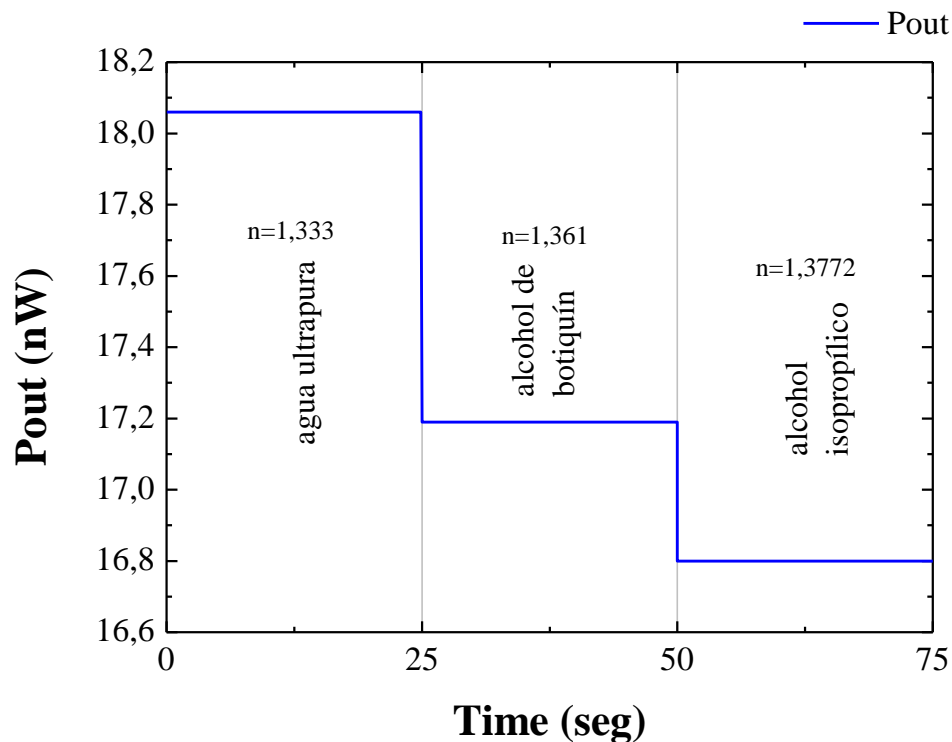


Figura 6-21 Potencia en nW medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en alcohol isopropílico.

En la Figura 6-21, podemos apreciar como la potencia medida se reduce en cuanto aumenta el índice de refracción en el que sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor. Además, al haber sumergido la punta del PS-FBG en un alcohol isopropílico (que tiene mayor índice de refracción que el agua ultrapura), vemos como disminuye ligeramente la potencia medida con respecto a la Figura 6-19.

Esto, vuelve a demostrar que la punta del PS-FBG también puede actuar como sensor debido a que también refleja los cambios en el índice de variación debido a que, a mayor índice de refracción en el extremo del mismo, menos potencia refleja.

