



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

Evaluación experimental de sensores fotónicos integrados  
basados en estructuras interferométricas bimodales de  
cristal fotónico en nitruro de silicio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Biomédica

AUTOR/A: Sánchez López, Juan Carlos

Tutor/a: García Rupérez, Jaime

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

# RESUMEN

En la actualidad, la nanotecnología es un ámbito que está en constante crecimiento y que puede ser utilizado en una gran cantidad de campos, como por ejemplo, el de la medicina. Dentro del campo médico, una de sus principales aplicaciones es el desarrollo de biosensores, donde la tecnología nanofotónica es una de las que mayor interés despierta para el desarrollo de sistemas de análisis. Estos, a partir del diseño de estructuras que normalmente son dieléctricas y del estudio de los cambios en las propiedades de la luz cuando interactúan con el medio externo, posibilitan la detección de multitud de analitos, como pueden ser ADN o proteínas, con un elevado nivel de sensibilidad, permitiendo usar pequeños volúmenes de muestra.

Durante el desarrollo de este trabajo, analizaremos la estructura y el funcionamiento de un tipo de sensores interferométricos, basados en estructuras periódicas de tipo corrugada bimodal de cristal fotónico en nitruro de silicio. Además, caracterizaremos en aire dos tipos de chips con distintas configuraciones de la estructura periódica con longitudes significativamente diferentes, para ver cada una de ellas qué respuesta interferométrica tiene. Para posteriormente, seleccionar las configuraciones/estructuras de los chips que mejores prestaciones tengan, para poder caracterizarlas en agua y agua más 10% de etanol, y realizar así, su evaluación experimental mediante los experimentos de cambio de medio para los dos tipos de chips, primero mediante el seguimiento espectral y segundo midiendo en potencia a una longitud de onda con el objetivo de demostrar su capacidad de sensado.

**PALABRAS CLAVES:** sensor fotónico, biosensado, nanofotónica, cristales fotónicos, interferometría, guía corrugada.

# ABSTRACT

At present, nanotechnology is a field that is constantly growing and can be used in a large number of fields, such as medicine, for example. Within the medical field, one of its main applications is the development of biosensors, where nanophotonic technology is one of the most interesting for the development of analysis systems. These, based on the design of structures that are normally dielectric and the study of changes in the properties of light when they interact with the external environment, make it possible to detect a multitude of analytes, such as DNA or proteins, with a high level of sensitivity, allowing the use of small sample volumes.

During the development of this work, we will analyze the structure and performance of a type of interferometric sensors, based on periodic structures of bimodal corrugated type of photonic crystal in silicon nitride. In addition, we will characterize in air two types of chips with different configurations of the periodic structure with significantly different lengths, to see what interferometric response each of them has. Subsequently, we will select the best performing chip configurations/structures to characterize them in water and water plus 10% ethanol, and perform their experimental evaluation by means of medium change experiments for the two types of chips, first by spectral tracking and second by measuring power at one wavelength in order to demonstrate their sensing capability.

**KEY WORDS:** photonic sensor, biosensing, nanophotonics, photonic crystals, interferometry, corrugated waveguide.

# RESUM

En l'actualitat, la nanotecnologia és un àmbit que està en constant creixement i que pot ser utilitzat en una gran quantitat de camps, com per exemple, el de la medicina. Dins del camp mèdic, una de les seues principals aplicacions és el desenvolupament de biosensors, on la tecnologia nanofotònica és una de les quals major interès desperta per al desenvolupament de sistemes d'anàlisi. Estos, a partir del disseny d'estructures que normalment són dielèctriques i de l'estudi dels canvis en les propietats de la llum quan interactuen amb el mitjà extern, possibiliten la detecció de multitud d'anàlits, com poden ser ADN o proteïnes, amb un elevat nivell de sensibilitat, permetent usar xicotets volums de mostra.

Durant el desenvolupament d'este treball, analitzarem l'estructura i el funcionament d'una mena de sensors interferomètrics, basats en estructures periòdiques de tipus corrugada bimodal de cristall fotònic en nítrur de silici. A més, caracteritzarem en aire dos tipus de xips amb diferents configuracions de l'estructura periòdica amb longituds significativament diferents, per a veure cadascuna d'elles quina resposta interferomètrica té. Per a posteriorment, seleccionar les configuracions/estructures dels xips que millors prestacions tinguen, per a poder caracteritzar-les en aigua i aigua més 10% d'etanol, i realitzar així, la seua avaluació experimental mitjançant els experiments de canvi de mitjà per als dos tipus de xips, primer mitjançant el seguiment espectral i segon mesurant en potència a una longitud d'ona amb l'objectiu de demostrar la seua capacitat de detecció.

PARAULES CLAU: sensor fotònic, biosensant, nanofotònica, cristalls fotònics, interferometria, guia corrugada.



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero aprovechar la ocasión para agradecer el apoyo incondicional de mis padres y hermano, pues gracias a ellos he podido hacer este Trabajo de Fin de Grado y estar donde estoy. Así como elogiar la gran ayuda ofrecida por mi tutor Jaime García Rupérez, que en todo momento cuando le he necesitado, ha estado ahí para ayudarme. También quiero agradecer la ayuda y apoyo de mis compañeros del NTC, en especial a Ignacio González Llacer quien durante mis meses de entrenamiento con los equipos del laboratorio me enseñó como funcionaban estos.

# Índice general

## I. MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN .....	13
1.1. Presentación del trabajo .....	13
1.2. Motivación.....	14
1.3. Objetivos.....	14
1.4. Metodología.....	14
1.5. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS) .....	15
1.6. Asignaturas relacionadas del grado .....	16
1.7. Estructura del trabajo.....	16
2. MARCO TEÓRICO .....	17
2.1. Tipos de sensores fotónicos .....	17
2.2. Configuración del sensor .....	21
2.2.1. Estructura del sensor.....	21
2.2.2. Fundamentos del sensor .....	23
3. ESTADO DEL ARTE.....	25
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
4.1. Materiales de medida.....	27
4.2. Programas utilizados .....	30
4.2.1. Motic Images Plus .....	30
4.2.2. Setup Tunable Laser .....	31
4.3. Chips utilizados .....	34
4.4. Proceso de medida .....	38
4.4.1. Trayectoria de la luz .....	38
4.4.2. Alineamiento de las fibras .....	38
4.4.3. Caracterización de los sensores .....	38
5. RESULTADOS.....	39
5.1. Chips de corrugadas cortas .....	40
5.2. Chips de corrugadas largas .....	45
5.3. Comparación entre los chips de corrugadas cortas.....	48
5.4. Comparación entre los chips de corrugadas largas.....	52
5.5. Elección de los chips para los experimentos .....	54
5.6. Experimento seguimiento espectral.....	60
5.7. Experimento seguimiento potencia .....	69
6. CONCLUSIONES .....	75

REFERENCIAS .....	77
II. PRESUPUESTO	
1. Introducción al Presupuesto .....	80
2. Costes parciales .....	80
2.1. Cuadro de mano de obra.....	80
2.2. Cuadro de materiales .....	80
2.3. Cuadro de maquinaria.....	81
3. Coste total.....	81

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> ODS 3: Salud y Bienestar y ODS 6: Agua limpia y Saneamiento.....	15
<b>Figura 2.</b> Representación 3D de un interferómetro Mach-Zehnder .....	18
<b>Figura 3.</b> Representación 3D de un sensor bimodal de doble altura .....	18
<b>Figura 4.</b> Representación 3D de un sensor mediante anillo resonante .....	19
<b>Figura 5.</b> Representación 3D de un sensor mediante cristal fotónico en estructura corrugada .....	20
<b>Figura 6.</b> a) Estructura corrugada con 10 elementos. b) Elemento básico de la estructura corrugada .....	21
<b>Figura 7.</b> Espectros tipo de la estructura corrugada .....	22
<b>Figura 8.</b> Representación 3D de la estructura interna de los sensores que se estudiarán durante el trabajo .....	22
<b>Figura 9.</b> Modos de propagación de una fibra óptica .....	23
<b>Figura 10.</b> Ejemplo de bandas de propagación en una estructura periódica .....	23
<b>Figura 11.</b> Distribución de campo de los modos de propagación par e impar en la estructura corrugada .....	24
<b>Figura 12.</b> Fotografías del entorno de trabajo en el laboratorio del NTC .....	27
<b>Figura 13.</b> Representación gráfica de un Lightwave Multimeter 8163B de la empresa Keysight.....	28
<b>Figura 14.</b> Captura de la cámara, donde se ve la superficie del sensor y la fibra óptica .....	28
<b>Figura 15.</b> Fotografía de la estructura del setup, para la caracterización y evaluación experimental de los sensores .....	29
<b>Figura 16.</b> a) Polarizador. b) Soporte de los chips conectado al succionador .....	29
<b>Figura 17.</b> Capturas de las ventanas del programa Motic Images Plus .....	30
<b>Figura 18.</b> Capturas de la ventana “Aligment” del programa Setup Tunable Laser.....	31
<b>Figura 19.</b> Captura de la ventana “Spectrum and Fit” del programa Setup Tunable Laser .....	32
<b>Figura 20.</b> Captura de la ventana “Tracking Fits” del programa Setup Tunable Laser .	32
<b>Figura 21.</b> Captura de la ventana “Experiment Stages” del programa Setup Tunable Laser .....	33
<b>Figura 22.</b> Captura de la ventana “Summary” del programa Setup Tunable Laser.....	33
<b>Figura 23.</b> Captura de la ventana “Experiment” del programa Setup Tunable Laser....	34
<b>Figura 24.</b> Modelo representativo del chip de corrugadas cortas y sus partes .....	35
<b>Figura 25.</b> Modelo representativo del chip de corrugadas largas y sus partes .....	36
<b>Figura 26.</b> Representación de los tres tipos de estructuras corrugadas .....	37
<b>Figura 27.</b> Modelo representativo de la oblea de chips y posición de los chips usados	39
<b>Figura 28.</b> Fotografías de la oblea usada en el laboratorio.....	39
<b>Figura 29.</b> Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 1 de corrugadas cortas .....	40
<b>Figura 30.</b> Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 2 de corrugadas cortas .....	41
<b>Figura 31.</b> Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 3 de corrugadas cortas .....	42
<b>Figura 32.</b> Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 4 de corrugadas cortas .....	43

<b>Figura 33.</b> Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 5 de corrugadas cortas .....	44
<b>Figura 34.</b> Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 1 de corrugadas largas.....	45
<b>Figura 35.</b> Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 2 de corrugadas largas.....	45
<b>Figura 36.</b> Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 3 de corrugadas largas.....	46
<b>Figura 37.</b> Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 6 de corrugadas largas.....	47
<b>Figura 38.</b> Superficie del chip 6 de corrugadas largas visto con microscopio .....	47
<b>Figura 39.</b> Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 7 de corrugadas largas.....	48
<b>Figura 40.</b> Comparación de las salidas del bloque 1 entre los cinco chips de corrugadas cortas.....	49
<b>Figura 41.</b> Comparación de las salidas del bloque 2 entre los cinco chips de corrugadas cortas.....	49
<b>Figura 42.</b> Comparación de las salidas del bloque 3 entre los cinco chips de corrugadas cortas.....	50
<b>Figura 43.</b> Comparación de las salidas del bloque 4 entre los cinco chips de corrugadas cortas.....	51
<b>Figura 44.</b> Comparación de las salidas del bloque 1 entre los cinco chips de corrugadas largas.....	52
<b>Figura 45.</b> Comparación de las salidas del bloque 2 entre los cinco chips de corrugadas largas.....	53
<b>Figura 46.</b> a) Pegatina sobre el chip de corrugadas largas. b) Pieza con metacrilato unida a los tubos para microfluir .....	54
<b>Figura 47.</b> Espectros en agua de las salidas de los cuatro bloques del chip 4 de corrugadas cortas .....	55
<b>Figura 48.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 1 del chip 4.....	56
<b>Figura 49.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 2 del chip 4.....	56
<b>Figura 50.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 3 del chip 4.....	57
<b>Figura 51.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 4 del chip 4.....	57
<b>Figura 52.</b> Espectros en agua de las salidas de los dos bloques del chip 7 de corrugadas largas.....	58
<b>Figura 53.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 1 del chip 7.....	58
<b>Figura 54.</b> Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 2 del chip 7.....	59
<b>Figura 55.</b> Captura de la ventana de la función sensing_tracking_generic_multipeak_multifolder.m .....	61
<b>Figura 56.</b> Espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 1 del chip 4 de corrugadas cortas .....	61

<b>Figura 57.</b> Experimento seguimiento de pico a 1530.1231 nm.....	62
<b>Figura 58.</b> Experimento seguimiento de pico a 1531.3152 nm.....	62
<b>Figura 59.</b> Experimento seguimiento de pico a 1533.361 nm.....	62
<b>Figura 60.</b> Experimento seguimiento de pico a 1536.778 nm.....	63
<b>Figura 61.</b> Experimento seguimiento de pico a 1542.699 nm.....	63
<b>Figura 62.</b> Experimento seguimiento de pico a 1594.1594 nm.....	63
<b>Figura 63.</b> Experimento seguimiento de pico a 1594.566 nm.....	64
<b>Figura 64.</b> Experimento seguimiento de pico a 1595.3865 nm.....	64
<b>Figura 65.</b> Espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas .....	65
<b>Figura 66.</b> Experimento seguimiento de pico a 1555.791 nm.....	65
<b>Figura 67.</b> Zoom sobre el máximo 1555.791 nm del espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas .....	66
<b>Figura 68.</b> Experimento seguimiento de pico a 1557.0043 nm.....	66
<b>Figura 69.</b> Experimento seguimiento de pico a 1558.2086 nm.....	67
<b>Figura 70.</b> Zoom sobre el máximo 1558.2086 nm del espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas .....	67
<b>Figura 71.</b> Experimento seguimiento de pico a 1596.6199 nm.....	68
<b>Figura 72.</b> Experimento seguimiento de pico a 1600.0482 nm.....	68
<b>Figura 73.</b> Captura de la ventana de la función de Matlab para los experimentos de seguimiento de la potencia .....	69
<b>Figura 74.</b> Experimentos de potencia en ocho picos característicos del chip 4 de corrugadas cortas .....	71
<b>Figura 75.</b> Zoom sobre las interferencias bimodales de la estructura corrugada corta .	71
<b>Figura 76.</b> Experimentos de potencia para cinco picos característicos del chip 7 de corrugadas largas .....	73
<b>Figura 77.</b> Zoom sobre las interferencias bimodales de la estructura corrugada larga .	73

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Cuadro de precios de la mano de obra .....	80
<b>Tabla 2.</b> Cuadro de materiales.....	80
<b>Tabla 3.</b> Cuadro de maquinaria .....	81
<b>Tabla 4.</b> Coste total .....	81

## **Listado de acrónimos empleados**

ADN: Ácido desoxirribonucleico

IA: Inteligencia Artificial

MMZI: *Modified Mach-Zehnder Interferometer*

MZI: *Mach-Zehnder Interferometer*

NTC: Centro de Tecnología Nanofotónica

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PBG: *Photonic Band Gaps*

TE: Transversal Eléctrico

TFG: Trabajo Fin de Grado

UPV: Universidad Politécnica de Valencia



# **Parte I**

# **Memoria**

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Presentación del trabajo

La tecnología fotónica es una de las que mayor interés despierta en el campo del desarrollo de dispositivos de sensado, ya que haciendo uso de la interacción de la luz con las sustancias a detectar es posible alcanzar sensibilidades tremendamente elevadas, lo que nos permite detectar bajas concentraciones de esas sustancias de interés.

Además, el uso de la tecnología fotónica también aporta otras ventajas relevantes como por ejemplo el tamaño extremadamente reducido de esas estructuras de sensado, la posibilidad de incluir múltiples estructuras en un único chip para realizar un análisis simultáneo de diferentes sustancias o la posibilidad de realizar una detección sin la necesidad de usar marcadores (label-free), entre otras.

Una de las principales estructuras fotónicas utilizadas a la hora de desarrollar elementos de sensado son los interferómetros. En este tipo de estructuras, la luz se divide en dos caminos ópticos independientes, donde uno de ellos estará aislado del medio a analizar (y actuará como referencia) y el otro estará en contacto con ese medio de cara a realizar la detección de la sustancia de interés. A la salida, ambas señales ópticas serán combinadas de nuevo, dando lugar a una respuesta interferométrica determinada por la interacción constructiva/destructiva de esas señales, respuesta que variará cuando se produzca la detección debido al cambio de fase acumulado en el camino de sensado.

Este tipo de estructuras de sensado interferométricas tienen la ventaja de que su sensibilidad es proporcional a la longitud de los caminos ópticos, de forma que será posible aumentar la sensibilidad simplemente incrementando esta longitud. Sin embargo, esto hará que el tamaño de estas estructuras de sensado sea elevado, reduciendo así el nivel de integración que se podrá obtener.

Una manera de reducir el tamaño de estas estructuras interferométricas de sensado es mediante el uso de configuraciones bimodales, en las que, en lugar de usar dos caminos físicamente independientes para crear el interferómetro, lo que se hace es excitar dos modos propagados en una misma guía que interferirán a la salida. De esta forma, pasamos de necesitar dos caminos a sólo uno, con la consiguiente reducción de tamaño.

Otra manera novedosa de reducir el tamaño de estas estructuras interferométricas es mediante el uso de guías de cristal fotónico para implementar la configuración bimodal previamente descrita. Mediante el uso de guías de cristal fotónico, si éstas se diseñan de forma adecuada, es posible tener simultáneamente dos modos guiados con una gran diferencia en su velocidad de grupo, lo que se traducirá en un gran incremento de la sensibilidad de fase, lo que permitirá reducir todavía más el tamaño de los dispositivos (o aumentar su sensibilidad).

Esta estrategia para aumentar la sensibilidad en estructuras interferométricas bimodales mediante el uso de guías de cristal fotónico ha sido propuesta por el Centro de Tecnología Nanofotónica (NTC) de la UPV, instituto de investigación en el que se llevará a cabo este Trabajo Final de Grado (TFG). En concreto, este TFG se centrará en la evaluación experimental de diversas configuraciones de sensores interferométricos bimodales basados en cristal fotónico fabricados en nitruro de silicio, de forma que se caracterice el

comportamiento y las prestaciones de estas estructuras y se demuestre experimentalmente su capacidad para sensar diferentes sustancias.

## **1.2. Motivación**

En la actualidad, los grandes avances tecnológicos están posibilitando que cada vez podamos entender mejor cómo funciona lo que nos rodea. Posibilitando el estudio de las cosas desde lo visible hasta lo que se escapa de nuestras capacidades, como son las tecnologías a escala micro y nanométrica. Esta última surgió a finales de 1959, cuando Richard Feynman expuso de una forma muy visionaria para la época las ventajas que podría aportar trabajar a escala nanométrica, provocando desde entonces avances a pasos agigantados, para llevar la tecnología a otro nivel [1].

En nuestro ámbito biomédico, la nanotecnología tiene cada vez más importancia, posibilitando la manipulación de la materia a nivel celular [2]. Permittiéndonos detectar en un medio, cosas tan pequeñas como proteínas o ADN, a través de biosensores (chips) como los que se fabrican en el NTC. Por lo que, en cuanto me enteré de que el profesor Jaime García ofertaba trabajos de fin de grado relacionados con esta temática, en los cuales se podría investigar y manipular estos chips, no dudé en contactarle.

## **1.3. Objetivos**

El principal objetivo de este trabajo es evaluar de forma experimental distintas configuraciones de la estructura periódica de los sensores interferométricos bimodales basados en cristal fotónico fabricados en nitruro de silicio, caracterizando el comportamiento y las prestaciones de estas estructuras y demostrando de manera experimental su capacidad de sensado. Además, de tener para cada configuración, 2 longitudes de la estructura periódica, para ver cómo afecta esta a la sensibilidad.

Asimismo, este objetivo principal se divide en una serie de objetivos específicos:

- La búsqueda bibliográfica sobre la tecnología objeto de estudio.
- El estudio del marco teórico y del estado del arte, para comprender mejor la tecnología de los cristales fotónicos aplicada a los chips.
- El entrenamiento con los equipos del laboratorio para poder medir los chips.
- La experimentación con los dos tipos de chips en el laboratorio para la obtención de los resultados capaces de demostrar las capacidades de estos.
- La discusión y obtención de las conclusiones a partir de los resultados.

## **1.4. Metodología**

La metodología que se ha seguido para la realización de este TFG se puede dividir en cuatro principales fases:

- La primera fase, ha consistido en la familiarización del alumno con la tecnología a escala nanométrica a tratar, para así entender de una forma óptima el funcionamiento y las bases de los chips utilizados.
- En la segunda fase, el estudiante, durante meses, ha practicado en el laboratorio con algunos de los chips objeto de estudio y de versiones anteriores, posibilitando a este obtener destreza suficiente para usar los distintos equipos.

- Durante la tercera fase, el alumno guiado por su tutor ha caracterizado varios chips de los dos tipos considerados, en aire, en agua y en agua más un 10% de etanol, para escoger uno de cada tipo de cara a los experimentos finales.
- Por último, a lo largo de la cuarta fase, se han obtenido los resultados correspondientes a los experimentos de cambio de medio para los dos tipos de chips, con el objetivo de demostrar su capacidad de sensado.

### 1.5. Objetivos de desarrollo sostenible (ODS)

Los objetivos y metas de desarrollo sostenible fueron adoptados por los líderes mundiales el 25 de septiembre de 2015, como parte de la Agenda 2030, para poder erradicar tanto la pobreza, como proteger el planeta y conseguir un futuro próspero y sostenible para todos. Estos son 17 objetivos que se interrelacionan entre sí y que deberían estar presentes en nuestro día a día, para no dejar a nadie atrás [3], por lo que, debemos tenerlos en el foco en las tareas que realicemos, asegurando que se cumplan.

Con este trabajo, podemos ver que el ODS 3, relacionado con la salud y el bienestar [4], y el ODS 6, que es agua limpia y saneamiento [5], son nuestros objetivos fundamentales para ayudar a que en el 2030 se cumplan estos objetivos.



Figura 1. ODS 3: Salud y Bienestar y ODS 6: Agua limpia y Saneamiento

Esto implica metas, establecidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), como las siguientes para el ODS 3 y el ODS 6:

- Lo primero, “para 2030, reducir sustancialmente el número de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo” [4].
- Y, “de aquí a 2030, 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” [5].

Pues con tecnología tan interesante como la que se trabaja en el NTC, se podría, por un lado, usar para diagnóstico rápido y precoz mediante el análisis de diferentes biomarcadores de forma mínimamente invasiva, y, por otro lado, para comprobar la calidad del agua, evitando su uso cuando está no fuese potable. Así, con los biosensores con los que se trabaja en este trabajo podríamos, con pocas cantidades de muestra detectar la presencia de sustancias contaminantes en el agua.

## 1.6. Asignaturas relacionadas del grado

Este trabajo de fin de grado de evaluación experimental de sensores fotónicos integrados basados en estructuras interferométricas bimodales de cristal fotónico en nitruro de silicio, está relacionado principalmente con dos asignaturas del grado de Ingeniería Biomédica.

La primera, Biotecnología y Nanotecnología, asignatura que en su segunda parte nos enseñó los fundamentos de la Nanotecnología, tanto desde el punto de vista de los materiales y de las técnicas de fabricación y caracterización, como desde el uso de nanotecnología con equipos y sensores en el ámbito de nuestra carrera.

Y la segunda, Micro-Nanotecnología, en la cual nos describieron las distintas tecnologías que posibilitan la creación de estructuras a escala nanométrica y micrométrica con funcionalidades bioquímicas como base de técnicas avanzadas para nuevas aplicaciones biomédicas y para el sensado bioanalítico.