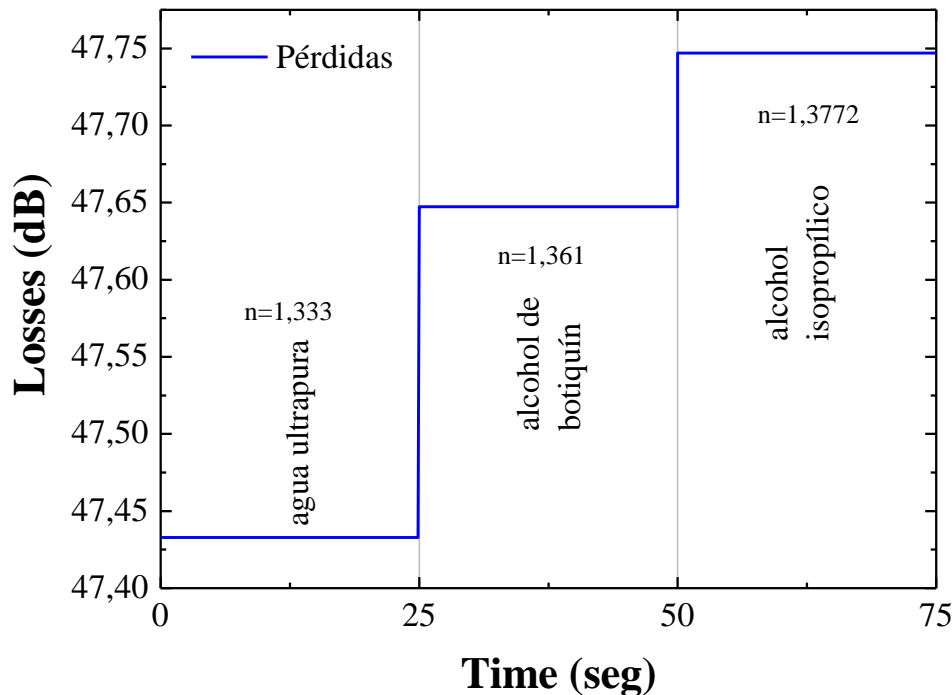


Figura 6-22 Pérdidas en dBm medidas por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol de botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergido en alcohol isopropílico.

En la Figura 6-22, se observan las pérdidas en dBm que sufre la potencia medida conforme aumenta el índice de refracción cuando sumergimos la punta de fibra que actúa como sensor en los diferentes líquidos y el extremo del PS-FBG en alcohol isopropílico.

De la misma manera, vemos que las pérdidas obtenidas son mayores que las de la Figura 6-20, debido a la sumersión de del extremo del PS-FBG en un líquido de mayor índice de refracción.

Por tanto, podemos confirmar con todos los datos recogidos, que el sistema funciona correctamente como sensor, tanto con una punta de fibra utilizada como sensor como con dos puntas. Hemos visto que, independientemente del líquido en el que sumerjamos el extremo del PS-FBG, la potencia medida por el *power meter* se reduce con el aumento del índice de refracción. Y también hemos corroborado que sumergiendo el extremo del PS-FBG en diferentes líquidos, la potencia medida por el *power meter* en las distintas mediciones también disminuye si aumenta el índice de refracción tal y como se observa en la Figura 6-23.



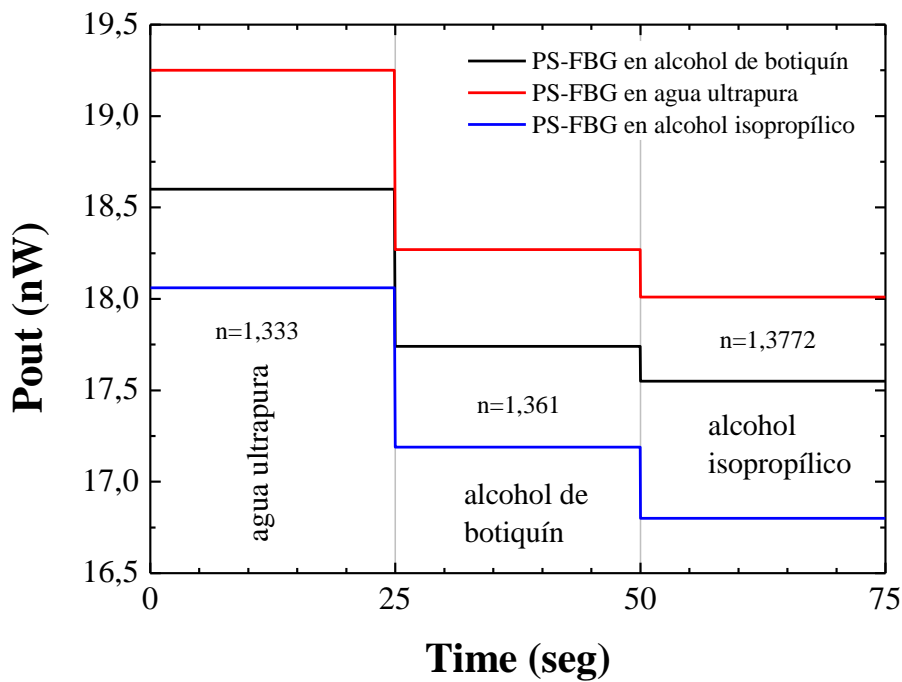
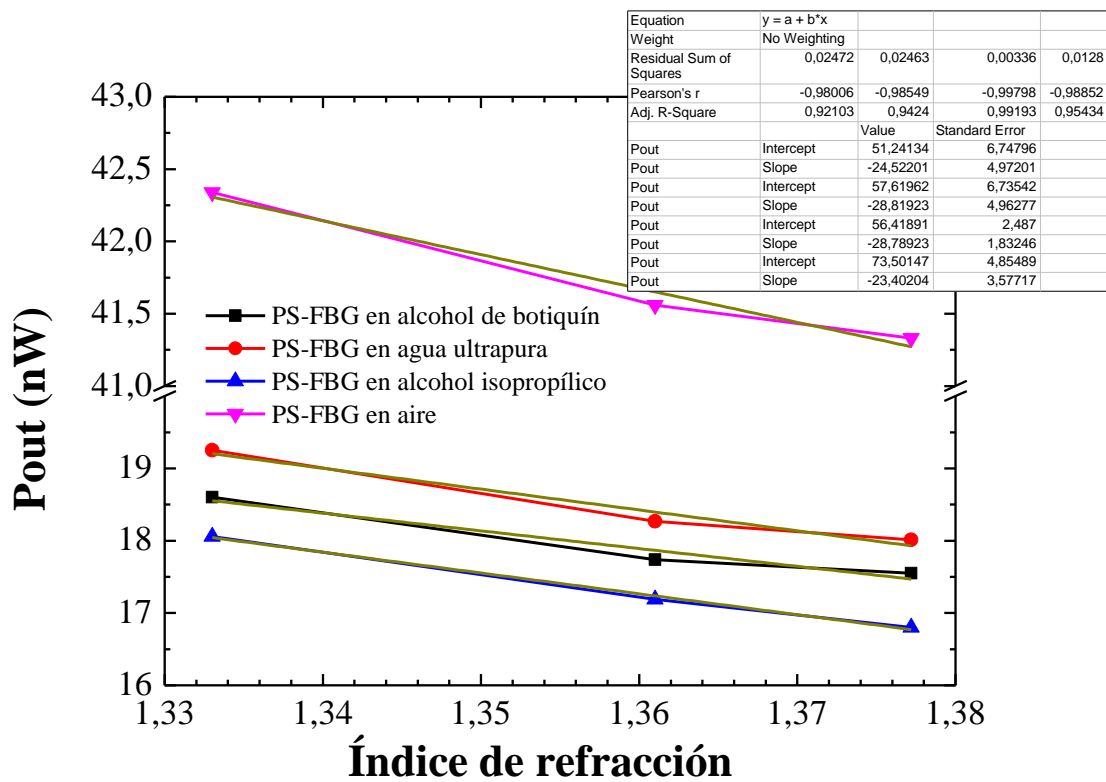