## 1.7. Estructura del trabajo

El trabajo se puede dividir en 6 capítulos diferentes:

- El primer capítulo “**1. INTRODUCCIÓN**” se trata de una introducción general del trabajo.
- El segundo capítulo “**2. MARCO TEÓRICO**” presenta el campo de la nanotecnología y algunos de los tipos de sensores fotónicos. Asimismo, expone la estructura y los fundamentos de los sensores fotónicos integrados basados en estructuras interferométricas bimodales de cristal fotónico en nitruro de silicio.
- El tercer capítulo “**3. ESTADO DEL ARTE**” expone algunas de las últimas investigaciones con sensores fotónicos, tanto el ámbito de la salud como en el de las telecomunicaciones, en el que veremos dos investigaciones del NTC.
- El cuarto capítulo “**4. MATERIALES Y MÉTODOS**” muestra los materiales de laboratorio, el setup y los programas usados para caracterizar y evaluar experimentalmente las dos configuraciones de sensores.
- El quinto capítulo “**5. RESULTADOS**” presenta los resultados de trabajo desde la exposición de la estructura de los dos tipos de chips, pasando por la caracterización de los chips en aire y agua, hasta la evaluación experimental de los mismos.
- El sexto capítulo “**6. CONCLUSIONES**” expone las conclusiones del trabajo.

## 2. MARCO TEÓRICO

Durante los últimos años, los sensores de tipo fotónico están experimentando un gran crecimiento. Este, se debe en gran medida a los avances de la biomedicina y a la adopción de los componentes fotónicos en dispositivos médicos, para revolucionar el diagnóstico clínico y la atención médica general en un futuro cercano [6]. A mediados de los 2000, el NTC comenzó el estudio y desarrollo de los sensores fotónicos, primero con configuraciones como los anillos resonantes, y en los últimos años, con los sensores basados en cristales fotónicos y en configuraciones interferométricas, de los cuales evaluaremos su capacidad de sensado en el laboratorio.

Estos sensores fotónicos nos posibilitan detectar la presencia (o la ausencia) de distintas sustancias, moléculas externas que provocan una variación en el índice de refracción del entorno de la estructura fotónica, provocando así una variación en la interacción con la luz. Este índice de refracción se calcula como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el medio en el que viaja la luz, y se usa para saber cuánto se reduce la velocidad dentro de un medio. De esta forma, al variar el entorno, el índice de refracción efectivo de cada modo que se propague por la guía se verá alterado provocando un cambio en la constante de propagación de los modos, es decir, un cambio fase. En el caso de una guía estándar (recta), por la que se propagan varios modos, si se modifica el entorno, la fase de estos modos será distinta, no obstante, la potencia medida al final de la guía será la misma. Por lo que, por esta razón, se deberá hacer uso de interferencias entre los modos, para así permitirnos detectar los cambios de fase de uno de los modos o rayos.

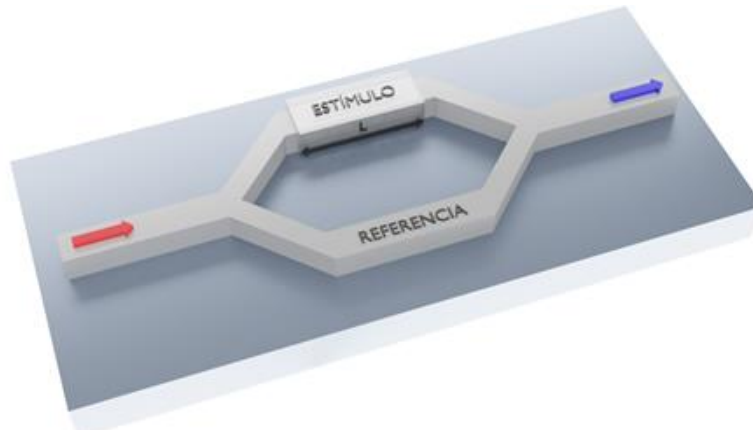
### 2.1. Tipos de sensores fotónicos

Comparar la respuesta del sensor en dos instantes de tiempo distintos, es el concepto principal de los sensores fotónicos. Estos instantes, uno antes de introducir la muestra y el segundo tras introducir la muestra, modificándose el índice de refracción del entorno del sensor. Así, el objetivo de estos sensores se fundamenta en convertir el cambio de fase, provocado por el cambio en el índice de refracción, en un cambio en la potencia a la salida del sensor, pudiendo medirlo. Para lo cual, encontramos los siguientes tipos de sensores fotónicos, además de los sensores fotónicos interferométricos objeto de estudio:

En primer lugar, destacamos el interferómetro Mach-Zehnder (MZI), que a pesar de ser uno de los primeros en ser inventados, funciona como base para el desarrollo de novedosos sensores interferométricos. En su forma clásica, presenta una estructura en la cual se parte de una guía monomodo (en la que solo existe un modo), hasta llegar a un punto de división. En este, la guía de onda se divide en dos caminos, provocando que cuando se vuelvan a juntar, las ondas interfieran produciendo interferencias constructivas o destructivas que son medibles [7].

Para el proceso de sensado, una de las ramas pasa por un medio fijo con índice de refracción conocido que nos sirve como referencia, mientras que la otra es expuesta al medio de análisis. Sobre esta rama aparece un cambio en el índice de refracción, cambiando su fase. Este cambio puede ser provocado, por ejemplo, por variaciones en la temperatura o la aparición de analitos específicos a las partículas con las que podamos haber funcionalizado la superficie del sensor. Así, las modificaciones producidas por el

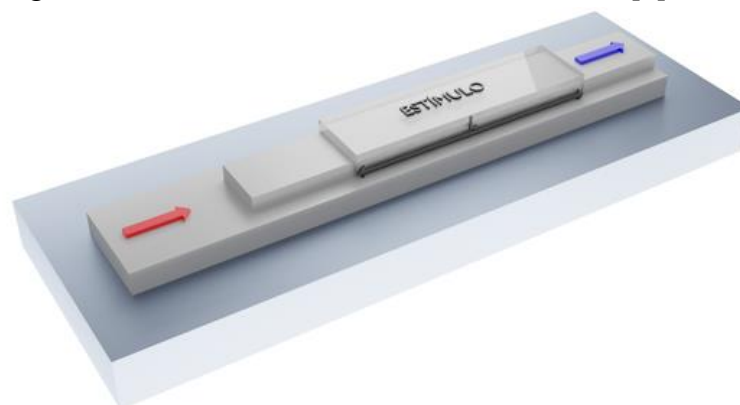
cambio en el índice de refracción se medirán en cambios de potencia producidos en la respuesta a la salida del sensor [8]. A continuación, en la Figura 2 se muestra la estructura simplificada de un MZI.



**Figura 2.** Representación 3D de un interferómetro Mach-Zehnder

Sin embargo, los MZI en esta configuración presentan ciertas limitaciones, como su elevado tamaño o sensibilidad a perturbaciones en el medio. Por esta razón, han surgido otros sensores con modificaciones en la estructura que consiguen solucionar estos problemas [9].

En segundo lugar, para disminuir el tamaño de los sensores, se pensó en interferómetros de tipo bimodal, que consisten en usar dos modos de luz en la misma guía y lograr una interferencia entre estos. Como ya destacamos en el apartado 1. INTRODUCCIÓN, la configuración de tipo bimodal se utiliza en los sensores objeto de estudio. Para lograr que haya dos modos de luz en la misma guía, existen varias formas. En la Figura 3, podemos observar una de las formas, que consiste en ampliar la altura de la guía de onda. Al ampliar la guía, se logra que se propaguen dos modos, el fundamental que se propagará por el centro de la guía y el de orden superior, que se propagará más próximo a la superficie de la guía, viéndose más afectado por los estímulos externos. De esta forma, se obtienen dos modos, en los cuales uno de ellos presenta su índice efectivo y constante de propagación muy modificados generando, una diferencia de fase entre ambos [9].



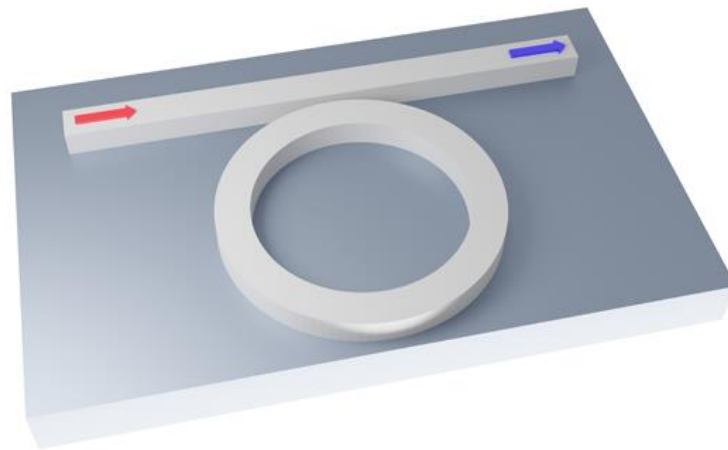
**Figura 3.** Representación 3D de un sensor bimodal de doble altura

Por lo general, el modo fundamental no se verá tan afectado cuando exista una diferencia en el índice de refracción del entorno, mientras que el otro modo sí y, dicha desigualdad se podrá medir. Además, en este tipo de sensores suele utilizarse la diferencia de potencia de la señal de salida para detectar, como en los MZI. Así, en este caso la intensidad de

señal total está normalizada al total de intensidad que pasa por el sensor. Lo que provoca que la potencia de salida se vea menos afectada por las fluctuaciones de la potencia de entrada o la eficiencia de los acopladores de la luz que posibilitan su confinamiento dentro del sensor, permitiendo solventar ciertos inconvenientes que tienen los MZI [9,10] Sin embargo, en estas configuraciones lograr una división del 50% de potencia en cada modo, y por consiguiente que las interferencias sean lo mejor posible, es más complicado que en un MZI.

En los dos anteriores sensores se mide la potencia final para ver los cambios en el índice de refracción. Así, dependiendo de la diferencia de fase que exista entre los modos o rayos, las interferencias serán más destructivas o constructivas variando la potencia a cierta longitud de onda. No obstante, existe otra forma de medir los cambios en el índice de refracción, como es utilizar una referencia dentro de la respuesta y seguir su posición en el espectro en función del tiempo. Ya que, si cambia el índice de refracción, el espectro se verá desplazado en longitud de onda, y, por consiguiente, la referencia que se elija también se desplazará. De este modo, midiendo estos desplazamientos, se podrá observar si los sensores funcionan bien o no. En el tercer sensor que vamos a presentar, los anillos resonantes, se utilizarán como referencia los picos de potencia que se generan a las longitudes de onda de resonancia.

Estos anillos resonantes, como el que observamos en la Figura 4, constituyen uno de los tipos de sensores fotónicos más estudiados. Como ya se destacó al principio del apartado, con este tipo de sensores es con el que se comenzaron los estudios de sensores fotónicos en el NTC. Estos sensores están formados por dos elementos bien diferenciados, una guía de onda por la cual se propaga la luz y otra guía cerca en forma de anillo. Por esta proximidad, parte de la luz que se propaga por la guía se acoplará al anillo, habiendo ciertas frecuencias que se acoplen mejor como la frecuencia de resonancia, que se quedarán en el anillo confinadas, dando vueltas [9].



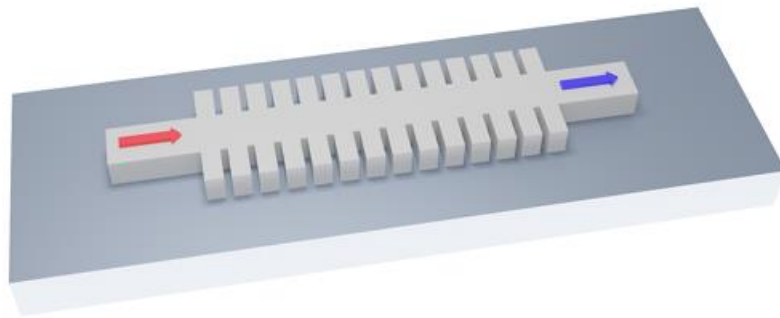
*Figura 4. Representación 3D de un sensor mediante anillo resonante*

En definitiva, el funcionamiento es similar al MZI, pues la luz se divide en dos caminos, uno de referencia y un segundo que se ve alterado por la variación del índice de refracción, pero en este caso los cambios en el índice de refracción provocarán variaciones medibles en las longitudes de onda de resonancia del anillo. Las cuales darán lugar a picos en la potencia visibles en la respuesta del sensor, fáciles de seguir al variar la muestra [11].



Para finalizar, vamos a exponer el tipo de sensores que se utilizan a lo largo de todo este trabajo, denominados cristales fotónicos, los cuales son estructuras periódicas dieléctricas que provocan una reducción de la velocidad de grupo cerca del borde de la zona de Brillouin.

Asimismo, esta configuración de cristales fotónicos (como en la Figura 5) tiene zonas en frecuencia en las cuales no se propaga ningún modo, denominadas *Photonic Band Gaps* (PBG) o zona de no transmisión, en cuyos bordes tendremos una reducción de la velocidad de grupo. Por lo general, se trabajará con un PBG cerca de la zona de trabajo. Estos son sencillos de detectar, pues suponen una caída de potencia en la respuesta del sensor. Además, en estas estructuras, aparecerá un rizado de tipo Fabry-Pérot, en los bordes del PBG, que dará lugar a picos de potencia que se podrían usar también como referencia. De esta forma, como ya se destacó anteriormente, se medirá la posición de los picos en longitud de onda conforme vaya cambiando el índice de refracción, detectando así los cambios en la respuesta. Una de las principales ventajas de este tipo de sensores es la relación sensibilidad-longitud [9, 12].



**Figura 5.** Representación 3D de un sensor mediante cristal fotónico en estructura corrugada

Para la fabricación de estos sensores se utilizan materiales derivados del silicio, por su alto índice de refracción que permite que la luz esté más confinada, posibilitando realizar una estructura más compacta. En nuestro caso se usó nitruro de silicio por su bajo coste y sus adecuadas propiedades ópticas.

Después de haber visto cómo los sensores fotónicos nos posibilitan detectar estímulos mediante la comparación de las interferencias entre dos modos o rayos, en el que uno de ellos es mayormente modificado al variar el índice de refracción del medio usado. Se comprende que, lo que se pretende detectar deberá ocasionar un cambio en el índice de refracción. Por lo que, por lo general, estos sensores van a detectar sustancias químicas o biológicas. En nuestro caso, la evaluación experimental de los dos tipos de chips objeto de estudio se hará mediante las variaciones entre agua y distintos porcentajes de agua más etanol.

En definitiva, estos sensores fotónicos son muy útiles, pues tienen una gran capacidad de detección. Asimismo, mediante la configuración de cristales fotónicos podemos obtener más sensibilidad o un menor tamaño según se requiera. Como ya hemos destacado, durante este trabajo se van a evaluar y medir sensores de nitruro de silicio ( $Si_3N_4$ ), que, en comparación con el silicio, nos permite realizar sensores más grandes, y, por ende, más fáciles de fabricar, puesto que tiene un índice de refracción menor. Además, el nitruro de silicio, a diferencia del silicio, es transparente en el rango visible de frecuencias, lo que

puede posibilitar que, en un futuro, se reduzca la longitud de trabajo desde el infrarrojo cercano hasta el rango de lo visible, disminuyendo de esta manera, los costes en los materiales de experimentación necesarios.

## 2.2. Configuración del sensor

Después de haber repasado algunos de los sensores fotónicos más característicos, vamos a mostrar la estructura y los fundamentos de nuestros sensores fotónicos integrados basados en estructuras interferométricas bimodales de cristal fotónico en nitruro de silicio. Para así, comprender mejor su funcionamiento de cara a su evaluación experimental, objetivo principal de este trabajo.

### 2.2.1. Estructura del sensor

Nuestros sensores, como ya se ha destacado anteriormente, están formados por los denominados cristales fotónicos, estructuras periódicas dieléctricas que en nuestra aplicación permiten separar dos modos de luz, provocando las interferencias bimodales. Durante este trabajo, estas estructuras las denominaremos “corrugada”. A priori, toda estructura periódica que esté bien configurada en cuanto a sus dimensiones tendría que ser suficiente para realizar un sensor, por lo que para el diseño de nuestros sensores fotónicos interferométricos podríamos utilizar agujeros circulares de silicio en una malla. No obstante, en nuestro caso se trabaja con la estructura corrugada, pues es fácil de reproducir durante la fabricación, ya que no presenta elementos curvos, sólo presenta la guía central y los elementos rectos transversales [9].

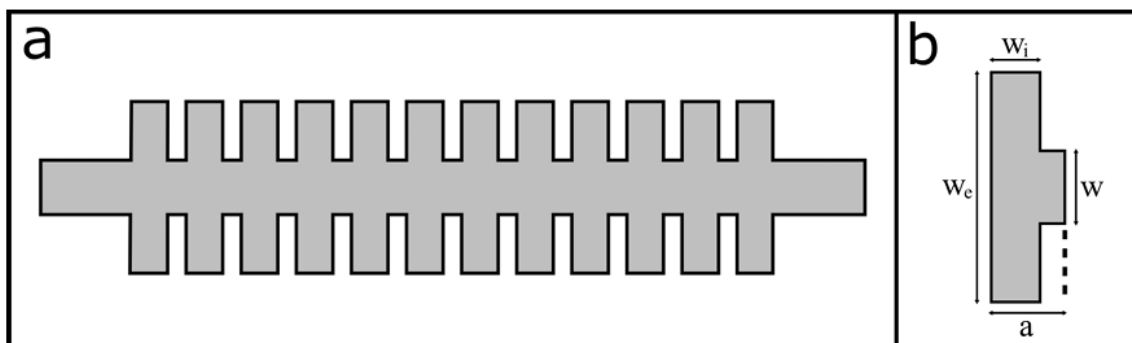
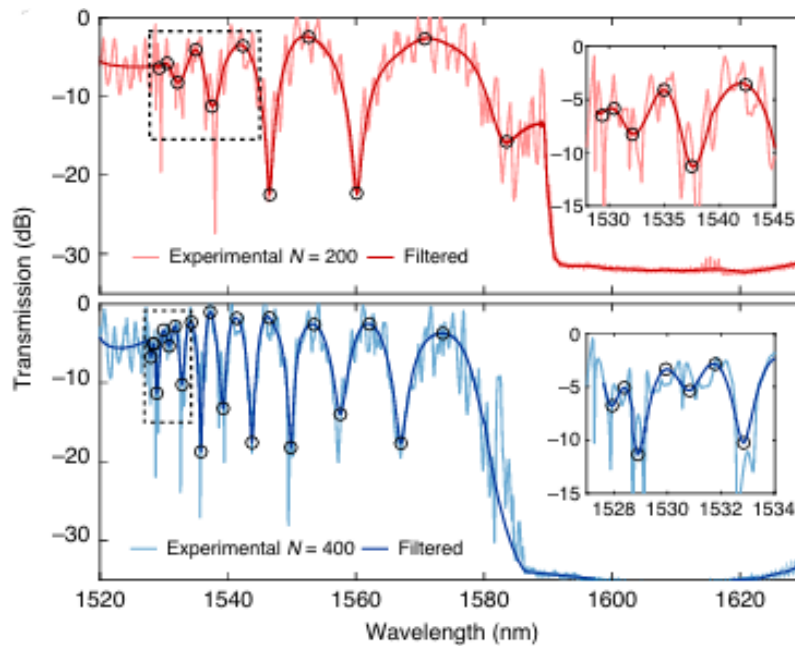


Figura 6. a) Estructura corrugada con 10 elementos. b) Elemento básico de la estructura corrugada

De esta manera, los elementos que constituyen parte de la configuración y que durante nuestra búsqueda bibliográfica se van alternando para conseguir la mejor combinación posible son: el periodo ( $a$ ), la anchura de la guía ( $w$ ), la anchura del elemento transversal ( $w_e$ ) y el largo del elemento transversal ( $w_i$ ).

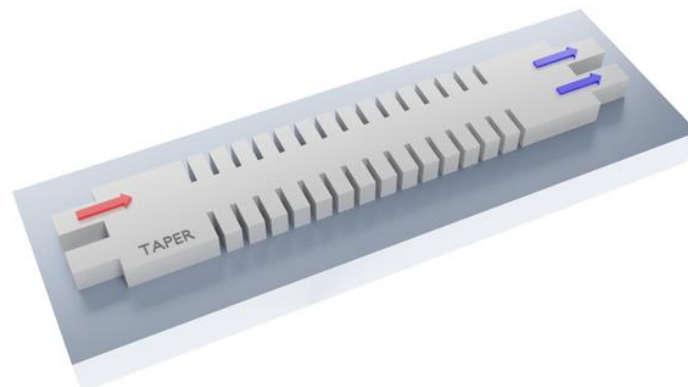
Así, a partir de la variación del tamaño de los elementos, se buscan las configuraciones que permiten encontrar los PBGs. Asimismo, en la estructura corrugada ocurrirá algo similar a los interferómetros bimodales de doble altura, pues por la guía de onda viajará un modo y al añadir los elementos transversales podrán propagarse más, en nuestro caso dos. Mismamente, cuando la corrugada termina y se regresa a una guía monomodo, se da lugar a un cambio abrupto que genera interferencias constructivas (picos) o destructivas (valles) entre los modos que se propagan, provocando picos en la respuesta del sensor, más sencillos de medir que la posición del PBG. Estas interferencias podemos verlas en la Figura 7.



**Figura 7.** Espectros tipo de la estructura corrugada

En la Figura 7, observamos como dependiendo de la longitud de la estructura corrugada, se observan más interferencias cuanto mayor es la longitud de la estructura corrugada (espectro azul). Asimismo, podemos ver que existen interferencias de distintas anchuras, esto se debe a que cuanto mayor es la diferencia entre las velocidades de grupo de los modos, cuando uno de los modos trabaja en el régimen de onda lenta, menor es la anchura de la interferencia (recuadros con línea discontinua).

En la estructura interna de los sensores, podremos encontrar la estructura corrugada como la de la Figura 8, donde en comparación con las figuras anteriores, se usan dos entradas y dos salidas, que posibilitarán la excitación de los modos con simetría impar en el plano de la corrugada. Asimismo, se añade un elemento antes de la corrugada llamado “taper” [12, 13], el cual mejora la excitación del resto de modos que no sean el fundamental, pues si no se colocara, la luz se propagaría por el centro de la guía, haciendo que los elementos transversales fuesen prácticamente inservibles. Y solo se propagaría de forma eficaz el modo fundamental, no cumpliéndose la condición buscada en las bandas fotónicas que veremos a continuación. Asimismo, el “taper” también es necesario cuando tenemos una entrada y una salida.



**Figura 8.** Representación 3D de la estructura interna de los sensores que se estudiarán durante el trabajo

### 2.2.2. Fundamentos del sensor

Para comprender la propagación de los modos dentro de la estructura del sensor, vamos a partir de la gráfica habitual en fibra óptica, de los modos de propagación [14], que podemos ver en la Figura 9. En esta, la línea discontinua indica el final de la zona monomodo (la habitual en la mayoría de las configuraciones de fibras). Como se puede observar, se representa la constante de propagación normalizada ( $b$ ), la cual nos indica si los modos están confinados y en qué medida en la estructura, respecto a una frecuencia normalizada ( $V$ ).

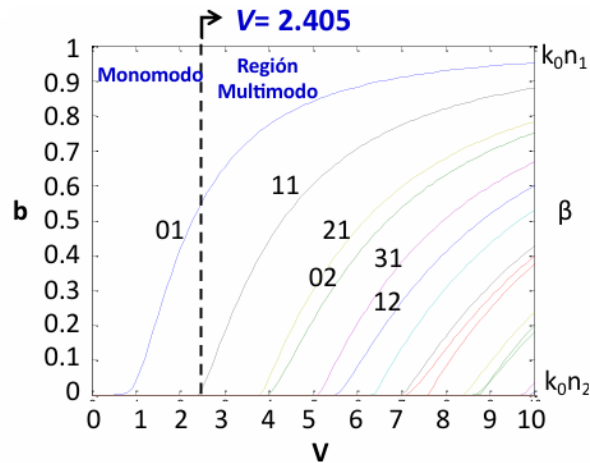


Figura 9. Modos de propagación de una fibra óptica

Cuando se usa una estructura periódica, el vector de propagación al igual que la estructura se repite de forma periódica. De esta forma, se repetirán cada cierto punto los valores de la constante de propagación. Asimismo, se puede definir la llamada Zona de Brillouin [15], cuando la constante de propagación valga  $0,5 * 2\pi/a$ , que normalizando será 0,5. Punto en el cual se realiza una repetición especular o un efecto espejo de los valores de la constante de propagación para cualquier longitud de onda, y volviendo a los valores originales a partir de  $2\pi/a$ . Así, observamos como en una estructura periódica, la constante de propagación también será periódica con un periodo de  $2\pi/a$ , con “ $a$ ” igual al periodo de la estructura y en la que la forma de cada periodo tendrá una simetría especular. En la Figura 10, podemos ver un ejemplo teórico de cómo podrían verse los modos de propagación en estas estructuras periódicas. En la que dos modos con la misma polarización cuando se cruzan, se acoplan y se repelen entre sí, dando lugar a los PBGs.

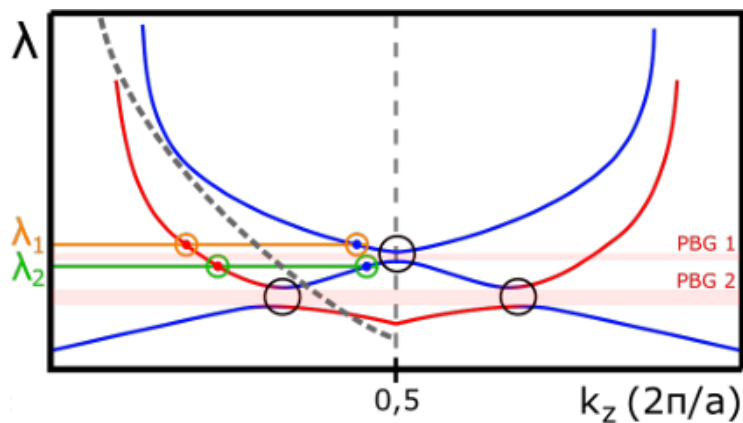


Figura 10. Ejemplo de bandas de propagación en una estructura periódica

Asimismo, mediante esta estructura se hará uso de un efecto producido por el acople entre bandas. Pues cerca de los PBGs, podemos observar como la pendiente de las bandas se reduce. En estas gráficas, la pendiente se refiere a la velocidad de grupo del modo que se propaga. De esta manera, las zonas de poca pendiente o “zonas de onda lenta” es donde se trabajará, en las que pequeños cambios en la longitud de onda, provocan un gran cambio en la constante de propagación [12,13].

En el ejemplo de la Figura 10, se observan de forma clara las distintas bandas fotónicas de la estructura teórica. Además, vemos dos longitudes de onda remarcadas,  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , en las que se cumple la condición de que una banda tiene una pendiente normal y la segunda se ubica en la zona de onda lenta. Por un lado, para la primera longitud de onda ( $\lambda_1$ ), tendríamos un caso, poco habitual debido a los conos de luz, en el que se da la condición buscada sin la necesidad del acople entre bandas. Estos conos de luz son líneas que indican que todo lo que esté por debajo no estará confinado en la guía. Y, por otro lado, respecto de  $\lambda_2$ , se observa un caso más corriente, en el cual se da el acople entre bandas que genera el PBG, originando así, una región del espectro de onda lenta que es la que se usará para amplificar la diferencia de fase entre ambos modos y poder evaluar de forma experimental los sensores [9].

Finalmente, a la hora de trabajar con estos sensores fotónicos es normal trabajar con una fibra polarizada en la que solo se propaguen los modos TE, Transversales Eléctricos, donde el campo eléctrico es transversal a la dirección de propagación.

Asimismo, dentro de los modos TE, se pueden distinguir los modos por su simetría en el plano horizontal, par o impar. Por una parte, los modos pares o “even modes” se propagarán por el centro de la guía, siendo el modo fundamental el primer modo par, en el cual se propaga la luz en forma de lóbulo con un máximo en el centro de la guía de onda. Y, por otra parte, los modos impares o “odd modes” no se propagarán por el centro, propagándose el primer modo impar en forma de doble lóbulo cerca de los bordes y sin propagación por el centro. Seguidamente, el segundo modo par se propagaría en forma triple lóbulo, uno en el centro y dos en los laterales y así, sucesivamente [13]. En la Figura 11, podemos ver la distribución de campo de un modo par y otro modo impar sobre la estructura corrugada.

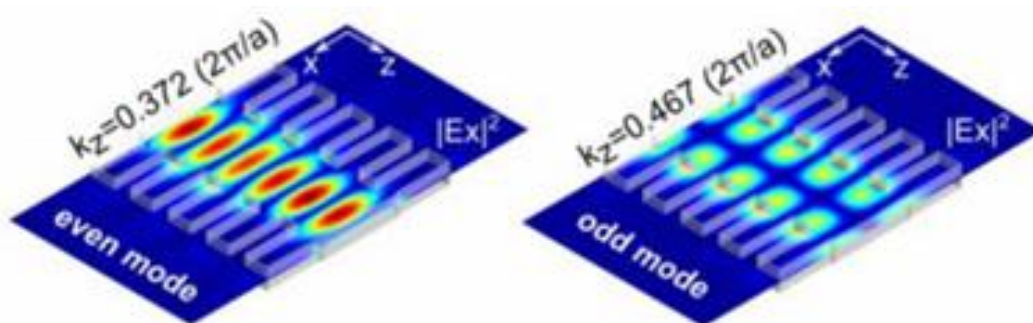


Figura 11. Distribución de campo de los modos de propagación par e impar en la estructura corrugada

### 3. ESTADO DEL ARTE

Una vez visto los fundamentos de los sensores fotónicos más usados y repasar las particularidades de los sensores objeto de estudio. Estuvimos buscando sus aplicaciones actuales en nuestro sector biomédico, pudiendo observar proyectos tan interesantes como los siguientes.

Como ya hemos dicho anteriormente, el funcionamiento de los sensores interferométricos se fundamenta en la detección de cambios en el índice de refracción dentro de dos ramas ópticas independientes, típicamente guías de onda planares. Cuando se produce un cambio en el índice de refracción, se genera un cambio de fase en la luz que atraviesa cada rama. Al combinar la luz proveniente de ambas ramas, se produce una interferencia, manifestada como un batido, que puede ser aprovechado para detectar la presencia de un analito en el bioreceptor [7]. Teniendo en cuenta el bajo rango de longitudes de onda en el que se encuentra la zona de trabajo, pequeños cambios en la longitud de los caminos ópticos generan importantes diferencias en las intensidades y distribuciones de los patrones de interferencias. Por tanto, los sensores interferométricos permiten tomar medidas muy sensibles [16].

Las características propias de los sensores interferométricos los hacen idóneos para el biosensado. Cuando trabajamos con muestras biológicas, se ha de tener en cuenta que pequeñas cantidades de sustancias no deseadas pueden generar graves problemas en la clínica del paciente. Los sensores interferométricos son capaces de detectar pequeños cambios en el índice de refracción, asociados a la unión del analito que queremos cuantificar, y generar cambios significativos en la señal. Otras características relevantes de estos sensores son su rápido tiempo de respuesta y capacidad de multiplexación. Esta última resulta muy útil y es el objetivo que persiguen los distintos estudios actuales relacionados con sensores biológicos. La posibilidad de usar un único chip de tamaño reducido con muchas estructuras, cada una para el sensado de un distinto analito permite dar un paso hacia la compactación de los dispositivos y la reducción de los tiempos de detección [17]. De esta manera, se pueden hacer sistemas que permitan el diagnóstico temprano de enfermedades a partir de pequeñas muestras con múltiples analitos.

Las tendencias en el desarrollo de biosensores conceden gran importancia a la miniaturización de los dispositivos, pues sensores de menor tamaño permiten una mejor integración en otros aparatos, fácil portabilidad y su introducción en el cuerpo humano de manera menos invasiva. Sin embargo, una reducción de tamaño suele estar asociada a una pérdida de la sensibilidad. Por lo que, ante este problema, se implementan las estructuras periódicas en los sensores interferométricos, entre las que se encuentra la secuencia de corrugadas que forma la parte principal de nuestro dispositivo [12].

Uno de los estudios actuales relacionados con sensores biológicos, se trata del desarrollo de un biosensor de bajo coste y *label-free*, por parte de un grupo de investigadores de la Universidad de Heilongjiang, para la detección específica de hibridación de ADN [18]. Este tiene una microcavidad que se puede rellenar de líquido o gas, a través de la cual se guía una de las ramas ópticas. El biosensor de microcavidad MZI propuesto puede detectar cDNA dentro de un rango lineal de 1 fM a 5 fM, con una sensibilidad de 0.32 nm/fM y un límite de detección impresionante de 48.9 aM.

Otro estudio llevado a cabo por un grupo de investigadores de la Universidad Mohan Bahu, en Tirupati (India) integra el uso de inteligencia artificial para la selección de parámetros del sensor [19]. El dispositivo en cuestión se trataba de un interferómetro Mach-Zehnder modificado (MMZI) para la detección de virus de transmisión sexual.

Asimismo, en el Centro Tecnología Nanofotónica de la Universitat Politècnica de Valencia llevan años trabajando con interferómetros basados en estructuras corrugadas usados en diferentes campos, no solo al biosensado. Entre estos, un conmutador óptico ultracompacto [13] y un aptasensor label-free para la detección de concentraciones crecientes de trombina [20].

Por una parte, en el artículo “*Ultra-Compact Optical Switches Using Slow Light Bimodal Silicon Waveguides*”, de la revista *Journal of Lightwave Technology* [13], se presenta un conmutador óptico 2x2 ultracompacto, que se basa en el uso de interferencias bimodales mejoradas por luz lenta dentro de cristales fotónicos de silicio unidimensionales. Este diseño, aunque no es una aplicación biomédica como tal, es muy interesante pues los sensores utilizados en nuestro TFG son una adaptación de los de este paper, buscando reducir el tamaño sin sacrificar el rendimiento. El conmutador aprovecha las distintas simetrías de los modos fundamentales pares y los modos de orden superior impares para crear regiones bimodales altamente dispersivas y de banda ancha para la polarización Transversal Eléctrica (TE). En este trabajo del NTC, se examinan experimentalmente dos configuraciones para entender la influencia de las dimensiones en la eficiencia del conmutador. Siendo el conmutador resultante el de área de  $63 \mu m^2$ , con un consumo de 19,5 mW de energía y una diafonía de 15 dB utilizando la sintonización termo-óptica. De esta manera, las configuraciones testadas muestran resultados prometedores en cuanto a rango de longitudes de onda operativas y de índice de grupo experimental, confirmando la viabilidad del diseño compacto y eficiente propuesto.

Y, por otra parte, en el artículo “*Continuous Detection of Increasing Concentrations of Thrombin Employing a Label-Free Photonic Crystal Aptasensor*”, de la revista *Micromachines* [20], se muestra un aptasensor óptico sin etiquetas basado en una estructura de cristal fotónico unidimensional para detectar concentraciones crecientes de trombina. En este sensor, se emplean aptámeros de unión a trombina en superficie, lo que permite una detección específica en un rango de 270 pM a 27 nM, con un límite de detección de 33,5 pM y un tiempo de respuesta de unos 2 minutos. Así, este aptasensor ofrece una monitorización continua y en tiempo real, de la variación de concentración de trombina en la fase inicial de la coagulación, siendo una alternativa significativamente mejor que los métodos existentes. Por último, los resultados indican que es prometedor el uso del aptasensor para el estudio de los procesos de coagulación y de enfermedades relacionadas con la hemostasia, que es el proceso fisiológico que se activa en respuesta a una lesión vascular, para detener el sangrado y evitar la pérdida excesiva de sangre [21].

Para finalizar este apartado, querría destacar que existen muchos otros estudios y que constantemente salen más, por lo que este apartado podría ser mucho más largo y no acabar nunca, pues los sensores fotónicos tienen un presente y futuro muy prometedor, ya que a diario se consiguen nuevos avances.



## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado vamos a mostrar el entorno de trabajo necesario, para la medición de las distintas configuraciones de la estructura periódica de los sensores interferométricos bimodales basados en cristal fotónico fabricados en nitruro de silicio, los cuales presentaremos en este apartado. Por un lado, la mesa de trabajo donde colocamos los chips para su medida. Y, por otro lado, los programas necesarios para caracterizar los chips en aire y en líquido, y evaluar experimentalmente los sensores a lo largo del espectro mediante referencias y midiendo en potencia a una longitud de onda.

### 4.1. Materiales de medida

En primer lugar, en la Figura 12, podemos observar el setup utilizado en el laboratorio de Biofotónica del NTC, donde se muestra la zona de trabajo, adaptado para realizar las medidas pertinentes sobre los sensores fotónicos. Ahora, vamos a ir describiendo los distintos elementos del setup fibra-fibra, compuesto de un láser unido a un medidor de potencia (1), una cámara unida a un microscopio (2), dos monitores (3), unos microposicionadores montados sobre raíles que sujetan las fibras ópticas (4) y una lámpara (5) para iluminar el sensor y que se vea a través de la cámara.

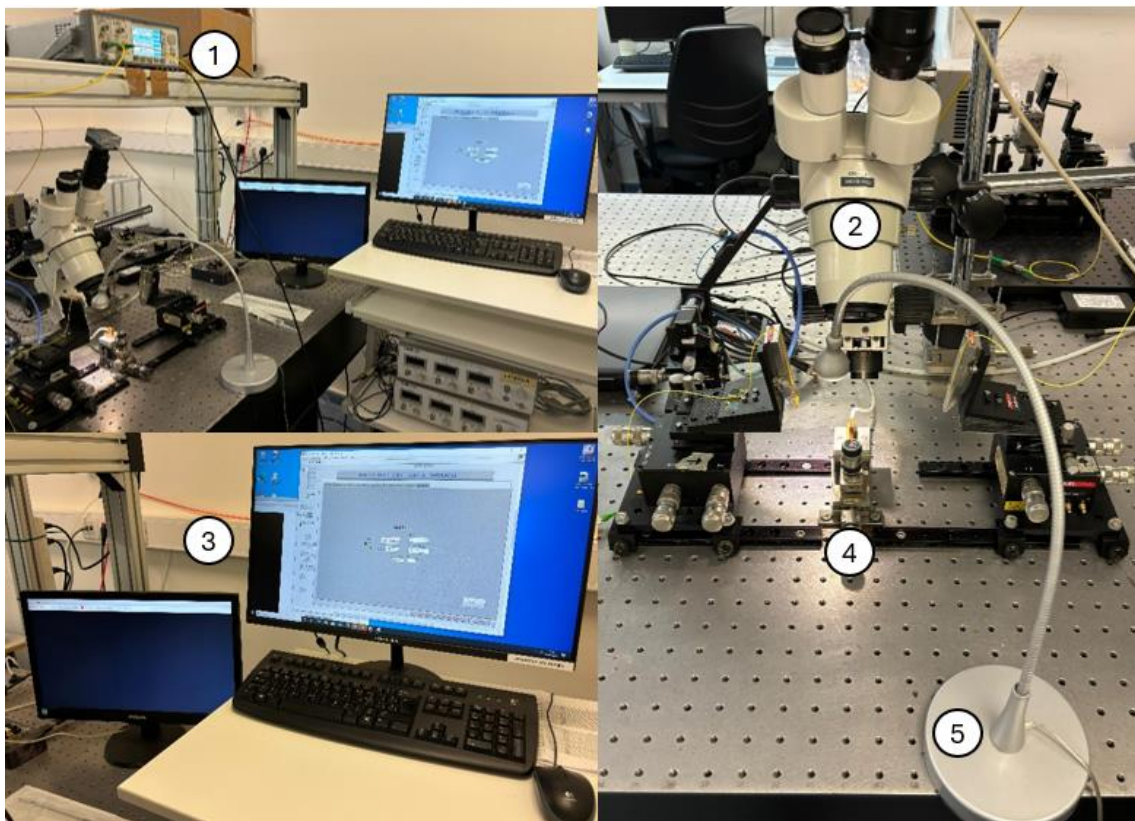


Figura 12. Fotografías del entorno de trabajo en el laboratorio del NTC

En primer lugar, tanto el monitor de potencia como el láser (1) que se usan en este setup forman parte de un mismo dispositivo, un multímetro óptico modelo 8163B (“Lightwave Multimeter”), de la empresa Keysight que podemos ver en la Figura 12. Este multímetro óptico contiene dos módulos que son intercambiables. En la Figura 13, podemos ver una de las configuraciones más habituales para la medición de los sensores fotónicos de nitruro de silicio en el NTC. El primer módulo, en el lado izquierdo, contiene el láser



modelo 81940A, cuyos límites de longitud de onda son entre 1520 y 1630 nm, además este contiene un botón para encender y apagar el láser, y una luz verde que nos posibilita ver si el láser está activado o apagado. A la derecha del primer módulo, encontramos el segundo módulo en el que está montado el monitor de potencia modelo 81636B, el cual mide de +10 dBm hasta -80 dBm de potencia. Asimismo, es interesante especificar que los dos módulos presentan su entrada y salida y que, para la evaluación de los chips, las fibras (4) de la Figura 12 irán conectadas, la primera (la de la izquierda) a la salida del láser (“Output”) y la segunda (a la derecha), a la entrada del monitor de potencia (“Input”), para los dos módulos las conexiones inferiores de la representación. Además, el dispositivo posibilita la configuración tanto manual a través de botones físicos, como a través de un programa realizado en el entorno de programación “LabView”, que en este setup está configurado para hacer de controlador del láser.

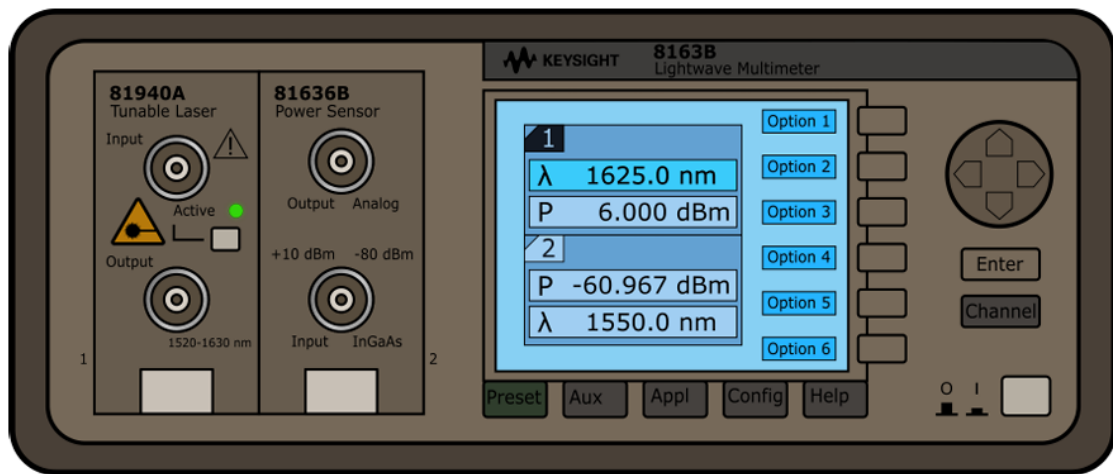


Figura 13. Representación gráfica de un Lightwave Multimeter 8163B de la empresa Keysight

En segundo lugar, encontramos el microscopio unido a la cámara (2), el cual nos posibilita visualizar de forma correcta la superficie de los sensores y las puntas de las fibras a través de los monitores (3), facilitando el alineamiento y la medición de estos. En la Figura 14, podemos ver una captura de parte de la cámara, donde se ve la superficie del sensor y la fibra óptica con su sombra.

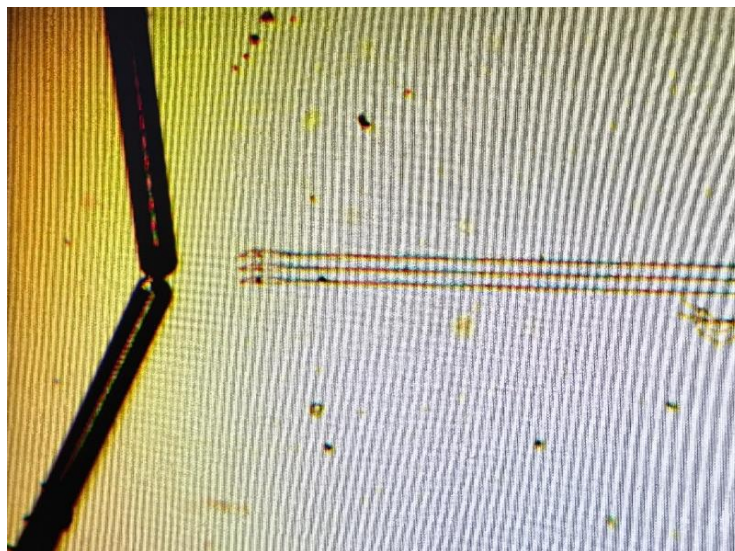
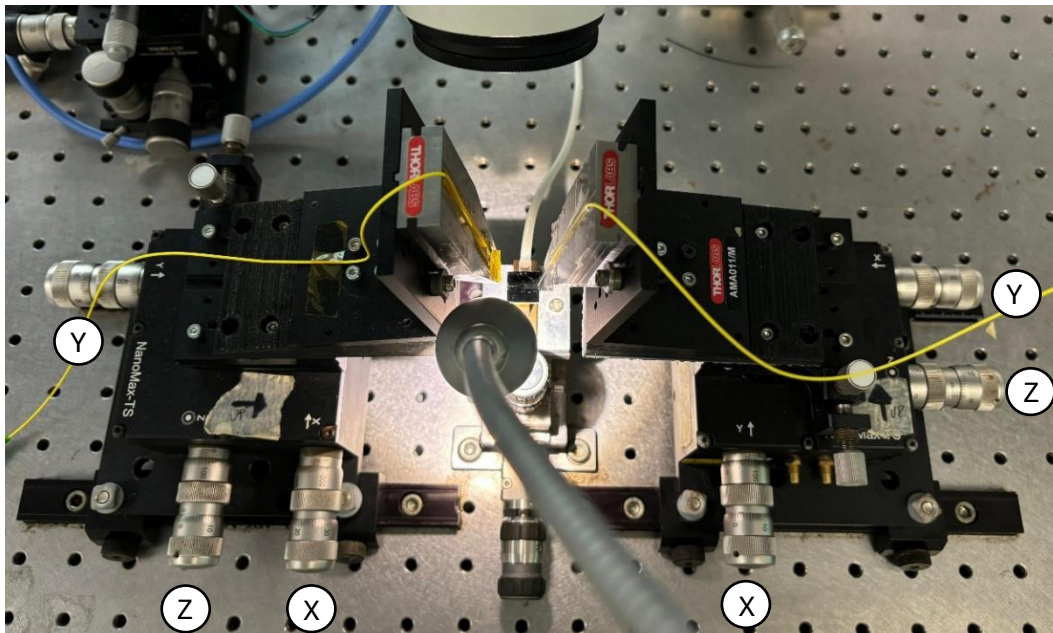


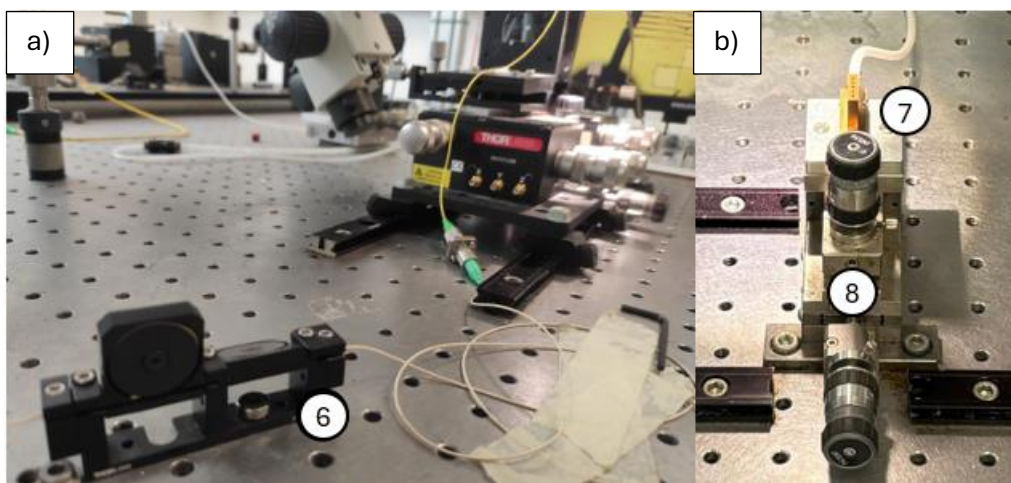
Figura 14. Captura de la cámara, donde se ve la superficie del sensor y la fibra óptica

De seguido, podemos observar los soportes sobre raíles que sujetan las fibras (4), estructura fabricada para la medida y uso de los sensores que observamos con más detalle en la Figura 15.