Figura 6-23 Potencia en nW medida por el power meter cuando la punta de la fibra óptica que actúa como sensor es sumergida en agua ultrapura, alcohol botiquín y alcohol isopropílico cuando el extremo del PS-FBG está sumergida en los tres líquidos.



Equation	y = a + b*x			
Weight	No Weighting			
Residual Sum of Squares	0,02472	0,02463	0,00336	0,0128
Pearson's r	-0,98006	-0,98549	-0,99798	-0,98852
Adj. R-Square	0,92103	0,9424	0,99193	0,95434
		Value	Standard Error	
Pout	Intercept	51,24134	6,74796	
Pout	Slope	-24,52201	4,97201	
Pout	Intercept	57,61962	6,73542	
Pout	Slope	-28,81923	4,96277	
Pout	Intercept	56,41891	2,487	
Pout	Slope	-28,78923	1,83246	
Pout	Intercept	73,50147	4,85489	
Pout	Slope	-23,40204	3,57717	

Figura 6-24 Potencias en nW medidas por el power meter cuando sumergimos las dos puntas que actúan como sensores en los distintos líquidos respecto al índice de refracción. Se muestra además la aproximación lineal en color verde de los resultados obtenidos.

En la Figura 6-24, hemos decidido representar las potencias obtenidas en las gráficas representadas anteriormente frente a los índices de refracción de todos los líquidos utilizados, con el fin de observar cuanto de lineal son las rectas obtenidas y obtener sus pendientes con una recta de aproximación lineal.

Punta del PS-FBG	Pendiente
Aire	$-23,4 \pm 3,58$ nW/RIU
Agua ultrapura	$-28,82 \pm 4,96$ nW/RIU
Alcohol de botiquín	$-24,52 \pm 4,97$ nW/RIU
Alcohol isopropílico	$-28,79 \pm 1,83$ nW/RIU

*Tabla 6-1 Resumen de las pendientes y sus errores de las rectas que unen las potencias de las distintas potencias medidas en este capítulo.*

En resumen, en este capítulo se ha optimizado el sistema añadiendo un WaveShaper para realizar un filtro ajustado manualmente para mejorar la estabilidad del láser, y además gracias al PS-FBG no comercial escogido, se han realizado medidas con dos puntas de fibra usadas como sensor.