**Figura 15.** Fotografía de la estructura del setup, para la caracterización y evaluación experimental de los sensores

En la Figura 15, se observan los controladores cilíndricos que giran en ambos sentidos, permitiendo mover los soportes o “holders” en las tres direcciones del espacio (X, Y, Z). Por un lado, a la izquierda, la fibra que viene del láser y ya ha sido polarizada, en el polarizador (6), que deforma la fibra provocando birrefringencia, propiedad óptica que resulta de un rayo de luz, dos rayos con polarización perpendicular entre sí. Asimismo, debido al diseño del polarizador (Figura 16.a), uno de los rayos resultantes experimenta una gran caída de potencia y el otro rayo, polarizado en el modo TE, sigue su camino hacia el sensor. Además, el polarizador tiene dos paletas que se pueden mover para encontrar el punto óptico donde la fibra está completamente polarizada, para el cual se maximizan las medidas de potencia [22]. Y, por otro lado, a la derecha, la fibra que va desde la salida del sensor hasta el monitor que mostrará la potencia recibida.



**Figura 16.** a) Polarizador. b) Soporte de los chips conectado al succionador

Por último, en la Figura 16.b podemos ver el soporte conectado al succionador (7) en el que se colocará el chip, permitiendo que este no se mueva mientras se realizan la caracterización o los experimentos. Y, otro controlador (8) que nos permite mover la estructura que soporta el sensor, en altura y profundidad, manteniendo las fibras estáticas.

## 4.2. Programas utilizados

### 4.2.1. Motic Images Plus

Este programa nos permite visualizar la superficie del sensor, para facilitarnos el alineamiento de las fibras en las entradas y salidas del chip, para conseguir de esta forma el punto óptimo, para el cual se maximizan las medidas de potencia. Al iniciar el programa, se abre la ventana que vemos en la Figura 17.a. Y tras pulsar en el botón marcado en la imagen, se activa la cámara pudiendo ver la superficie del sensor con las fibras, que, tras enfocar la superficie, se observa como en la Figura 17.b.

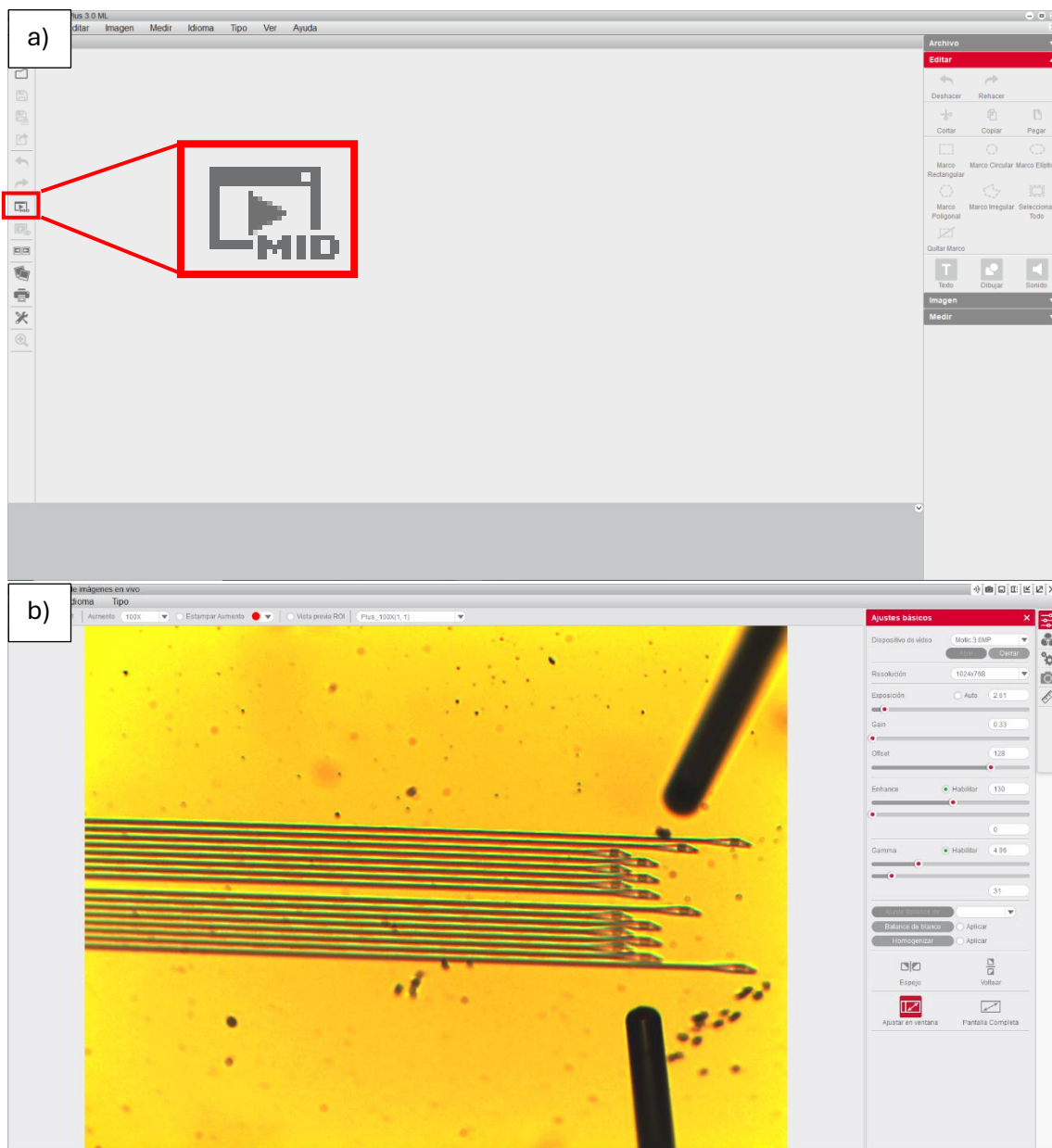


Figura 17. Capturas de las ventanas del programa Motic Images Plus

#### 4.2.2. Setup Tunable Laser

El programa Setup Tunable Laser, nos permite controlar el láser, para poder hacer barridos simples de los espectros y realizar los experimentos de cambio de medio a través del seguimiento del espectro. Y tras un procesado con un programa de Matlab (sensing\_tracking\_generic\_multipeak\_multifolder), que nos permite seguir los picos característicos de las interferencias, detectar si existen cambios de medio y en qué medida. En la Figura 18.a, podemos ver la ventana de “Aligment” que se abre al iniciar el programa y que, tras pulsar la flecha indicada en la figura, se conecta el programa al láser, permitiéndonos modificar sus parámetros. Una vez pulsada la flecha, podemos activar o desactivar el láser y cambiar sus parámetros, como vemos en la Figura 18.b.

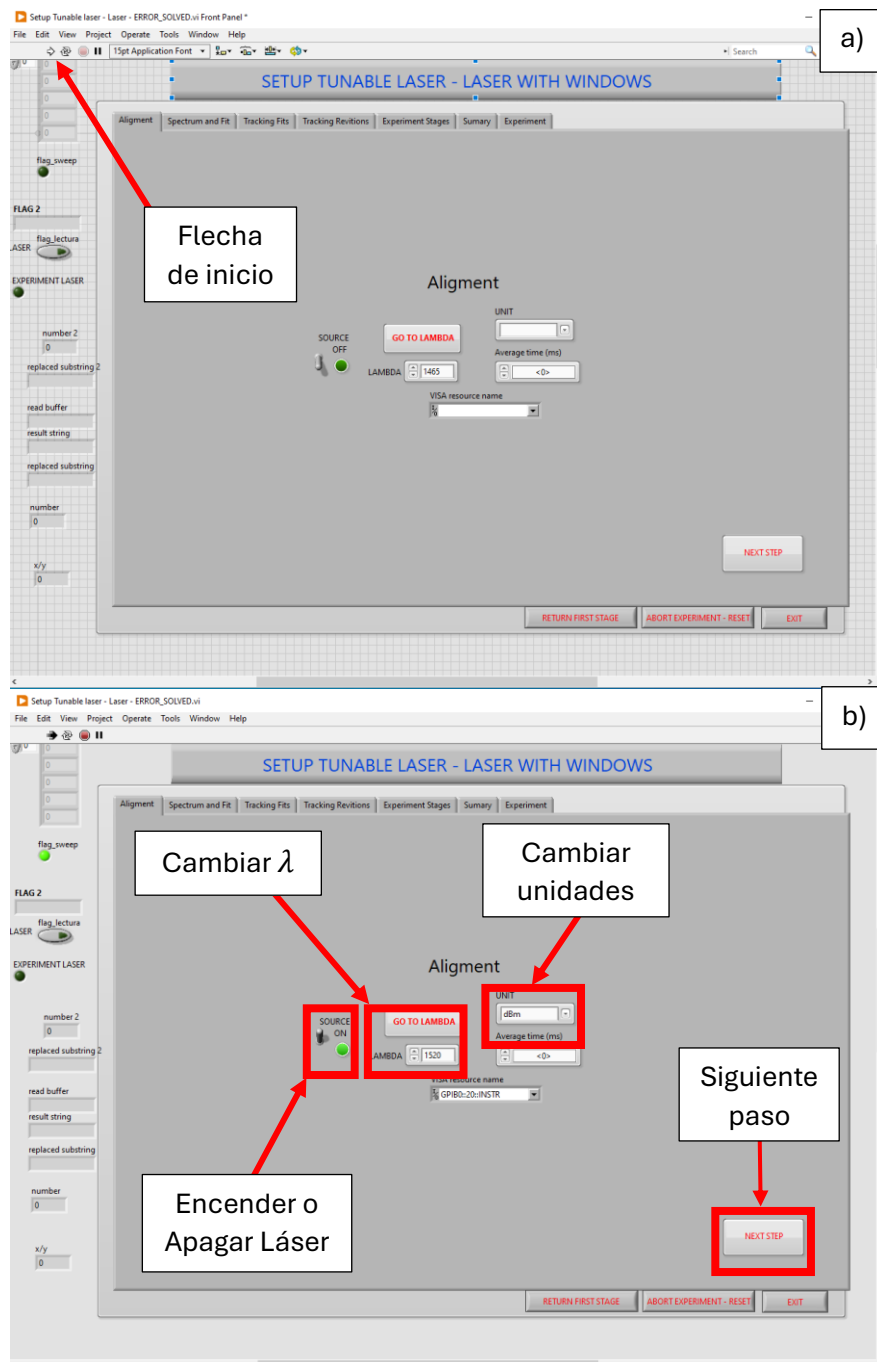


Figura 18. Capturas de la ventana “Aligment” del programa Setup Tunable Laser



Tras pasar al siguiente paso, pasamos a la ventana llamada “Spectrum and Fit”, donde podemos hacer un barrido simple, configurar sus parámetros y guardarlo en un fichero como un fichero de datos o como imagen. Esto podemos verlo en la Figura 19.



Figura 19. Captura de la ventana “Spectrum and Fit” del programa Setup Tunable Laser

Una vez, visto en la anterior ventana, que el espectro sale bien, es decir, con poco ruido y con un buen nivel de potencia, se puede empezar a preparar el experimento. Lo primero, en la ventana de “Tracking Fits” será seleccionar el fichero donde queremos que se nos guarden los espectros a lo largo del tiempo (Figura 20).

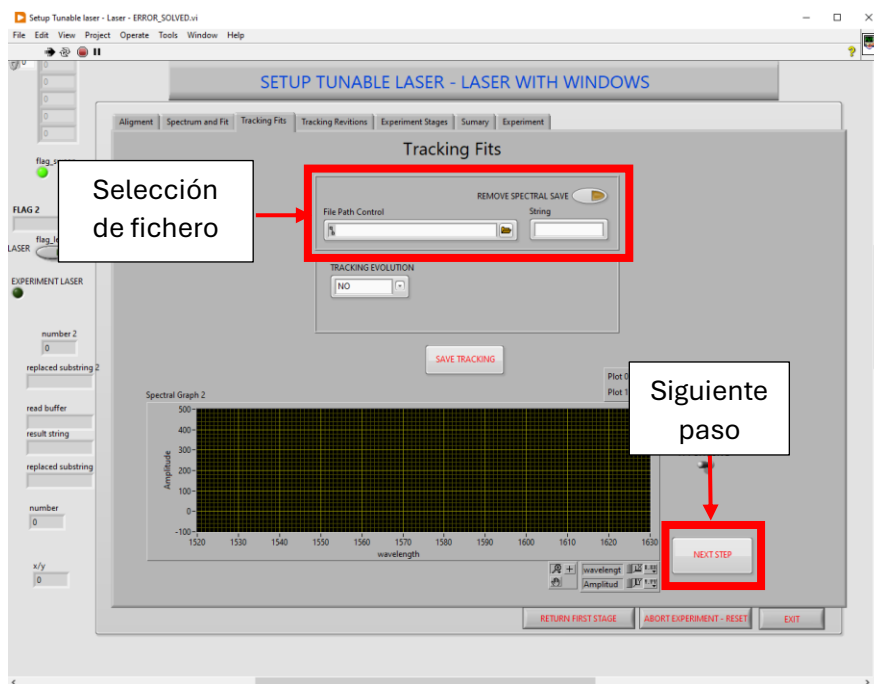


Figura 20. Captura de la ventana “Tracking Fits” del programa Setup Tunable Laser

Después de seleccionar el fichero donde se irán guardando los espectros de nuestro experimento, tenemos que seleccionar en la ventana de “Experiment Stages” (Figura 21) un tiempo relativamente alto, para que no se nos corte el experimento a la mitad.

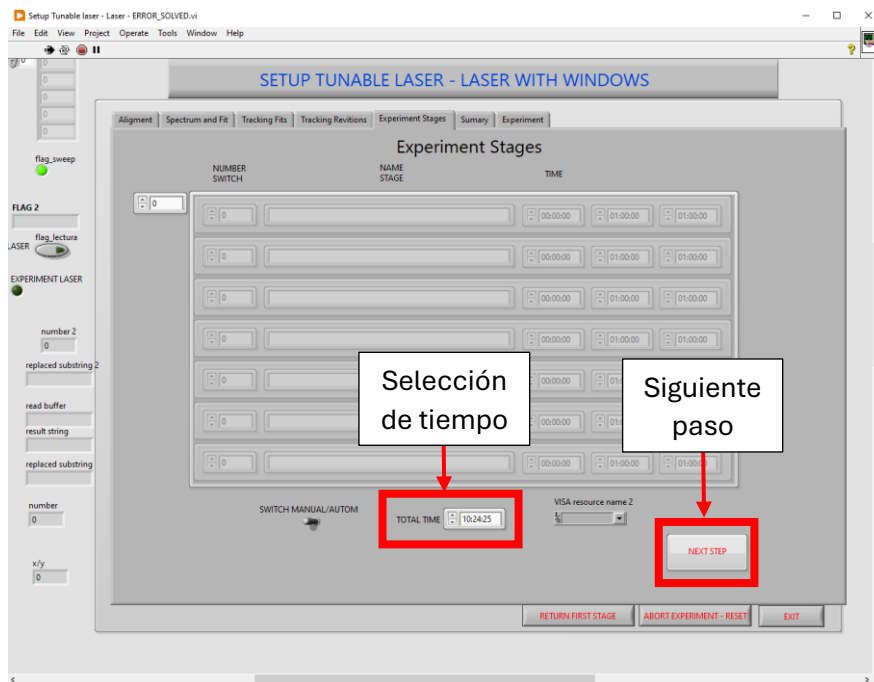


Figura 21. Captura de la ventana “Experiment Stages” del programa Setup Tunable Laser

Una vez seleccionados el fichero y el tiempo del experimento, en la ventana “Summary” seleccionamos los parámetros deseados para hacer los barridos del experimento. En nuestro caso, para todos los experimentos serán los que se observan en la Figura 22. Y, tras esto pulsar el botón “RUN EXPERIMENT”, para comenzar el experimento.

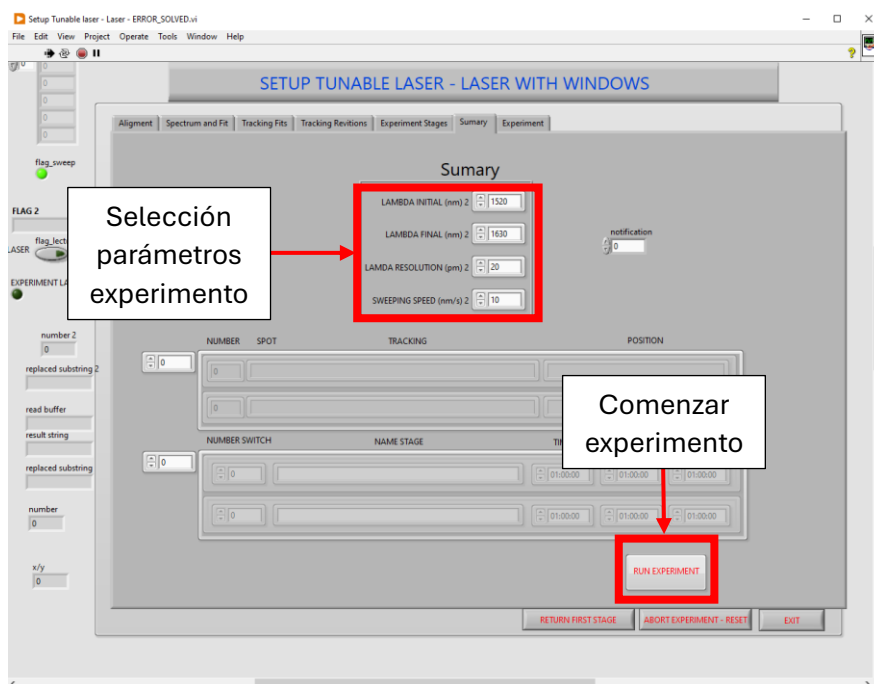


Figura 22. Captura de la ventana “Summary” del programa Setup Tunable Laser

Por último, una vez iniciado el experimento, podemos observar cada barrido que va haciendo el láser, en la ventana llamada “Experiment” (Figura 23), pudiendo seguir la forma de cada espectro, verificando que las fibras no se desalinean, al ver que el espectro se mantiene. Además, una vez acabado el experimento o si este sale mal, se puede parar, pulsando el botón “ABORT EXPERIMENT – EXIT”.

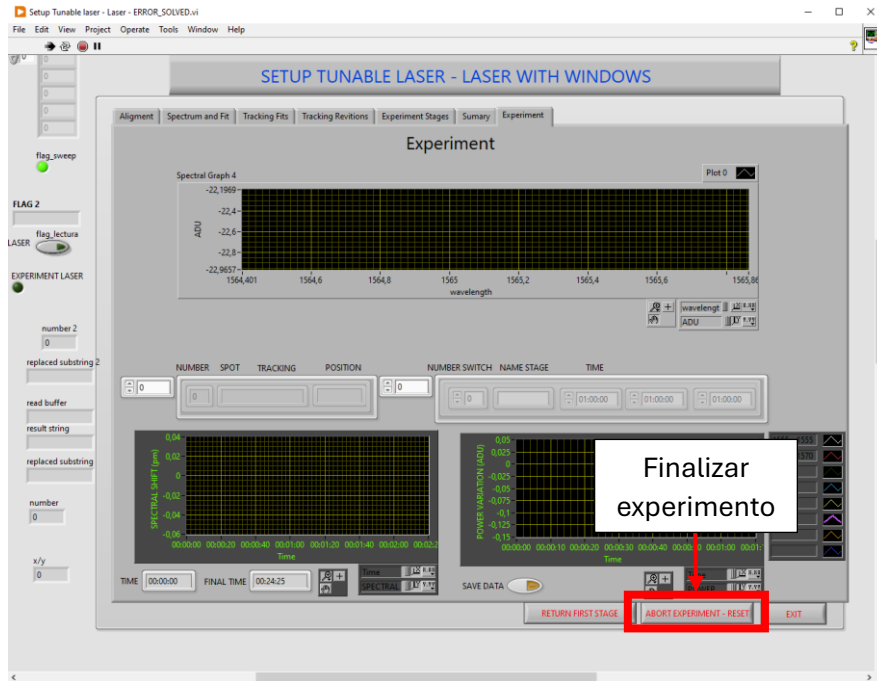


Figura 23. Captura de la ventana “Experiment” del programa Setup Tunable Laser

### 4.3. Chips utilizados

Antes de exponer los resultados de los chips de corrugadas cortas y largas que veremos en el apartado 5. RESULTADOS, vamos a mostrar un modelo representativo de los dos tipos, hecho mediante la aplicación de KLayout, en el cual podremos ver de una forma más clara, la disposición de las guías de onda en la entrada y la salida de los chips.

Por un lado, observando la Figura 24, vemos como en la entrada del chip de corrugadas cortas, a la izquierda, tenemos tres entradas; de arriba a abajo, la primera y la tercera se corresponden a referencias principales del chip, las cuales nos ayudarán a la hora de empezar a alinear las fibras con el chip. La segunda entrada será la que reparta toda la potencia del láser hacia las estructuras corrugadas bimodales de sentido, a las que corresponden la mayoría de las salidas.

Por otro lado, en la salida del chip de corrugadas cortas, a la derecha, tenemos 30 salidas, repartidas en cuatro bloques numerados dependiendo de la posición de las referencias de cada uno de estos. La primera y la última salida, observando de arriba a abajo, se corresponde con la primera y tercera entrada, respectivamente, siendo referencias principales del chip. Asimismo, dentro de cada bloque existen tres tipos de estructura corrugada, las cuales tienen 2 entradas y 2 salidas cada una, además de la referencia de bloque. Estas estructuras se ubican siempre de la misma forma en cada uno de los bloques, siendo la estructura corrugada 1 la más alejada a la referencia de bloque y la 3, la más próxima a la referencia de bloque que sobresale en el diseño.