Hemos obtenido, por tanto, unos resultados que arrojan los resultados obtenidos en la Tabla 6-1. Vemos que la recta que más pendiente tiene es la del agua ultrapura, sin embargo, posee el mayor error asociado a su pendiente. Pero también obtenemos una recta con pendiente similar y un error mínimo que es la del alcohol isopropílico.

En conclusión, la herramienta utilizada (WaveShaper) para este capítulo, no ha conseguido mejorar considerablemente los resultados obtenidos en capítulos anteriores. Por tanto, no es recomendable su uso porque la mejora que obtenemos no es rentable si comparamos con el elevadísimo precio del WaveShaper. Nosotros hemos podido hacer uso del mismo debido a que ya contábamos con su disponibilidad en el laboratorio fotónica Teralab.

## Capítulo 7 - Conclusiones.

En este proyecto de fin de grado se ha desarrollado una estructura capaz de detectar variaciones de índices de refracción basado en un láser de fibra óptica con una topología en anillo. Para ello se ha empleado el material disponible en el laboratorio de fotónica Teralab. Dicho desarrollo, plantea la importancia que yace en monitorizar la calidad tanto del agua como de diferentes líquidos para su saneamiento haciendo uso de un sistema a bajo coste y sencillo para la detección de variaciones en el índice de refracción. Por ello, con este sistema, estamos capacitados para medir la calidad de diversos líquidos.

En primer lugar, se ha diseñado y fabricado un láser en cavidad en anillo. Hemos caracterizado el espectro del láser y una vez obtenido el espectro que buscábamos, hemos colocado una fibra SMF, cuya punta, ha actuado como sensor. Después, se han realizado unas medidas para determinar la sensibilidad del sistema. La sensibilidad del sistema se mide obteniendo la pendiente de la recta que une las potencias medidas al sumergir la punta que actúa como sensor en los diferentes líquidos, con respecto al índice de refracción dichos líquidos.

Posteriormente, hemos realizado modificaciones sobre el sistema planteado inicialmente, en busca de una optimización de esa sensibilidad. Para lograrlo, se han cambiado el orden de los FBG y PS-FBG, se ha excluido del montaje el PS-FBG y se ha implementado el dispositivo WaveShaper para hacer un filtrado del espectro y se ha incluido un PS-FBG no comercial para optimizar la manera de realizar las mediciones de las variaciones de índice de refracción, haciendo uso de dos puntas de fibra óptica que actúen como sensor.

Con todos los sistemas planteados, se han realizado medidas, en mayor o en menor medida, con los mismos líquidos. Cada uno de ellos arrojaba unos resultados con una sensibilidad distinta. La sensibilidad obtenida por cada uno de los sistemas se ven reflejados en la Tabla 5-1 y la Tabla 6-1.

En vista de los resultados obtenidos y teniendo en cuenta las mejores sensibilidades obtenidas para cada modificación, se observa que la mejor sensibilidad haciendo uso del montaje planteado inicialmente es  $-380,26 \pm 1,97 \mu\text{w}/\text{RIU}$ . Intercambiando el orden de FBG y PS-FBG, obtenemos una sensibilidad de  $-270,58 \pm 3,27 \mu\text{w}/\text{RIU}$ . Excluyendo el PS-FBG de la cavidad en anillo, se obtiene una sensibilidad de  $-42,83 \pm 2,25 \mu\text{w}/\text{RIU}$ . Para las medidas realizadas con la implementación del WaveShaper, obtenemos unas sensibilidades muy parecidas, siendo la mayor de ellas sumergiendo la punta del PS-FBG en alcohol isopropílico que nos da el resultado de  $-28,79 \pm 1,83 \text{ nW}/\text{RIU}$ .

El sistema que mejor sensibilidad tiene es, con gran diferencia el del montaje planteado inicialmente en la Figura 3-1, con una sensibilidad de  $-380,26 \pm 1,97 \mu\text{w}/\text{RIU}$ . También observamos, que no merece la pena la implementación de una herramienta de tan alto

coste como es el WaveShaper, porque no obtenemos una mejora de los resultados obtenidos.