También, cabe destacar que en las salidas de cada una de las estructuras corrugadas; cross y bar, la interferencia entre las señales presentan un desfase de  $180^\circ$ , es decir, si en una salida, las señales que interfieren se suman, en la otra, se restan (este comportamiento podremos verlo mejor en la caracterización de los chips en agua). En la Figura 24, podemos apreciar la estructura interna del bloque 1, que se repite 4 veces para los cuatro bloques. La idea de que haya cuatro bloques en estos tipos de chips o dos bloques en los chips de corrugadas largas es que cada uno se pueda funcionalizar con un bioreceptor distinto.

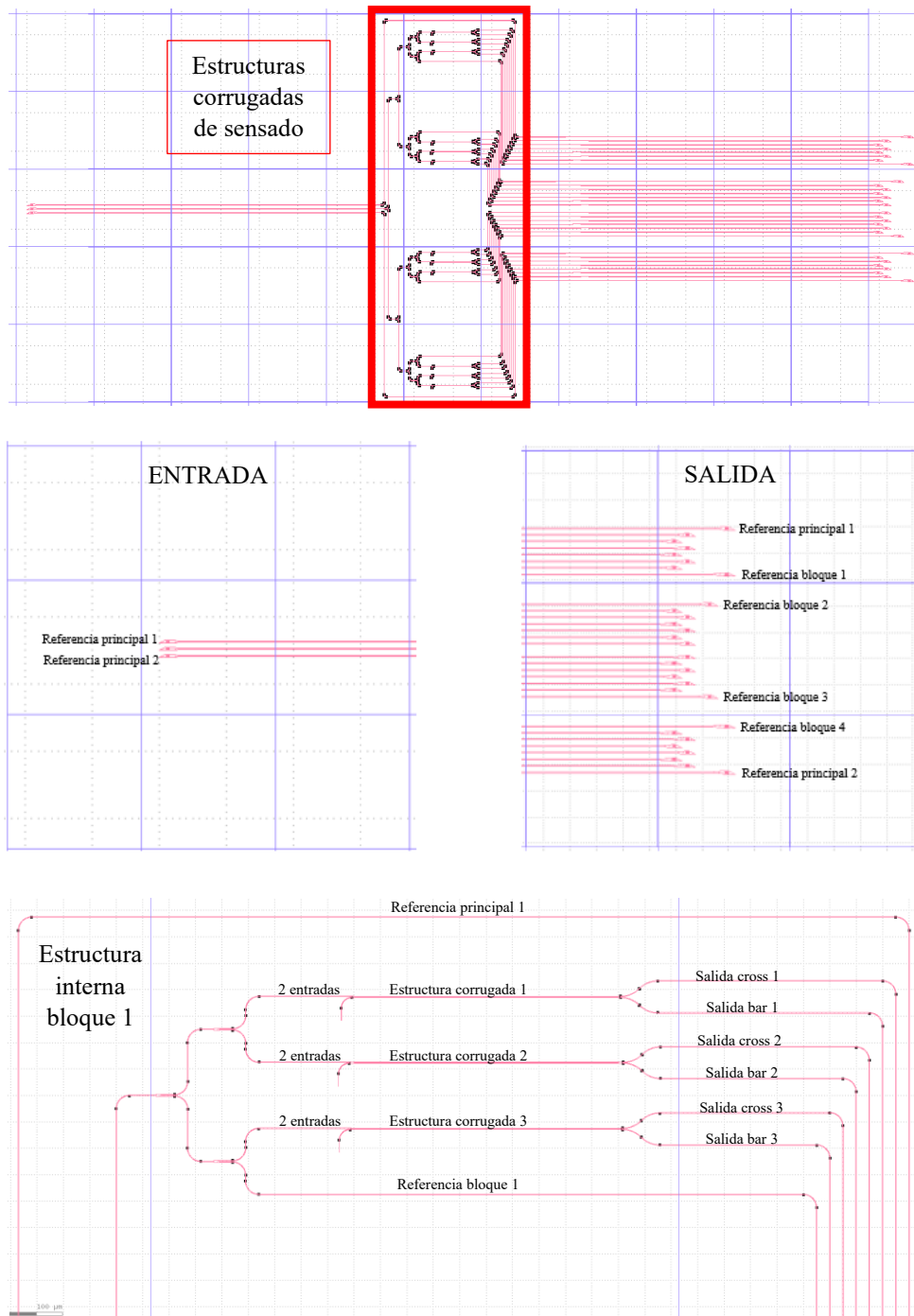


Figura 24. Modelo representativo del chip de corrugadas cortas y sus partes



Una vez visto la estructura correspondiente al chip de corrugadas cortas, veamos ahora la estructura del chip de corrugadas largas, que podremos observar en la Figura 25.

Por un lado, en la entrada del chip de corrugadas largas tenemos tres entradas; de arriba a abajo, la primera y la tercera se corresponde a referencias principales del chip, las cuales nos ayudarán a la hora de empezar a alinear. La segunda entrada será la que reparta toda la potencia del láser hacia las estructuras corrugadas bimodales de sensado, a las que corresponden la mayoría de las salidas, al igual que en el chip de corrugadas cortas.

Por otro lado, en la salida del chip de corrugadas largas tenemos 16 salidas, repartidas en dos bloques numerados dependiendo de la posición de las referencias de bloque, al igual que en el de corrugadas cortas. Así, la primera y la última salida se corresponde con la primera y tercera entrada, respectivamente, siendo referencias principales del chip. Asimismo, al igual que en el chip de corrugadas cortas cada uno de los bloques está formado por tres estructuras corrugadas con dos salidas cada una (cross y bar) y una referencia correspondiente a cada bloque. Sin embargo, la principal diferencia respecto al chip de corrugadas cortas es la longitud de las estructuras corrugadas, que como veremos a continuación es 10 veces mayor, explicando porque están giradas estas.

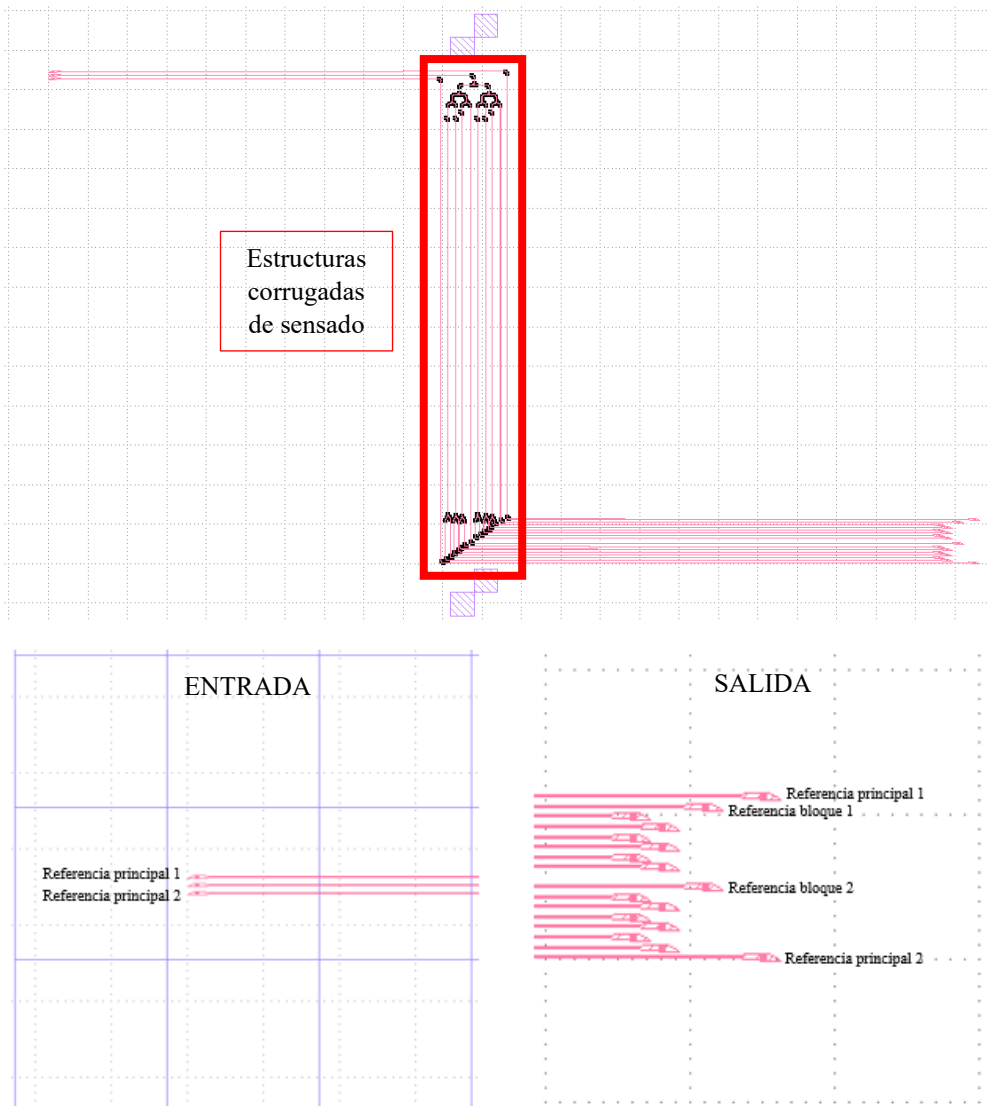
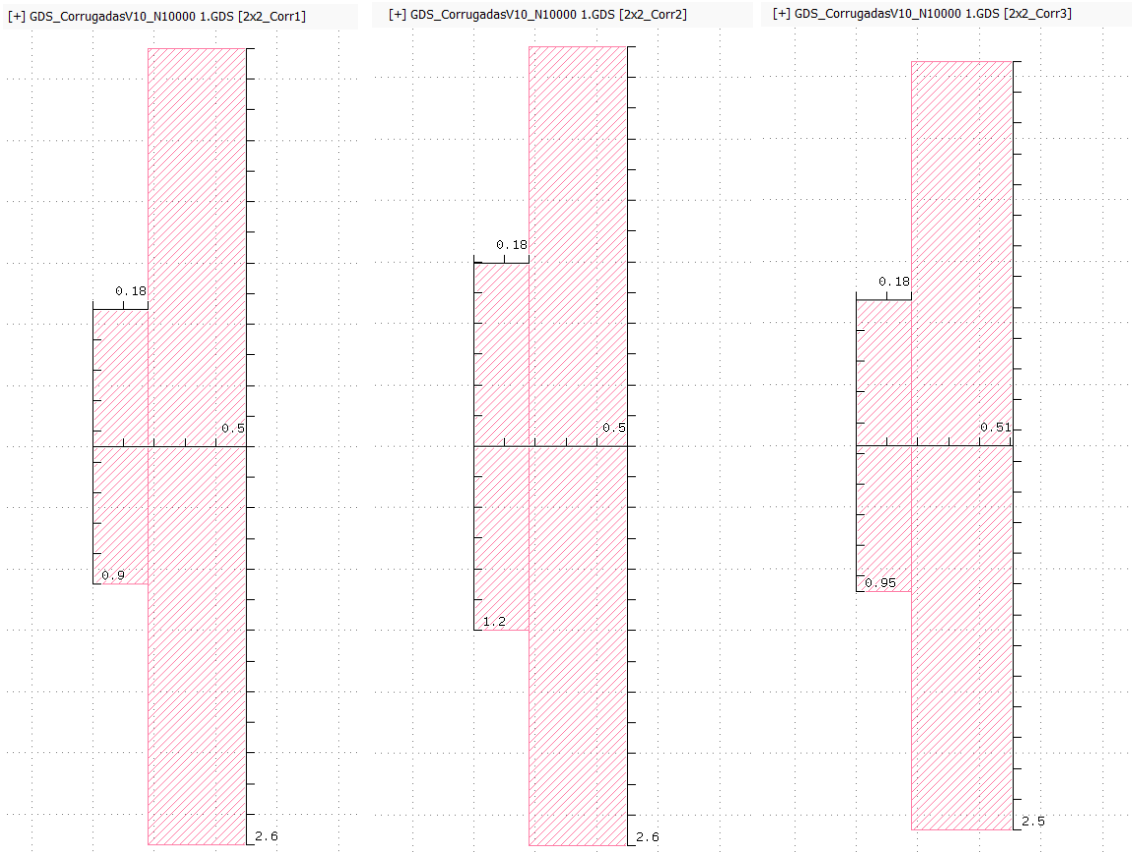


Figura 25. Modelo representativo del chip de corrugadas largas y sus partes

Tras ver la estructura característica de ambos chips, vamos a mostrar las diferencias entre la estructura corrugada de ambos tipos de chips. Como ya hemos mencionado antes, estos se diferencian, por el número de repeticiones de la estructura corrugada, donde los chips de corrugadas cortas tienen una longitud de 1000 repeticiones (1000 periodos de la corrugada), mientras que los chips de corrugadas largas tienen una longitud de 10000 repeticiones (10 veces más que las corrugadas cortas). Debido a que la longitud es proporcional a la sensibilidad, en los experimentos de variación de fase a una longitud de onda, podremos ver si los chips de corrugadas largas son más sensibles que los chips de corrugadas cortas.

Después, dentro de cada uno de los bloques de ambos chips, encontramos tres tipos de corrugadas, iguales para ambos chips, que podemos observar en la Figura 26. Primero, la estructura corrugada 1, cuyas salidas cross y bar están ubicadas más alejadas de las referencias de bloque. Segundo, la estructura corrugada 2, que queda en medio. Y, la estructura corrugada 3, cuya pareja de salidas cross y bar se ubica más próxima respecto de las referencias de bloque (Figura 24). Estas tres se diferencian entre sí, por el tamaño de los elementos que constituyen la estructura corrugada (las medidas en el rango de  $\mu\text{m}$ ).



**Figura 26.** Representación de los tres tipos de estructuras corrugadas

## 4.4. Proceso de medida

### 4.4.1. Trayectoria de la luz

Antes de empezar a ver el proceso de medida de nuestros sensores, es importante conocer el trayecto que sigue la luz a través de los distintos elementos del laboratorio. Primero, la luz sale del láser, pasando a través de una fibra monomodo (de unos 10  $\mu\text{m}$  de diámetro). Después, la luz llega al polarizador, permitiendo que la luz a la salida de la fibra tenga una polarización en el modo TE a la hora de acoplar al chip. Así, la luz sigue su camino hasta llegar a los “holders”, que sujetan la fibra acoplándola a una de las entradas de uno de los sensores (con un ángulo entre 8° y 10° sobre la normal. En las entradas y salidas del sensor, existe un elemento llamado “grating coupler” que permite a la luz que llega verticalmente al mismo, acoplarse a las guías de onda del sensor [23]. A continuación, la luz recorre todo el sensor, pasando por los “tapers” a las estructuras corrugadas, por donde se propagan dos modos (el fundamental y el de orden superior) que interfieren al final de las corrugadas. Finalmente, realiza el proceso inverso, pasando del “grating coupler” a la segunda fibra (igual que la primera, monomodo de 10  $\mu\text{m}$  de diámetro), hasta llegar al medidor de potencia que mostrará la potencia recibida en dBm, por la pantalla del multímetro óptico modelo 8163B.

### 4.4.2. Alineamiento de las fibras

Para poder medir los chips de forma óptima, debemos alinear las fibras con los “grating couplers”. Para este proceso, se configura el láser para que emita a una longitud de onda concreta, con el programa Setup Tunable Laser, en la ventana de “Aligment”, vista antes. Tras configurar el láser, se alinean las fibras de forma manual, a través de los controladores cilíndricos, a los *grating couplers*. Estas fibras en un primer momento se colocan sobre los *grating couplers*, pero, para conseguir un alineamiento óptimo, se necesita observar el medidor de potencia, pues la potencia recibida será máxima cuando las fibras estén perfectamente alineadas.

### 4.4.3. Caracterización de los sensores

Después de que las fibras estén correctamente alineadas, se pueden caracterizar todas las salidas del chip. El proceso de caracterización que veremos en el apartado 5. RESULTADOS, consiste en transmitir luz en un rango de longitudes de onda, registrando la potencia recibida para cada una de ellas, generando un gráfico de potencia (dBm) respecto a longitud de onda (nm). Esta caracterización se realiza mediante el programa Setup Tunable Laser, en el cual especificamos el rango del barrido (de 1520 a 1630 nm), la resolución buscada (20 pm) y la velocidad a la que el láser cambiará de longitud de onda (10 nm/s), es decir, unos 10 segundos aproximadamente para hacer cada barrido.

## 5. RESULTADOS

A lo largo de este apartado, vamos a ir exponiendo los datos obtenidos para los distintos chips de los dos tipos objeto de estudio, los chips de corrugadas cortas y los de corrugadas largas. Tras esto seleccionaremos los chips para los experimentos, el 1º el tracking espectral midiendo en el espectro, y el 2º midiendo en potencia a una longitud de onda.

Antes de empezar a mostrar la caracterización en aire de los cinco chips de corrugadas cortas y de los cinco chips de corrugadas largas, para ver como funcionan y elegir los que mejor se comporten para los experimentos, vamos a mostrar la posición en la oblea de los chips utilizados para obtener los resultados. Esto lo podemos ver en la Figura 27. Cabe destacar que esta oblea se diseñó y fabricó en las instalaciones del NTC, antes de que se iniciase este TFG. Asimismo, en la Figura 28, podemos observar un par de fotografías de la oblea usada en el laboratorio.

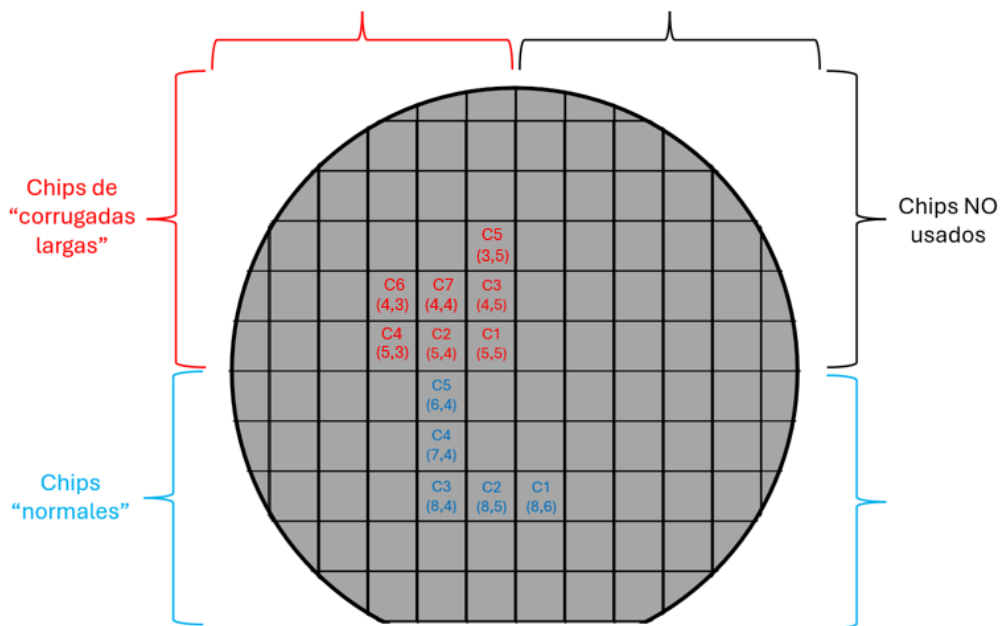


Figura 27. Modelo representativo de la oblea de chips y posición de los chips usados

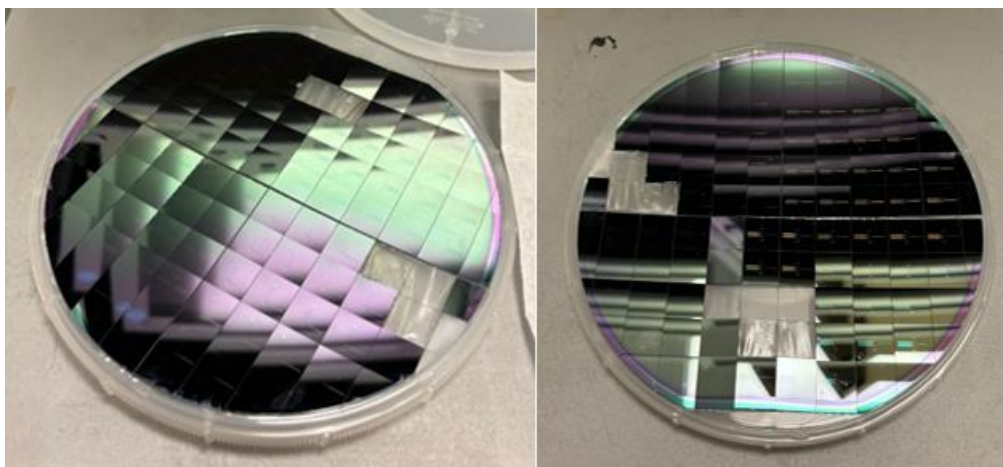
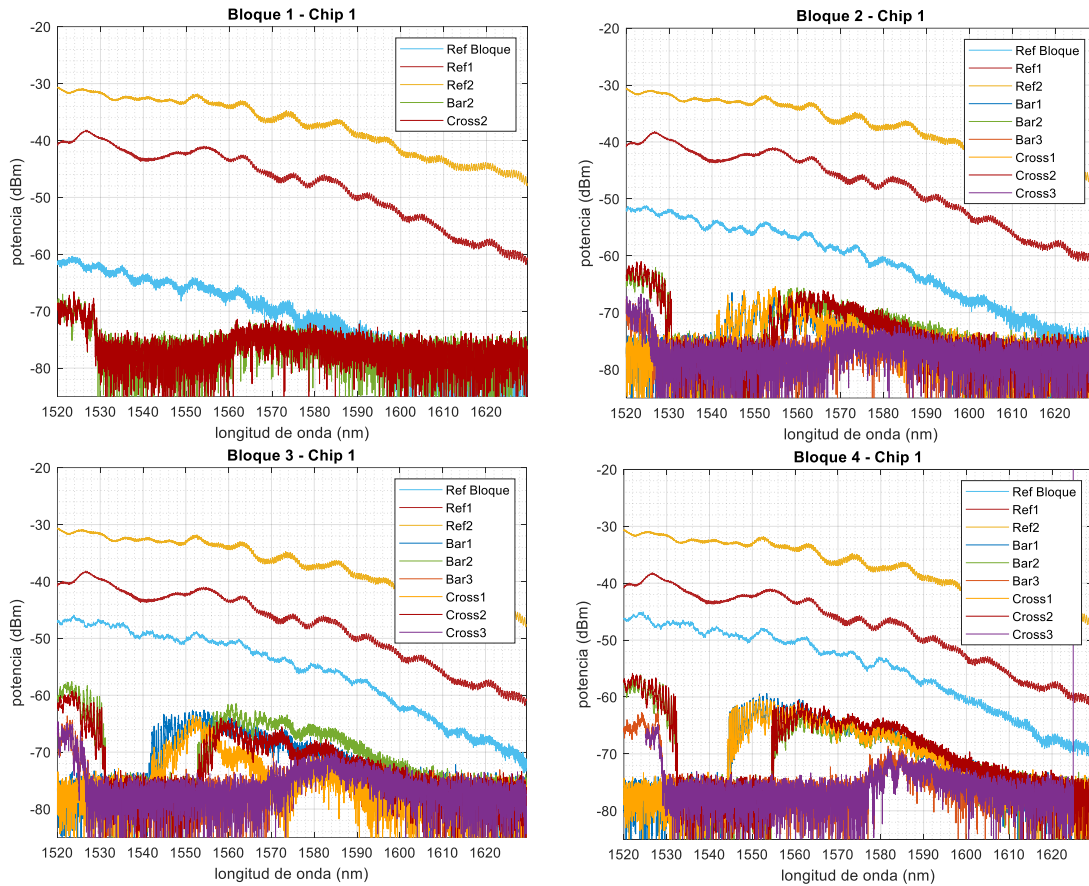