Una vez realizados todos los experimentos del proyecto, hemos podido constatar todas las ventajas que sugeríamos al principio de este proyecto. Pero, sobre todo, nos hemos dado cuenta de que la mayor ventaja del uso de estos sensores con respecto a la mayoría con los que contamos en el mercado, es el uso de una punta de fibra óptica que actúe como sensor. En la mayoría de sensores que encontramos en el mercado, al introducirlo en líquidos para medir variaciones en el índice de refracción hay que reemplazarlo por otro nuevo una vez realizadas las medidas. Sin embargo, el sensor de fibra óptica sumergimos la punta en el líquido, y para realizar una nueva medición, tan solo tenemos que cortar la punta de la fibra óptica transversalmente con una cortadora de fibra y ya podemos realizar nuevamente una medición. Por eso es tan importante destacar la el bajo coste de este sistema ya que no es necesario cambiar de sensor cada que vez que realizas una nueva medición.

Para concluir, y de cara a futuras investigaciones y desarrollo de este proyecto, sería muy importante contar con un refractómetro, el cual adquirimos al inicio de este proyecto pero que aún no se ha recibido, para saber exactamente qué índices de refracción tienen los líquidos en los que vamos a realizar nuestras mediciones. Esto sirve para saber si el sistema funciona correctamente o no.

Pensamos también que la noche, sería el mejor momento para realizar estos experimentos que utilizan FBG y PS-FBG ya que son dispositivos muy sensibles a la temperatura, y por la noche la temperatura del laboratorio se mantiene más estable que a lo largo del día. Para los FBG y PS-FBG, también sería interesante que se hiciera uso de unos FBG y PS-FBG de longitud de onda variable, para así poder hacer coincidir la longitud de onda central a la que trabajan manualmente.

## Capítulo 8 - Bibliografía.

- [1] «ALMAGRA: Metas y objetivos de la Agenda 2030: ODS6 Agua limpia y saneamiento», *ALMAGRA*, 17 de marzo de 2019.  
[http://almagraculturaynaturaleza.blogspot.com/2019/03/metas-y-objetivos-de-la-agenda-2030\\_5.html](http://almagraculturaynaturaleza.blogspot.com/2019/03/metas-y-objetivos-de-la-agenda-2030_5.html) (accedido 30 de mayo de 2023).
- [2] «ODS06.JPG (1600×605)». [https://3.bp.blogspot.com/-xd5DXGZhUyA/XI8p2DZL6dl/AAAAAAAAAM0/owS0vvpSZMIu\\_ZdOxUmSbl7SoqqKjDIOgClcBGAs/s1600/ODS06.JPG](https://3.bp.blogspot.com/-xd5DXGZhUyA/XI8p2DZL6dl/AAAAAAAAAM0/owS0vvpSZMIu_ZdOxUmSbl7SoqqKjDIOgClcBGAs/s1600/ODS06.JPG) (accedido 30 de mayo de 2023).
- [3] «6\_Spanish\_Why\_it\_Matters.pdf». Accedido: 30 de mayo de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6\\_Spanish\\_Why\\_it\\_Matters.pdf](https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/6_Spanish_Why_it_Matters.pdf)
- [4] «ODS6.jpg (1280×720)». <https://www.elagoradiario.com/wp-content/uploads/2020/11/ODS6.jpg> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [5] H. Yang, Y. Li, y X. Li, «Intensity-modulated refractive index sensor based on the side modes of fiber Bragg grating», *Opt. Commun.*, vol. 505, p. 127319, feb. 2022, doi: 10.1016/j.optcom.2021.127319.
- [6] N. Jing, C. Teng, J. Zheng, P. Wang, y G. Farrell, «Refractive Index Sensing with a Macro-bending Structure of the Multimode Micro Plastic Optical Fiber», en *Asia Communications and Photonics Conference 2013 (2013)*, paper AF2D.33, Optica Publishing Group, nov. 2013, p. AF2D.33. doi: 10.1364/ACPC.2013.AF2D.33.
- [7] A. Miliou, «In-Fiber Interferometric-Based Sensors: Overview and Recent Advances», *Photonics*, vol. 8, n.º 7, Art. n.º 7, jul. 2021, doi: 10.3390/photonics8070265.
- [8] Y. Zhang, C. Liao, C. Lin, Y. Shao, Y. Wang, y Y. Wang, «Surface plasmon resonance refractive index sensor based on fiber-interface waveguide inscribed by femtosecond laser», *Opt. Lett.*, vol. 44, n.º 10, pp. 2434-2437, may 2019, doi: 10.1364/OL.44.002434.
- [9] H. Meng, W. Shen, G. Zhang, C. Tan, y X. Huang, «Fiber Bragg grating-based fiber sensor for simultaneous measurement of refractive index and temperature», *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 150, n.º 1, pp. 226-229, sep. 2010, doi: 10.1016/j.snb.2010.07.010.
- [10] M. Shaimerdenova, T. Ayupova, M. Sytabekova, y D. Tosi, «Fiber Optic Refractive Index Sensors Based on a Ball Resonator and Optical Backscatter Interrogation», *Sensors*, vol. 20, n.º 21, Art. n.º 21, ene. 2020, doi: 10.3390/s20216199.