Figura 28. Fotografías de la oblea usada en el laboratorio

## 5.1. Chips de corrugadas cortas

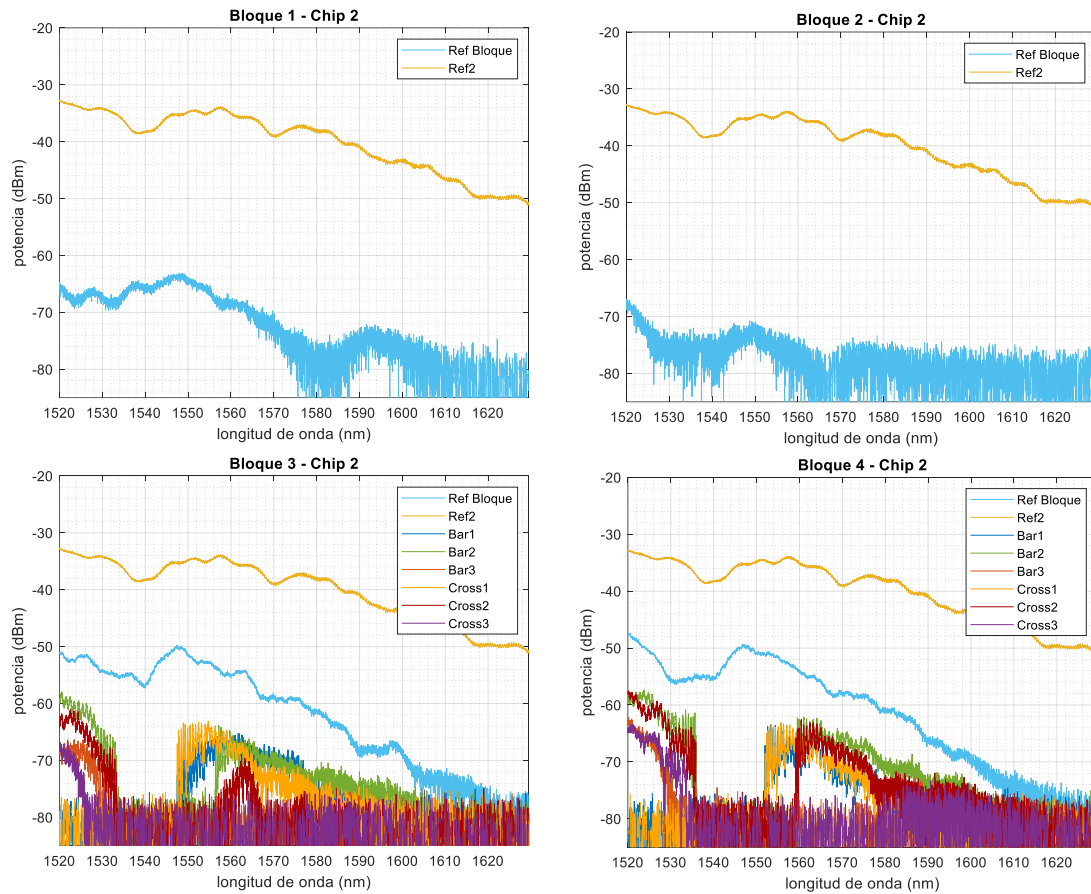
Tras haber visto, la disposición de los distintos chips utilizados sobre la oblea. Nos disponemos, a mostrar los resultados correspondientes a los espectros de las salidas de los cinco chips de corrugadas cortas en aire. En primer lugar, empezamos por el chip 1 y sus cuatro principales bloques, que podemos apreciar en la Figura 29.



**Figura 29.** Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 1 de corrugadas cortas

De las anteriores gráficas, podemos ver que las referencias principales (Ref1 y Ref2) que nos sirven para optimizar la medida en el setup fibra-fibra presentan valores bastante aceptables de potencia, aunque entre estas hay una diferencia de potencia de unos 10 dBm. Asimismo, podemos ver que la referencia de cada uno de los bloques (Ref Bloque), presenta una potencia inferior en comparación a las referencias principales del chip 1, esto tiene sentido, pues en estas el haz del láser ya se ha ramificado en las distintas guías de onda. También, en las gráficas de cada bloque, podemos ver las salidas a pares de las estructuras de corrugadas denominadas cross y bar, las cuales en aire presentan la zona de no transmisión o PBG en la misma región del espectro del infrarrojo cercano. Cabe destacar que en este chip, en el bloque 1, no pudimos obtener potencia en algunas de las salidas cross y bar. Pues al intentar medirlas no obteníamos ningún valor de potencia, pudiendo deberse a que las guías de onda del bloque estuviesen en mal estado o a que la medida no se estuviese haciendo bien.

Una vez visto, los espectros correspondiente al chip 1, pasamos a ver en la Figura 30 los de los distintos bloques del chip 2 en aire.

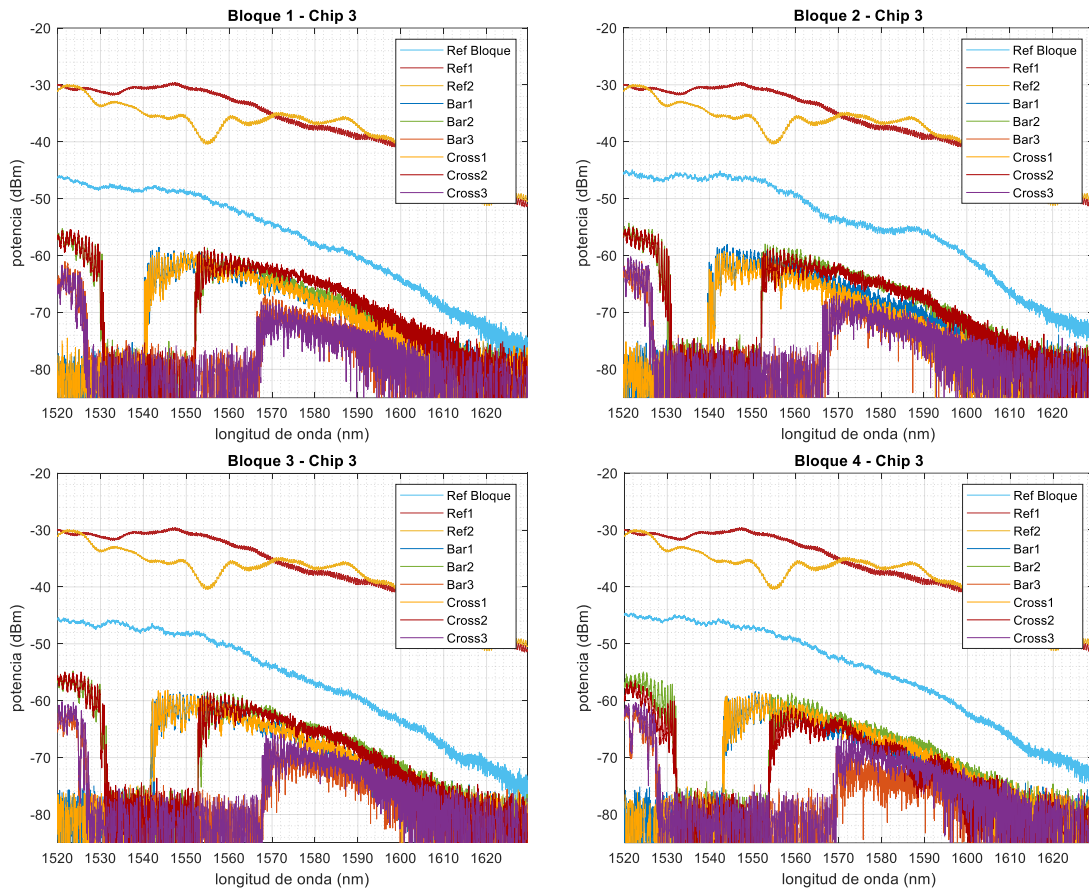


**Figura 30.** Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 2 de corrugadas cortas

Podemos observar, que en este chip 2 solamente obtenemos valores de potencia en una de las referencias principales (Ref2). Asimismo, podemos ver que la referencia de cada uno de los bloques (Ref Bloque), presenta una potencia inferior en comparación a la referencia principal 2 del chip 2. También, en las gráficas de cada bloque, podemos ver las salidas a pares, cross y bar. Sin embargo, en este chip, en los bloque 1 y 2, no pudimos obtener potencia en ninguna de las salidas cross y bar. Pues al intentar medir en sus salidas, no obteníamos ningún valor de potencia. Al igual que en el chip 1, esto pudo deberse a que las guías de onda de estos bloques no estuviesen en buen estado o a que la medida no se estuviese realizando de forma correcta.



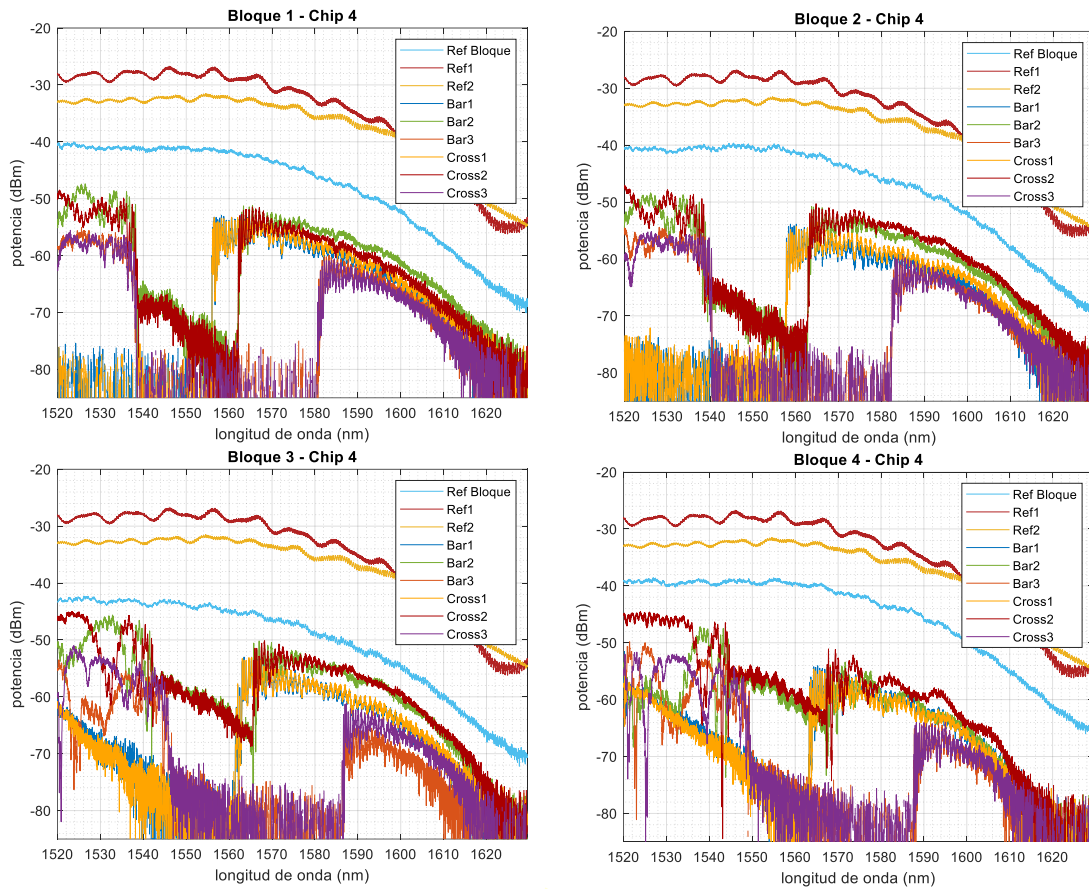
En tercer lugar, podemos observar los espectros correspondientes a las salidas, del chip 3 de corrugadas cortas en aire. Esto lo podemos ver en la Figura 31.



**Figura 31.** Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 3 de corrugadas cortas

A simple vista, este chip 3 presenta mayores valores de potencia con respecto a los dos anteriores. Por una parte, sus dos referencias principales (Ref1 y Ref2), presentan valores de potencia altos en aire. Y, por otra parte, en los cuatro bloques de este chip, podemos ver claramente las representaciones gráficas en potencia de su referencia y de todas las salidas a pares cross y bar, con sus zonas de no transmisión en aire fácilmente diferenciables.

En cuarto lugar, en la Figura 32 podemos apreciar los espectros de las salidas de los distintos bloques del chip 4 en aire.

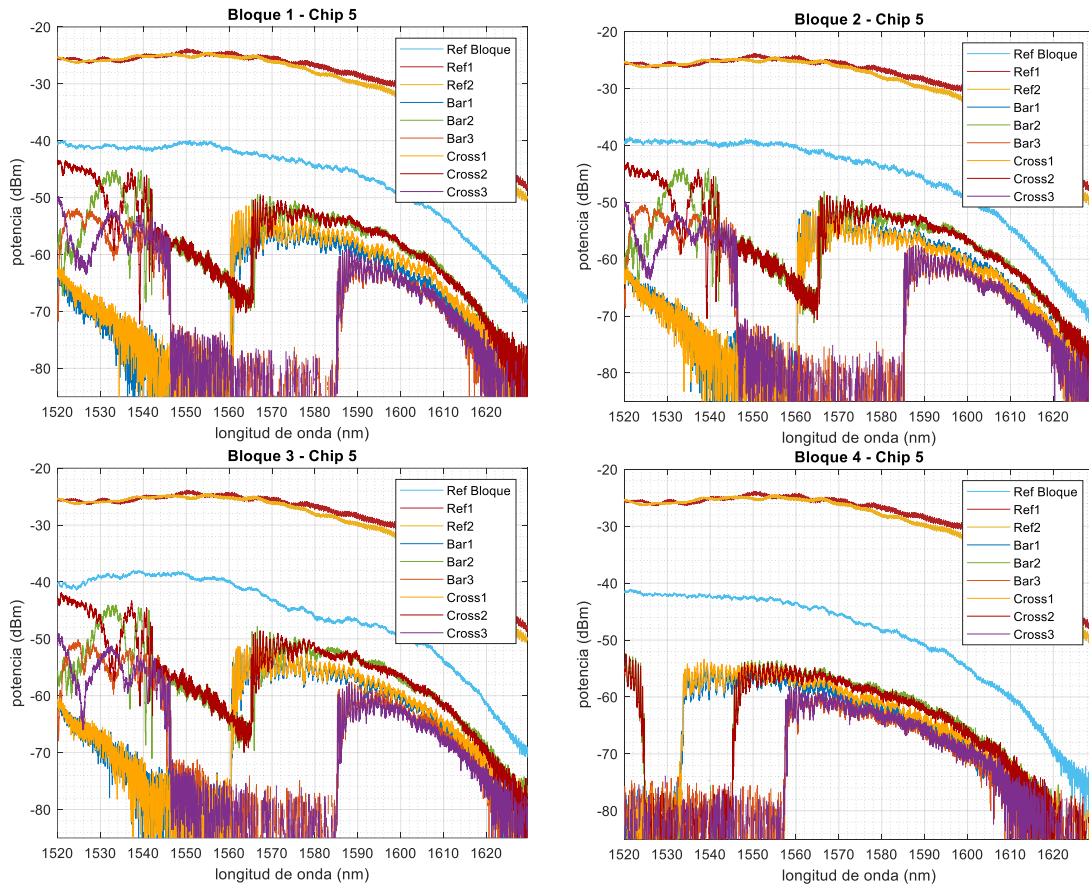


**Figura 32.** Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 4 de corrugadas cortas

En las anteriores gráficas, podemos observar como la potencia en las referencias principales es bastante aceptable, aunque es ligeramente mayor en la Ref1 que en la Ref2. Al igual que en el chip 3, en los cuatro bloques de este chip, podemos ver claramente las representaciones gráficas en potencia de su referencia y de todas las salidas a pares cross y bar, con sus zonas de no transmisión en aire fácilmente diferenciables. Sin embargo, en algunas de las zonas de no transmisión, se acopla un modo que no debería estar. Asimismo, en este chip en los bloques 3 y 4, podemos ver como entre las longitudes de onda de 1520 a 1550 nm se obtienen una serie de picos, que no aparecen en los anteriores chips. Estos picos se corresponden a las interferencias constructivas o destructivas bimodales entre los dos caminos ópticos, picos que no deberían aparecer, pues los chips utilizados están preparados para su uso fluyendo agua y no en aire.



Por último, en cuanto a los chips de corrugadas cortas, podemos ver los espectros correspondientes a las salidas de los distintos bloques del chip 5 en aire, en la Figura 33.



**Figura 33.** Espectros en aire de las salidas de los cuatro bloques del chip 5 de corrugadas cortas

En el chip 5 en aire, podemos ver que las referencias principales del chip presentan un nivel de potencia bastante elevado, siendo las dos muy similares. En cuanto a las referencias de cada uno de los bloques del quinto chip, cabe destacar que es de en torno a 5 dBm más que en el resto de los chips. Además, en este chip en los bloques 1, 2 y 3 podemos ver también, que, entre las longitudes de onda de 1520 a 1550 nm, se obtienen una serie de picos corresponden a las interferencias bimodales. Al igual que en el chip 4, estos picos y valles característicos no deberían aparecer, pues estos chips están diseñados para sensar en agua.

## 5.2. Chips de corrugadas largas

Uteriormente de haber presentado los espectros respectivos a los chips de corrugadas cortas, nos disponemos a mostrar los resultados correspondientes a los espectros en longitud de onda de los chips de corrugadas largas en aire. En primer lugar, comenzamos por el chip 1 y las salidas de sus dos principales bloques en aire, esto podemos apreciarlo en la Figura 34.

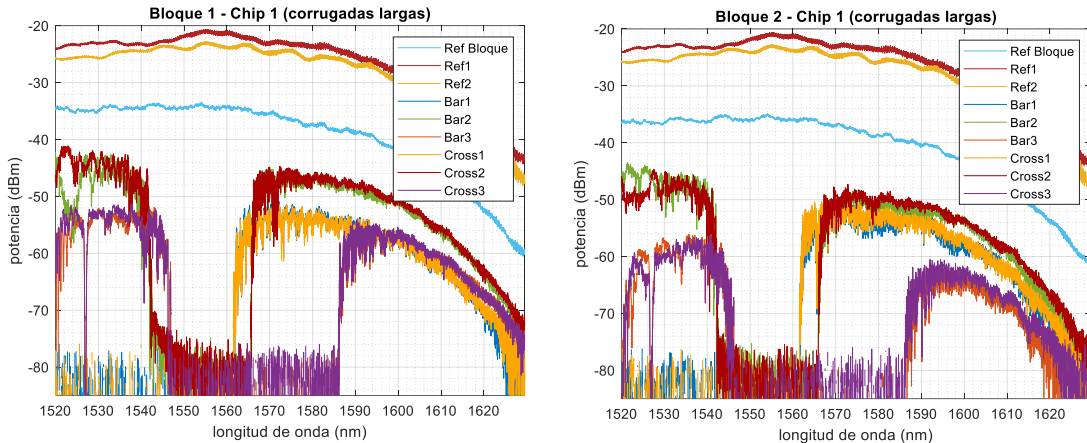


Figura 34. Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 1 de corrugadas largas

De las anteriores gráficas, podemos ver que las referencias principales (Ref1 y Ref2) que al igual que en los chips de corrugadas cortas, nos sirven para optimizar la medida en el setup fibra-fibra, presentan valores bastante aceptables de potencia, siendo sus valores muy similares. Asimismo, podemos ver que la referencia de cada uno de los dos bloques (Ref Bloque), presenta una potencia inferior en comparación a las referencias principales. Además, en las gráficas de cada bloque, podemos ver las salidas a pares de las estructuras de corrugadas, las salidas cross y bar, las cuales en aire presentan la zona de no transmisión en la misma región del espectro del infrarrojo cercano.

En segundo lugar, podemos ver en la Figura 35 las gráficas correspondientes a los espectros de las salidas de los bloques del chip 2 en aire.

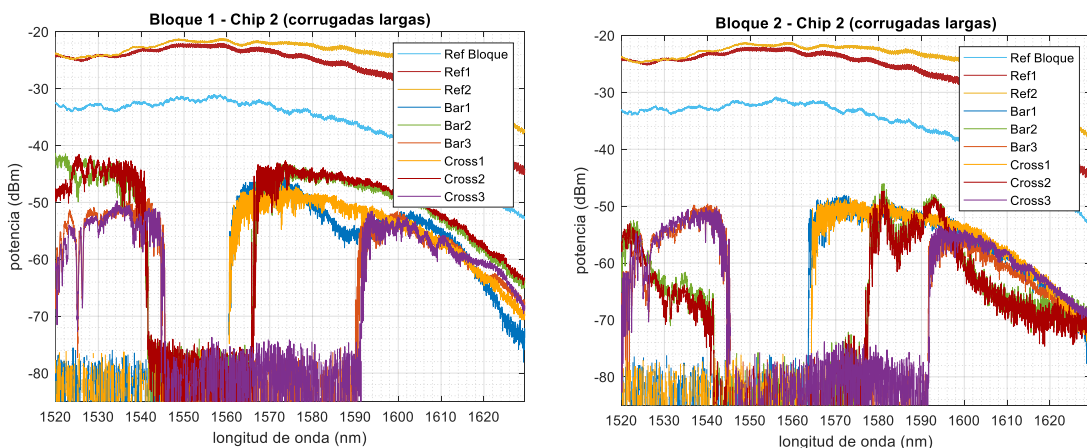
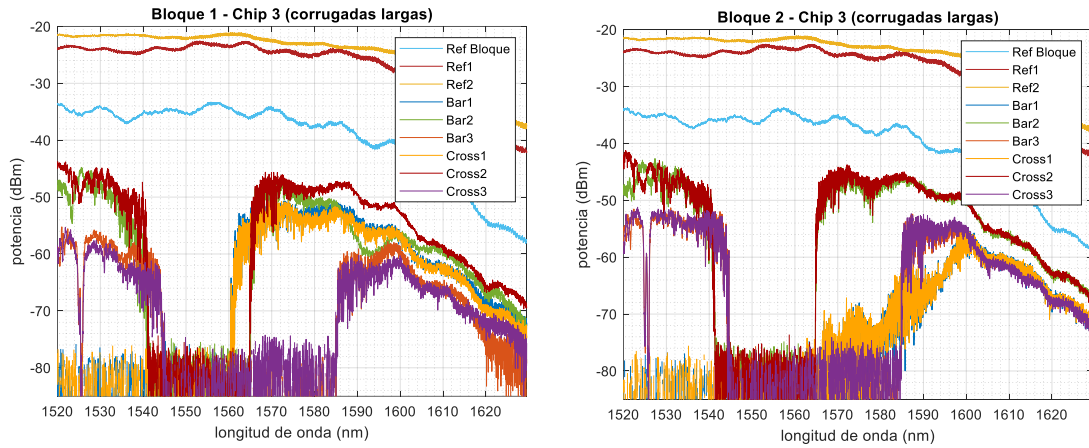


Figura 35. Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 2 de corrugadas largas

Al igual que en el chip 1, sus referencias principales presentan valores altos de potencia en aire. Además, este chip 2 presenta valores similares de potencia en sus dos bloques, con respecto al chip anterior. Por lo que podemos ver claramente las representaciones

gráficas en potencia de su referencia y de todas las salidas a pares cross y bar, con sus zonas de no transmisión en aire fácilmente diferenciables.

En tercer lugar, podemos observar en la Figura 36 los espectros correspondientes a las salidas de los bloques del chip 3 de corrugadas largas en aire.



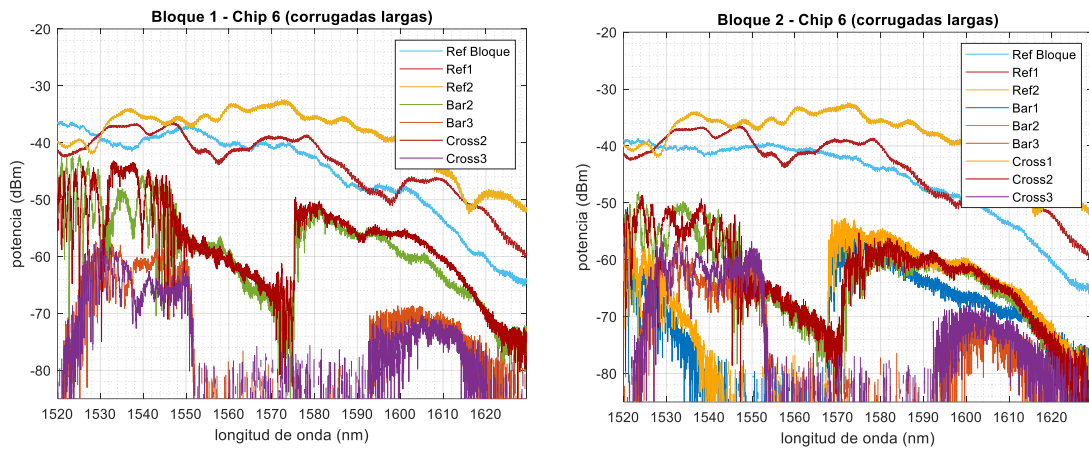
**Figura 36.** Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 3 de corrugadas largas

En este tercer chip, vemos como las referencias principales tienen niveles de potencia bastante altos, siendo la Ref2 algo mayor. Además, podemos apreciar como en los dos bloques se ven todos los espectros correspondientes a las salidas cross y bar a pares y a la referencia de cada uno de los bloques. No obstante, las salidas Bar1 y Cross 1 del bloque 2 no presentan la zona de no transmisión tan marcada como el resto.

Después, de haber caracterizado 3 chips de corrugadas largas, intentamos caracterizar 2 más, para así tener el mismo número de chips de un tipo que de otro. Sin embargo, en los dos siguientes chips que cogimos, los número 4 y 5, no conseguimos caracterizar los espectros de casi ninguna de las salidas. Cuando colocamos estos chips en el setup y lo visualizamos por la cámara, estos tenían excesiva suciedad impregnada en su superficie, pudiendo deberse a que cuando se cortó la oblea con la sierra, para separar los chips, no se protegieran debidamente.

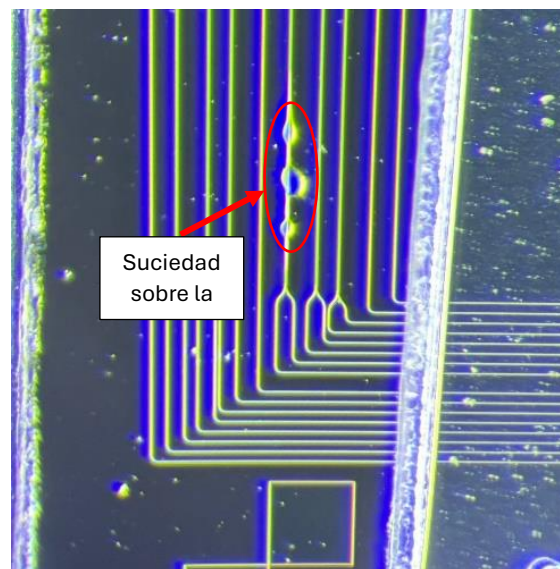
Al ver esto intentamos limpiarlos, primero echando un poco de isopropanol sobre la superficie, después quitando el sobrante con agua ultrapura, y, por último, retirando todo resto de líquido con la pistola de soplado de aire comprimido. De esta forma, la superficie de los chips quedó bastante limpia. Sin embargo, intentamos colocar de nuevo estos chips sobre el setup, pero al alinear las fibras con la entrada y la salidas, no obtuvimos valores de potencia.

Tras esto, probamos a coger otro chip de la oblea, el chip 6, y con este si que pudimos observar los espectros en aire de casi todas sus salidas. Estos espectros podemos visualizarlos en la Figura 37.



**Figura 37.** Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 6 de corrugadas largas

En los anteriores espectros en aire del chip 6 de corrugadas largas, podemos ver como las referencias principales (Ref1 y Ref2) para los dos bloques, tienen menos potencia con respecto a los anteriores chips. Asimismo, la referencia de cada uno de los bloques, presenta una potencia similar a las referencias principales. Además, al igual que en los anteriores chips, las salidas cross y bar correspondientes a los bloques se visualizan de forma correcta, aunque aparecen las interferencias bimodales en aire. No obstante, en el bloque 1, en las salidas Cross1 y Bar1, no pudimos obtener los espectros debido a que sobre las guías de onda de estas, había suciedad impregnada. En la Figura 38, podemos ver la superficie del chip con las guías de onda a través de un microscopio del laboratorio.



**Figura 38.** Superficie del chip 6 de corrugadas largas visto con microscopio

Por último, de los chips de corrugadas largas, cogimos el chip 7, que podemos ver en la Figura 39, para caracterizar sus salidas en aire como el resto.

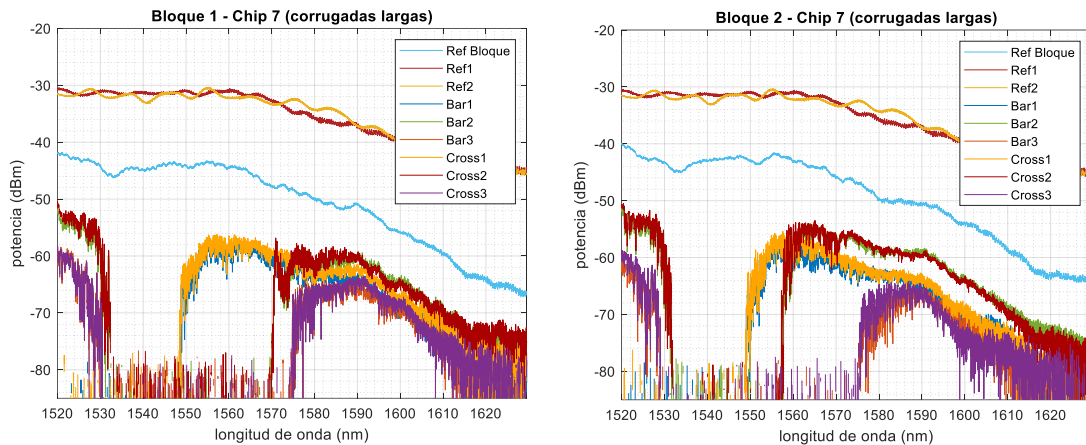


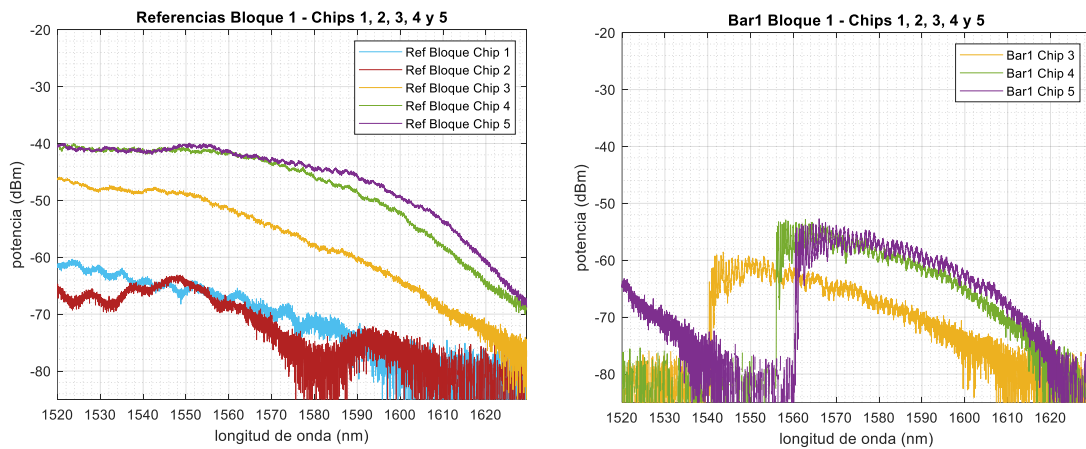
Figura 39. Espectros en aire de las salidas de los dos bloques del chip 7 de corrugadas largas

De este último chip, cabe destacar que sus referencias principales tienen un valor mayor de potencia que el chip anterior. También que podemos ver todos los espectros de todas las salidas de los dos bloques, aunque presenta una ligera menor potencia que en el resto de los chips de corrugadas largas.

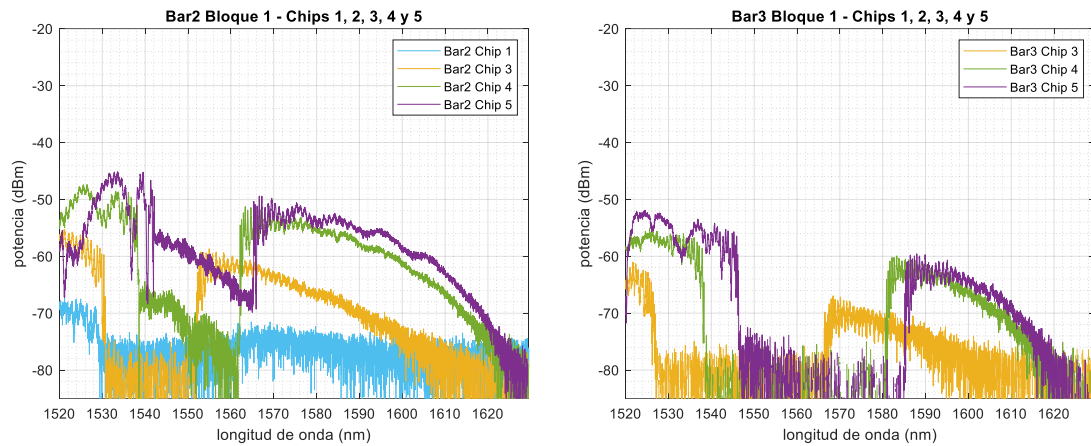
### 5.3. Comparación entre los chips de corrugadas cortas

Una vez visto todos los espectros de 5 chips de corrugadas cortas y de 5 chips de corrugadas largas, nos disponemos a comparar las salidas de cada uno de los chips para ambos tipos. Para posteriormente, poder elegir el chip más adecuado de cada uno de los tipos, para hacer los experimentos con microfluídica. Para ello, primero iremos comparando cada uno de los bloques de los chips de corrugadas cortas, haciendo una comparación entre sus referencias de bloque y solamente las salidas bar de las tres parejas de corrugadas, pues las salidas cross son muy similares a estas.

Empezamos comparando las salidas bar y las referencias de los bloques 1 de los 5 chips de corrugadas cortas. Esta comparación la podemos ver en la Figura 40.



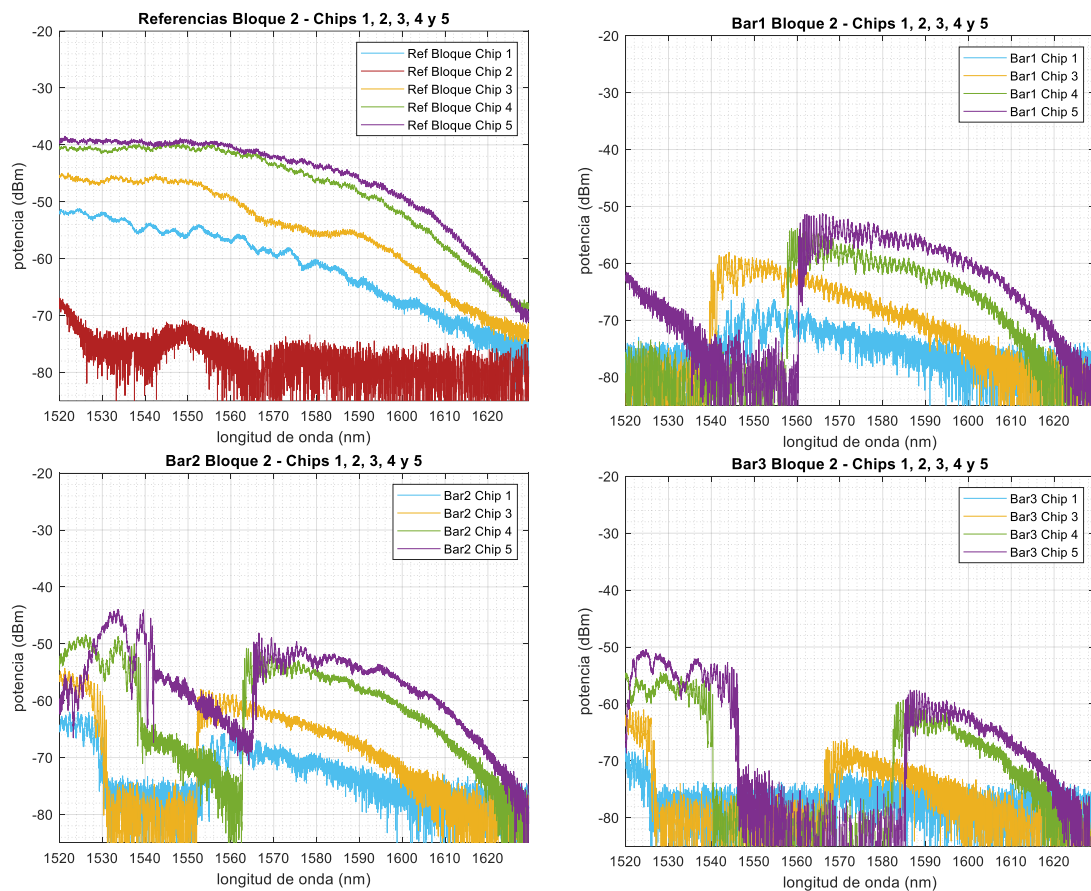




**Figura 40.** Comparación de las salidas del bloque 1 entre los cinco chips de corrugadas cortas

En las anteriores cuatro gráficas podemos observar como para el chip 3, 4 y 5 obtenemos valores de potencia en todas las salidas del bloque, mientras que en las salidas Bar1 y Bar3 no obtenemos valores de potencia para los otros dos chips. Asimismo, tampoco obtenemos, en la salida Bar2, valores de potencia para el chip 2. Además, cabe destacar que los niveles de potencia son superiores para los chips 4 y 5 en todas las salidas del bloque.

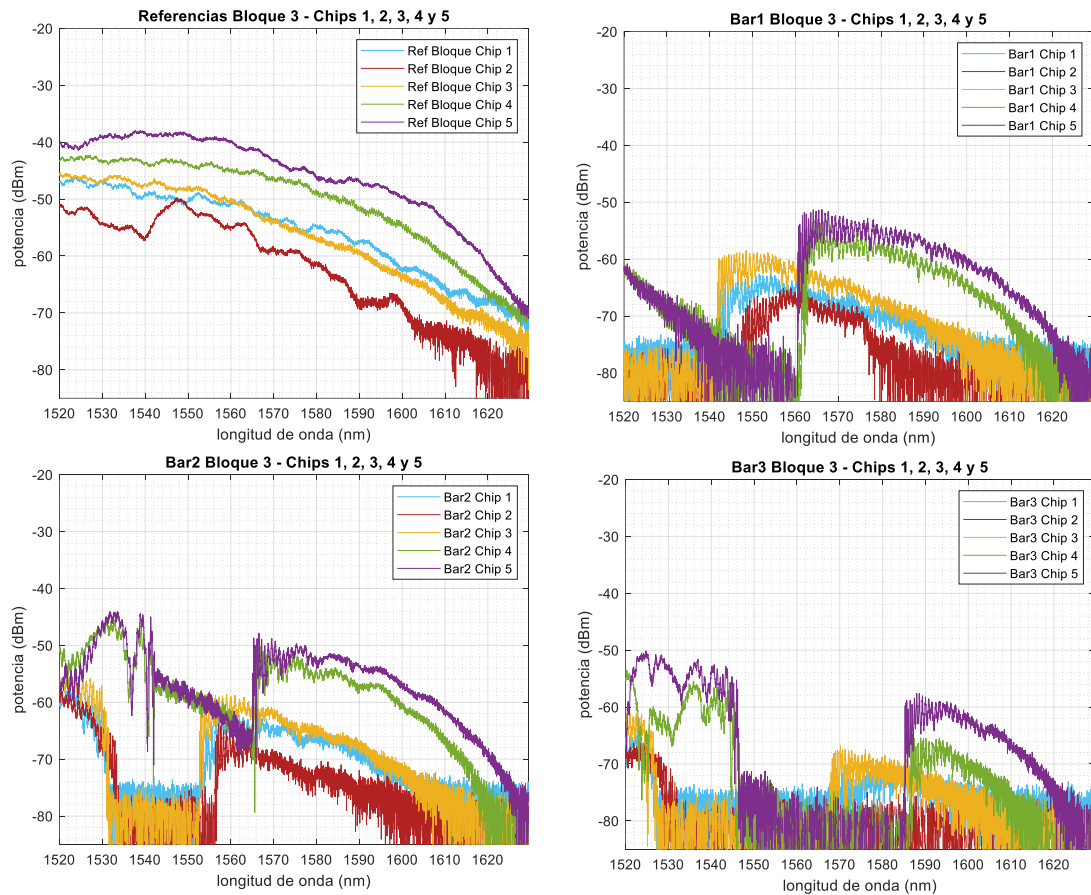
Después, de haber visto las gráficas correspondientes a los bloques 1 de los chips, pasamos a observar en la Figura 41, las gráficas de los espectros de las salidas bar y las referencias de los bloques 2, de los 5 chips.



**Figura 41.** Comparación de las salidas del bloque 2 entre los cinco chips de corrugadas cortas

Al igual que en anterior bloque, vemos como para los chips 1, 3, 4 y 5 obtenemos valores de potencia para todas sus salidas. Mientras que para el chip 2, no conseguimos obtener potencia en ninguna de sus salidas bar; esto tiene sentido, pues la referencia de bloque para este chip presenta valores de potencia muy bajos. Asimismo, y como pasaba en el anterior bloque, los chips 4 y 5 presentan mayores valores de potencia en todas las salidas.

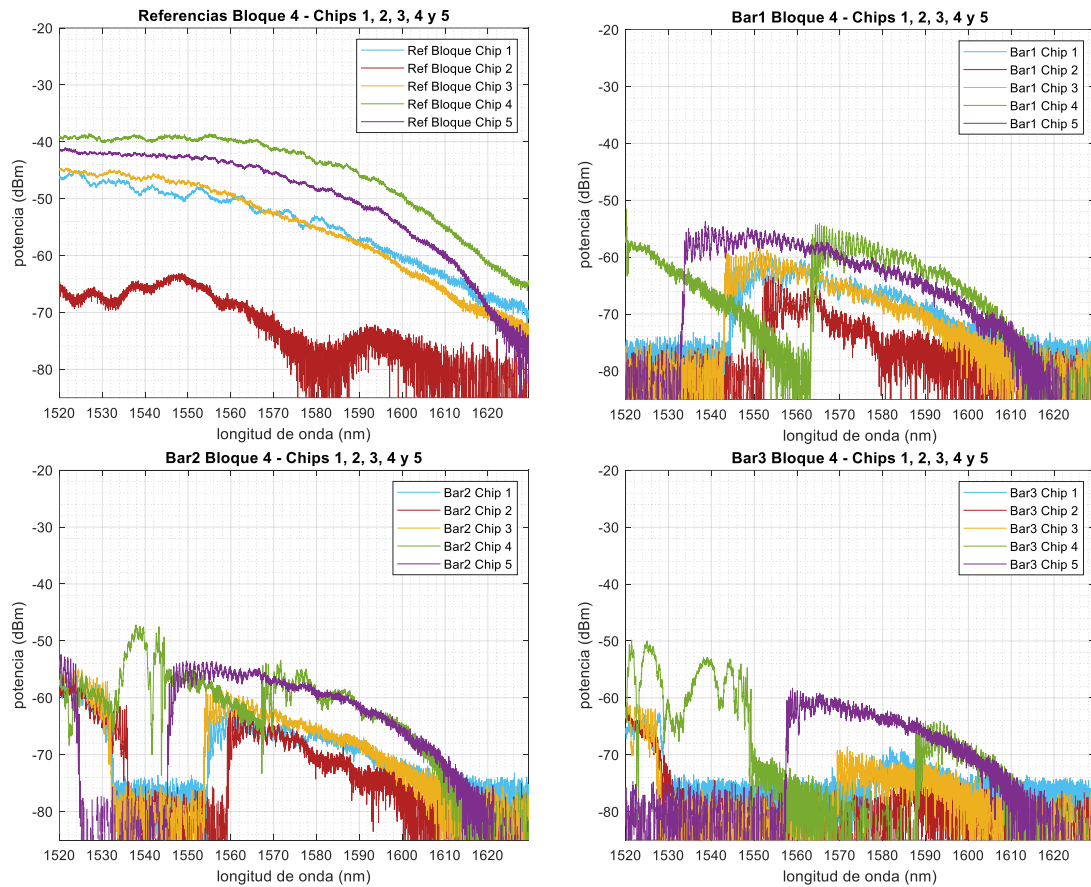
En tercer lugar, veamos la comparación, en la Figura 42, entre los bloques 3 de los 5 chips de corrugadas cortas.



**Figura 42.** Comparación de las salidas del bloque 3 entre los cinco chips de corrugadas cortas

En este tercer bloque, observamos que los chips 1, 2 y 3 presentan niveles similares de potencia. Mientras que, los chips 4 y 5 son los que mayor nivel de potencia presentan, al igual que en los dos anteriores bloques. Cabe destacar, que como en los anteriores bloques, las zonas de no transmisión (PBG) de los chips 4 y 5 están desplazadas respecto al resto de los chips.

Por último, pasamos a ver las salidas bar y las referencias de los bloques 4 de los chips de corrugadas cortas. Esto se puede apreciar en la Figura 43.