- [11] A. J. G. Fernandes, C. Jesus, P. A. S. Jorge, y J. M. Baptista, «Fiber optic intensity sensor referenced with a virtual delay line», *Opt. Commun.*, vol. 284, n.º 24, pp. 5665-5668, dic. 2011, doi: 10.1016/j.optcom.2011.08.049.
- [12] C. Elosua *et al.*, «An amplified coarse wavelength division multiplexing self-referencing sensor network based on phase-shifted FBGs in transmissive configuration», *Meas. Sci. Technol.*, vol. 20, n.º 3, p. 034017, feb. 2009, doi: 10.1088/0957-0233/20/3/034017.
- [13] R. A. Perez-Herrera, L. Soares, S. Silva, y O. Frazão, «Ring Cavity Erbium-Doped Fiber for Refractive Index Measurements», *Sensors*, vol. 22, n.º 23, p. 9315, nov. 2022, doi: 10.3390/s22239315.
- [14] «Monitoring the concentration of flowing pharmaceutical powders in a tableting feed frame: Pharmaceutical Development and Technology: Vol 22, No 6». <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3109/10837450.2015.1102278> (accedido 30 de mayo de 2023).
- [15] J. Harting y P. Kleinebudde, «Optimisation of an in-line Raman spectroscopic method for continuous API quantification during twin-screw wet granulation and its application for process characterisation», *Eur. J. Pharm. Biopharm.*, vol. 137, pp. 77-85, abr. 2019, doi: 10.1016/j.ejpb.2019.02.015.
- [16] Y. Gao *et al.*, «Application of PAT-Based Feedback Control Approaches in Pharmaceutical Crystallization», *Crystals*, vol. 11, n.º 3, Art. n.º 3, mar. 2021, doi: 10.3390/cryst11030221.
- [17] E. J. Kim, J. H. Kim, M.-S. Kim, S. H. Jeong, y D. H. Choi, «Process Analytical Technology Tools for Monitoring Pharmaceutical Unit Operations: A Control Strategy for Continuous Process Verification», *Pharmaceutics*, vol. 13, n.º 6, Art. n.º 6, jun. 2021, doi: 10.3390/pharmaceutics13060919.
- [18] J. Wiss, «Process Analytical Technology: tools and applications in pharmaceutical manufacturing», *Chim. Oggi*, vol. 33, pp. 30-33, mar. 2015.
- [19] F. Zhang, K. Du, L. Guo, Y. Huo, K. He, y B. Shan, «Progress, problems, and potential of technology for measuring solution concentration in crystallization processes», *Measurement*, vol. 187, p. 110328, ene. 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110328.
- [20] Levente, L.S.; Simone, E.; Oucherif, K.A.A., «Crystallization process monitoring and control using process analytical technology. In Process Systems Engineering for Pharmaceutical Manufacturing», vol. 41, pp. 215-242, 2018.
- [21] L. Soares, R. A. Pérez-Herrera, S. Novais, A. Ferreira, S. Silva, y O. Frazão, «Measurement of Paracetamol Concentration Using an Erbium-Doped Fiber Ring Cavity», *Photonics*, vol. 10, n.º 1, p. 50, ene. 2023, doi: 10.3390/photonics10010050.

- [22] «componentes-de-fibra-optica-1627376621-UEL6e0NC7K.png (400×154)». <https://media.fs.com/images/community/upload/kindEditor/202107/27/componentes-de-fibra-optica-1627376621-UEL6e0NC7K.png> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [23] «fibra368.png (620×368)». <https://www.seas.es/blog/wp-content/uploads/2012/11/fibra368.png> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [24] «Comparacion-fibras.png (550×300)». <https://www.instantbyte.com/blog/wp-content/uploads/2020/07/Comparacion-fibras.png> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [25] J. P. Martínez, «Desarrollo experimental de sensores de fibra óptica basados en microcavidades.».
- [26] «5e58e4b52a903588189408.png (585×319)». <https://www.casadasciencias.org/storage/app/uploads/public/5e5/8e4/b52/5e58e4b52a903588189408.png?contador=1> (accedido 2 de mayo de 2023).
- [27] R. A. Pérez Herrera y M. López-Amo, «Descripción y aplicaciones: Láseres de fibra óptica.,» Mundo Electrónico.
- [28] «Fig. 2. The configuration of the tunable erbium-doped fiber ring laser.», *ResearchGate*. [https://www.researchgate.net/figure/The-configuration-of-the-tunable-erbium-doped-fiber-ring-laser\\_fig2\\_258420561](https://www.researchgate.net/figure/The-configuration-of-the-tunable-erbium-doped-fiber-ring-laser_fig2_258420561) (accedido 2 de mayo de 2023).
- [29] «original-FBG\_0.png (383×235)». [https://tml.jp/sites/default/files/inline-images/original-FBG\\_0.png](https://tml.jp/sites/default/files/inline-images/original-FBG_0.png) (accedido 2 de mayo de 2023).
- [30] «wavelengthdivisionmultiplexing.png (604×246)». <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/wp-content/uploads/2018/11/wavelengthdivisionmultiplexing.png> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [31] «What Is Fiber Optic Coupler and How Does It Work? | FS Community», *Knowledge*, 13 de noviembre de 2014. <https://community.fs.com:7003/blog/how-do-different-fiber-optic-couplers-work.html> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [32] «news-Optical-Circulator Foss AS», *Foss AS*. <https://www.fossfiberoptics.com/news-optical-circulator> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [33] P. Salgado, «Method of calibration for fiber Bragg grating interrogators», *Opt. Pura Apl.*, vol. 45, n.º 3, pp. 361-368, sep. 2012, doi: 10.7149/OPA.45.3.361.
- [34] B. Das, D. Srivastava, U. Tiwari, y B. Choudhary, «Phase-Sensitive Interrogation of  $\pi$ -Phase Shifted FBG Sensor for High-Resolution Dynamic Strain Sensing», nov. 2019.
- [35] «Thorlabs - CLD1015 Compact LD and Temperature Controller with Mount». <https://www.thorlabs.com> (accedido 3 de mayo de 2023).

- [36] «Thorlabs - M12-980-125 Erbium Doped L Band Fiber». <https://www.thorlabs.com> (accedido 3 de mayo de 2023).
- [37] «shopping (600×600)». [https://encrypted-tbn2.gstatic.com/shopping?q=tbn:ANd9GcQUiIsUwmVeibuywUZZPVhH9alzN8OOB\\_7LUaFYhCmv7PEcZdWBm7RioXFBeflOZfvMrNDubopP84SgLZD3uGeuCuC5dkExp\\_OV2DY-4fkpMaihLtk1yKtS&usqp=CAE](https://encrypted-tbn2.gstatic.com/shopping?q=tbn:ANd9GcQUiIsUwmVeibuywUZZPVhH9alzN8OOB_7LUaFYhCmv7PEcZdWBm7RioXFBeflOZfvMrNDubopP84SgLZD3uGeuCuC5dkExp_OV2DY-4fkpMaihLtk1yKtS&usqp=CAE) (accedido 29 de mayo de 2023).
- [38] L. Soares, S. Novais, A. Ferreira, O. Frazão, y S. Silva, «Detection of the Crystallization Process of Paracetamol with a Multi-Mode Optical Fiber in a Reflective Configuration», *Sensors*, vol. 20, n.º 1, p. 87, dic. 2019, doi: 10.3390/s20010087.
- [39] C. Labs, «Refractive Index Liquids – Cargille Labs». <https://www.cargille.com/refractive-index-liquids/> (accedido 6 de mayo de 2023).
- [40] «Discretizing a Notch Filter - MATLAB & Simulink Example - MathWorks España». <https://es.mathworks.com/help/control/ug/discretizing-a-notch-filter.html> (accedido 7 de mayo de 2023).