**Figura 43.** Comparación de las salidas del bloque 4 entre los cinco chips de corrugadas cortas

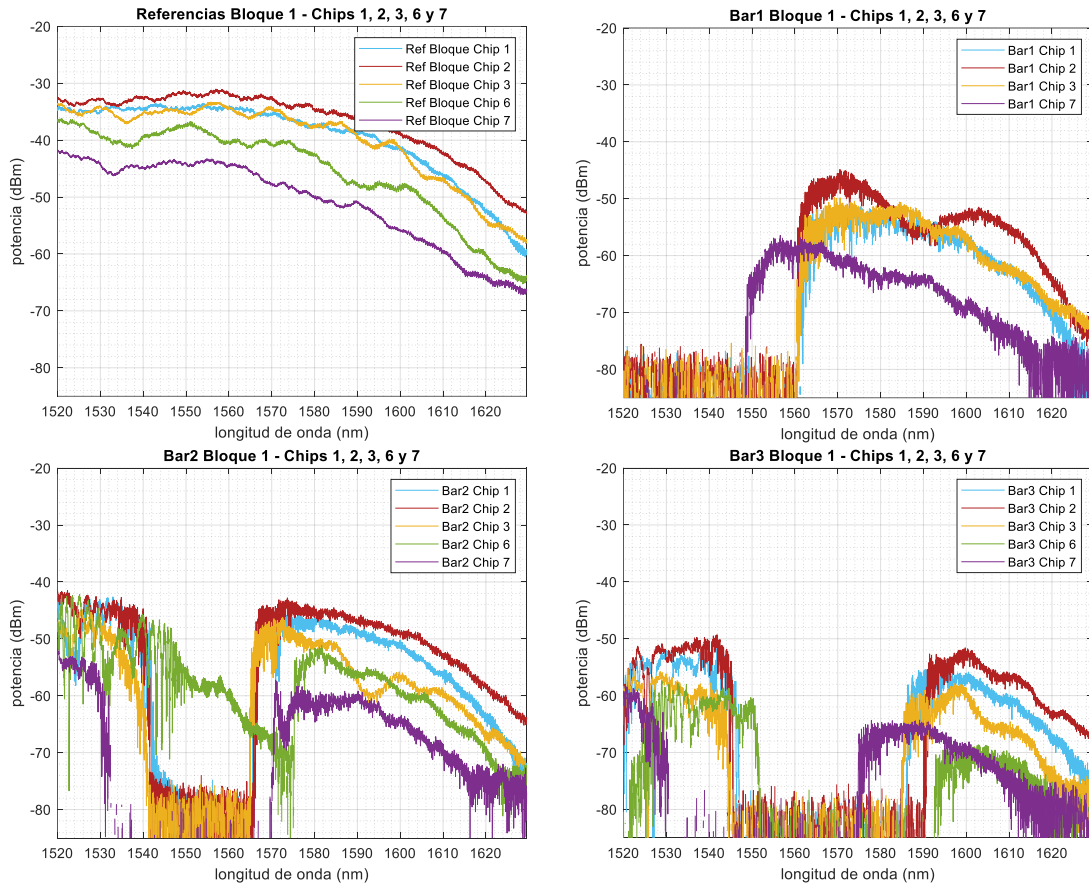
En este cuarto bloque, ocurre algo similar pues vemos que los chips 1, 2 y 3 presentan niveles inferiores de potencia, con respecto a los chips 4 y 5, al igual que en los anteriores bloques. Además, al igual que en los otros bloques las zonas de no transmisión de los chips 4 y 5 están desplazadas respecto al resto de los chips.

Tras haber hecho la comparativa entre los 5 chips de corrugadas cortas, hemos podido observar que tanto el chip 4, como el chip 5, presentan valores de potencia superiores en todas las salidas con respecto al resto de chips. Por lo que estos dos, podrían ser candidatos para montarles las celdas de microfluídica y hacer experimentos de cambios de medio con ellos.



## 5.4. Comparación entre los chips de corrugadas largas

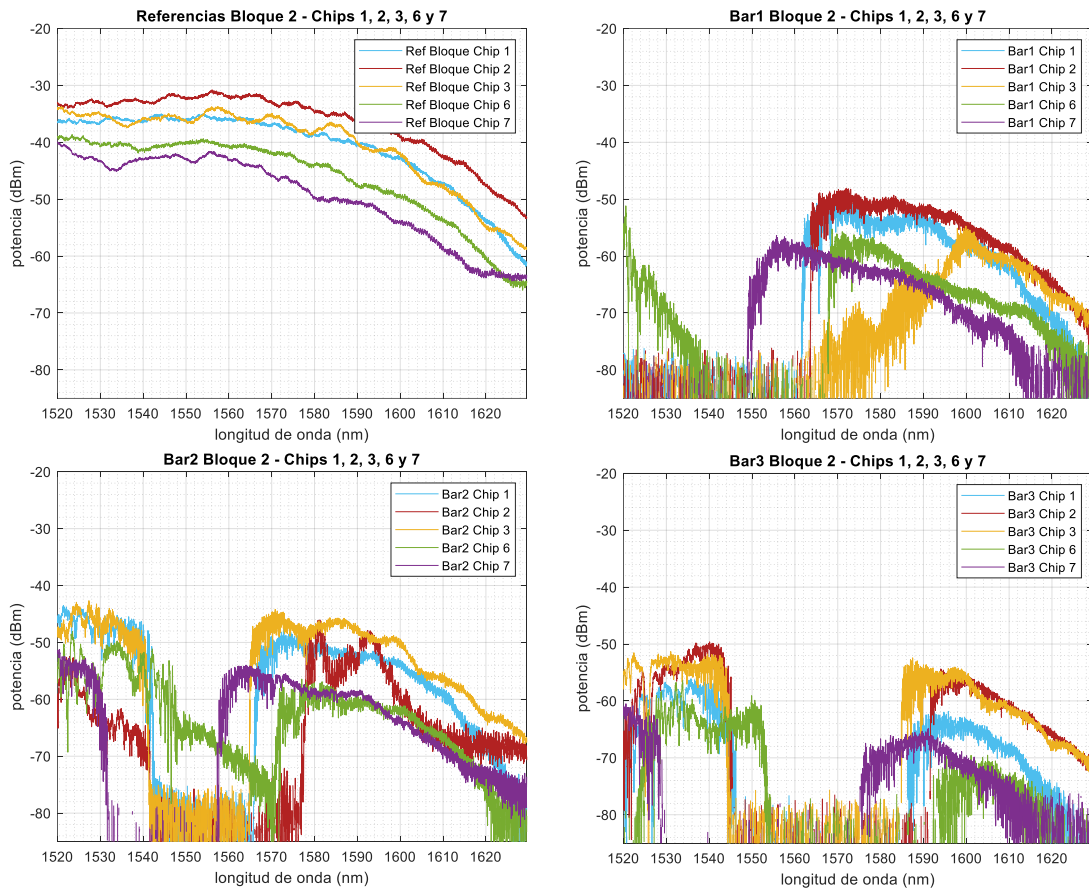
Una vez visto la comparativa entre los chips de corrugadas cortas, pasamos a comparar las salidas de los chips de corrugadas largas, siguiendo el mismo procedimiento que con los anteriores. Así compararemos las salidas bar y las referencias de los bloques principales de los 5 chips de corrugadas largas. Primero, comenzamos comparando las salidas bar y las referencias de los bloques 1 de los 5 chips de corrugadas largas. Esta comparación la podemos ver en la Figura 44.



**Figura 44.** Comparación de las salidas del bloque 1 entre los cinco chips de corrugadas largas

En las anteriores cuatro gráficas podemos observar como para el chip 1, 2, 3 y 7 obtenemos valores de potencia en todas las salidas del bloque. Mientras que en la salida Bar1 no obtenemos valores de potencia para el chip 6, que como ya vimos anteriormente tenía suciedad sobre su guía de onda. Asimismo, cabe destacar que los niveles de potencia son superiores para los chips 1, 2, y 3 en todas las salidas del bloque. También, podemos observar como los chips 6 y 7, tienen su zona de no transmisión en aire desplazada respecto al resto de chips.

Por último, pasamos a ver en la Figura 45 las salidas bar y las referencias de los bloques 2 de los 5 chips de corrugadas largas.



**Figura 45.** Comparación de las salidas del bloque 2 entre los cinco chips de corrugadas largas

En este segundo bloque, ocurre algo similar pues vemos que los chips 1, 2 y 3 presentan niveles ligeramente superiores de potencia, con respecto a los chips 6 y 7, al igual que en el anterior bloque. Además, al igual que en el primer bloque las zonas de no transmisión de los chips 6 y 7 están desplazadas respecto al resto de los chips. También, cabe destacar que las salidas Bar2 por lo general tienen mayores valores de potencia, para ambos bloques.

Después, de esta comparativa entre los 5 chips de corrugadas largas, hemos podido ver que los chips 1, 2 y 3 son los que mayores valores de potencia presentan a lo largo de todo el espectro, en todas las salidas. Y que las parejas de salidas cross2-bar2 presentan también mayores valores de potencia. Siendo interesantes a la hora de hacer los experimentos, para un mejor seguimiento de los cambios de medio.

## 5.5. Elección de los chips para los experimentos

Una vez caracterizado 5 chips de corrugadas cortas y 5 de corrugadas largas en aire, seleccionamos un chip de cada uno de los tipos, para seguir haciendo pruebas. Esta vez, la caracterización se hará mediante la colocación del canal de microfluídica sobre las estructuras de corrugadas. Para así observar los picos y valles, correspondientes a las interferencias entre los dos modos que recorren las guías de onda.

Lo primero que hemos hecho, ha sido seleccionar un chip de cada tipo para los experimentos. Con el requisito de elegir unos que tengan en sus salidas, las zonas de no transmisión en aire en la misma región del espectro. Por lo que hemos escogido, el chip número 4 de 1000 repeticiones en las corrugadas y el chip número 1 de los de corrugadas largas (con 10000 repeticiones en las corrugadas). Ya que, tras observar los espectros de todos los chips, hemos visto que son los que más se parecen, aunque se podrían haber elegido otras parejas. Tras seleccionar estos chips, hemos empezado el proceso para colocarle el canal de microfluídica a cada uno de ellos.

Sin embargo, en la mayoría de los chips de corrugadas largas al colocarles el canal de microfluídica no funcionaban bien, pues los niveles de potencia al alinear la fibra en las salidas eran mínimos. Excepto con el chip 7, por lo que finalmente, lo elegimos para compararlo con el chip 4 de corrugadas cortas.

Para empezar la medida en agua, primero, hemos limpiado la superficie de ambos chips, primero echando un poco de isopropanol ( $C_3H_8O$ ) sobre la superficie, después retirando el isopropanol echando agua ultrapura sobre la superficie, y, por último, quitando el líquido restante de la superficie mediante la pistola de presión.

En segundo lugar, nos hemos puesto a montar el canal de microfluídica sobre los chips. Estos están compuestos de una pegatina que sirve para adherirse al chip y a una pieza de metacrilato, en la cual se introducen los tubos de microfluídica. En la Figura 46.a, podemos ver la pegatina sobre el chip de corrugadas largas, encima de las guías de onda con las estructuras de corrugadas. Y en la Figura 46.b, podemos observar la pieza de metacrilato junto con los tubos dispuesta para poder fluir, sobre el chip.

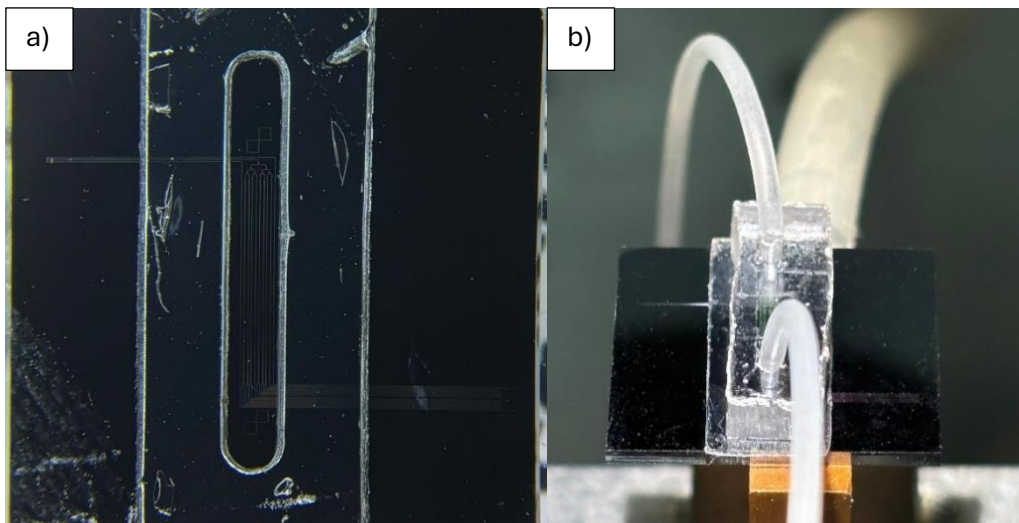
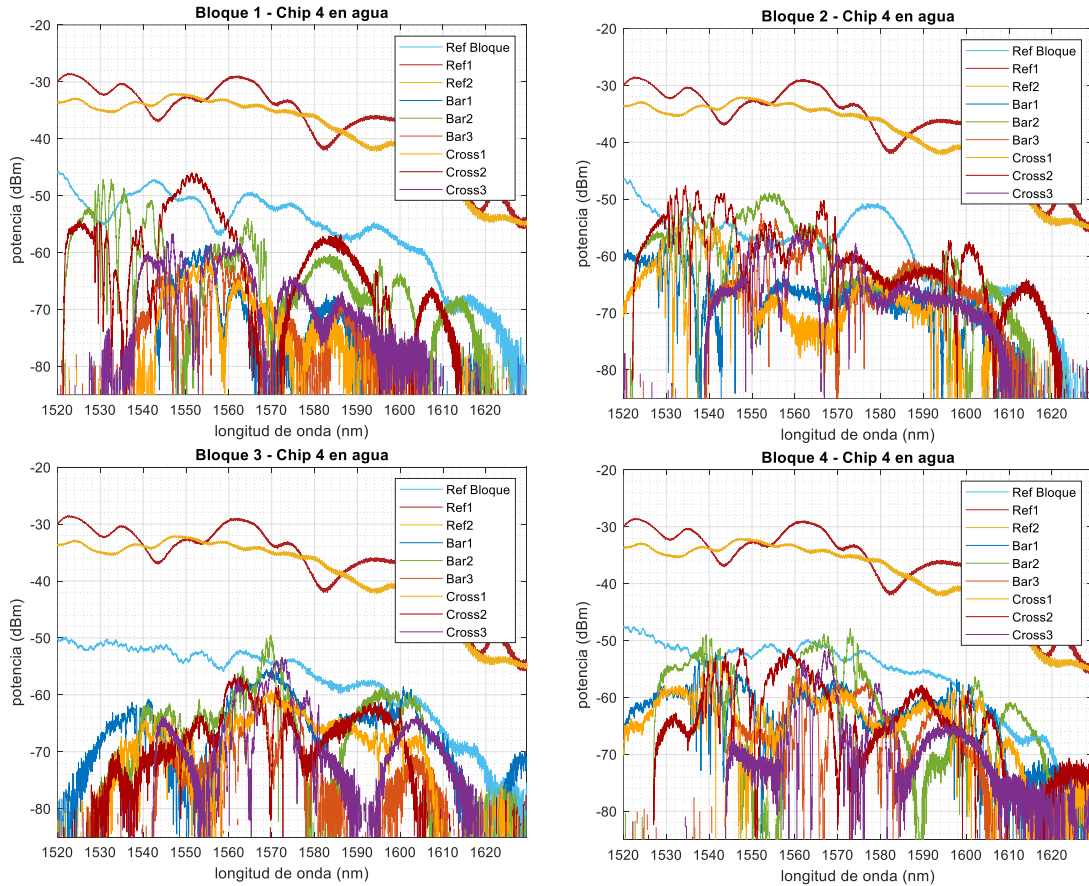


Figura 46. a) Pegatina sobre el chip de corrugadas largas. b) Pieza con metacrilato unida a los tubos para microfluir

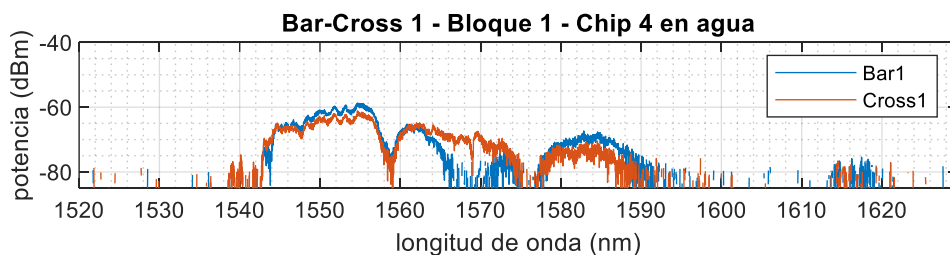
Después de colocar las celdas de microfluídica sobre los chips, decidimos empezar a caracterizar los dos chips en agua. Primero, en la Figura 47, vamos a poder observar la respuesta de todas las salidas del chip 4 de corrugadas cortas en agua. Para ello, en las representaciones gráficas usaremos los mismos colores usados en los anteriores apartados, para las distintas salidas del chip.

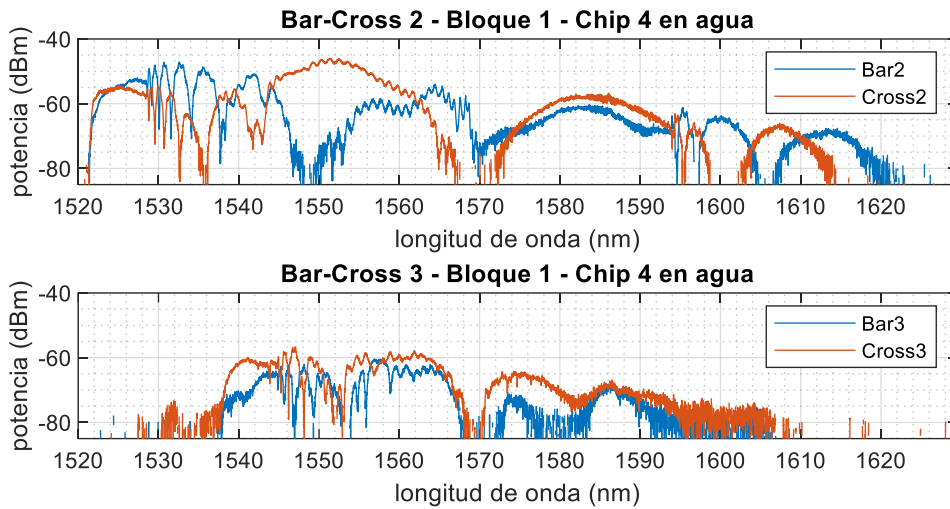


**Figura 47.** Espectros en agua de las salidas de los cuatro bloques del chip 4 de corrugadas cortas

Tras observar las anteriores gráficas, vimos que no podíamos apreciar de forma sencilla las interferencias bimodales de las salidas cross y bar (los picos característicos), pues los espectros se solapan unos con otros. Debido a esto, decidimos presentar, las salidas de cada una de las parejas cross y bar por separado, para así apreciarlas mejor.

En la Figura 48, podemos ver los espectros en agua, correspondientes a las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas del bloque 1 del chip 4 de corrugadas cortas.

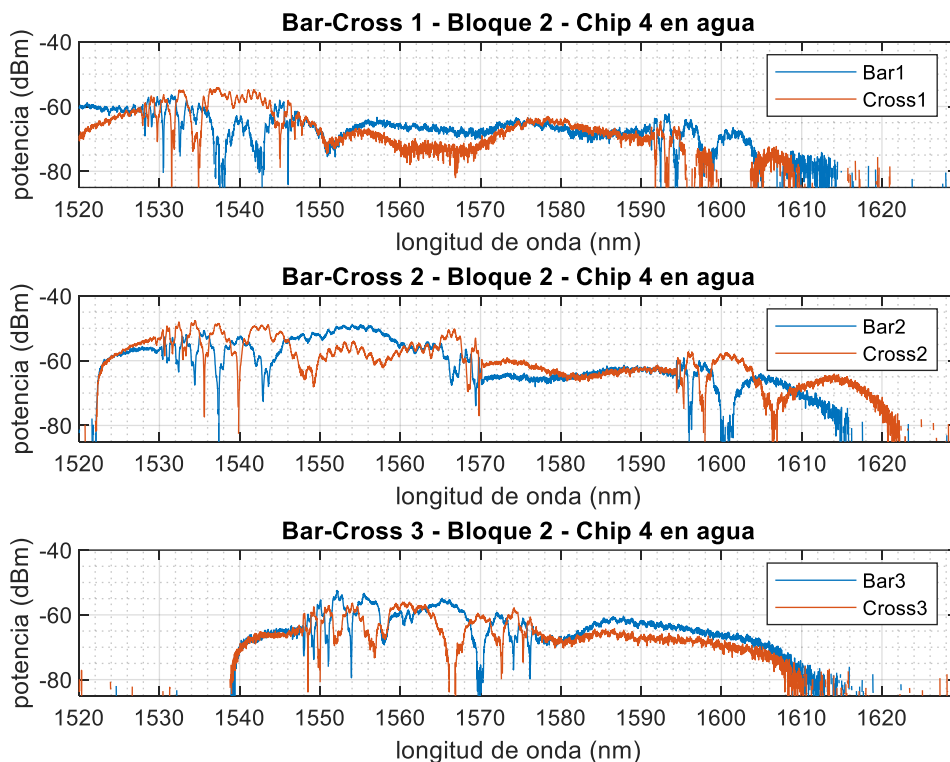




**Figura 48.** Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 1 del chip 4

En las anteriores gráficas, observamos como las salidas bar2 y cross2, presentan mayores valores de potencia con respecto al resto. Además, se aprecian las interferencias bimodales, para las cuales están diseñadas los chips, observándose mejor para el segundo y tercer tipo de corrugadas.

Tras observar, los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 1. Pasamos a visualizar, en la Figura 49, los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 2 del chip 4 de corrugadas cortas.



**Figura 49.** Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 2 del chip 4

Podemos apreciar en los tres tipos de corrugadas, las interferencias bimodales. Además, podemos observar como para la estructura corrugada 2, el nivel de potencia es mayor, en todo el espectro. Mientras que para las estructuras corrugada 1 y 3 el nivel de potencia es algo menor.



Posteriormente, en la Figura 50, podemos observar los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 3 del chip 4 de corrugadas cortas.

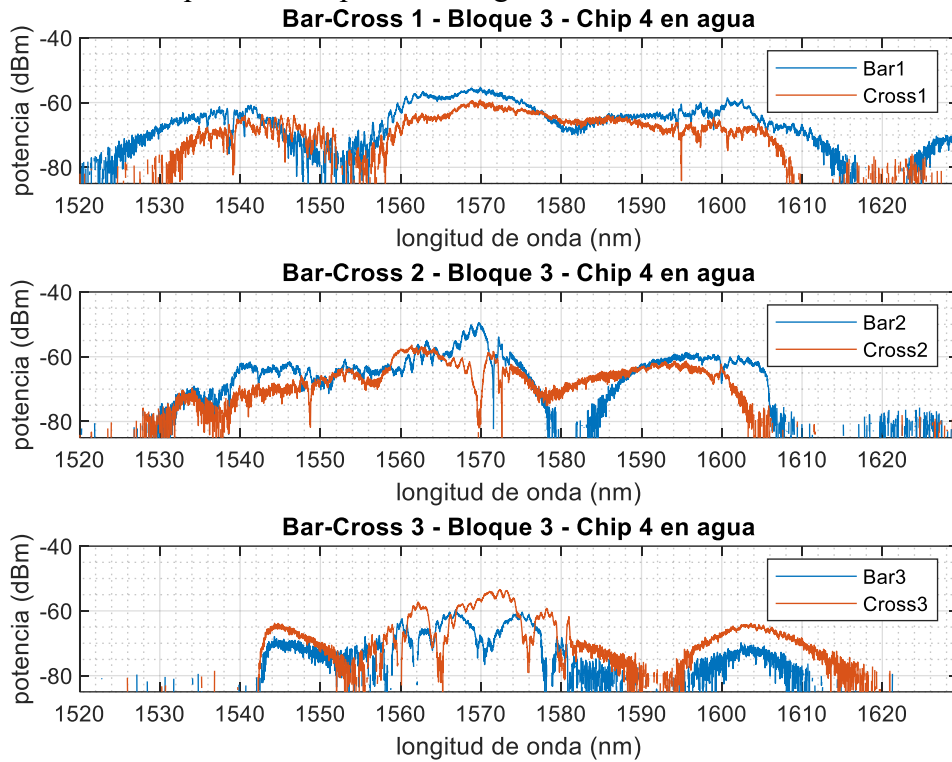


Figura 50. Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 3 del chip 4

Tras observar las gráficas correspondientes a las corrugadas del bloque 3, vemos que las interferencias bimodales no se aprecian tanto como en el bloque 2.

Y, por último, en la Figura 51, podemos ver los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 4 del chip 4 de corrugadas cortas.

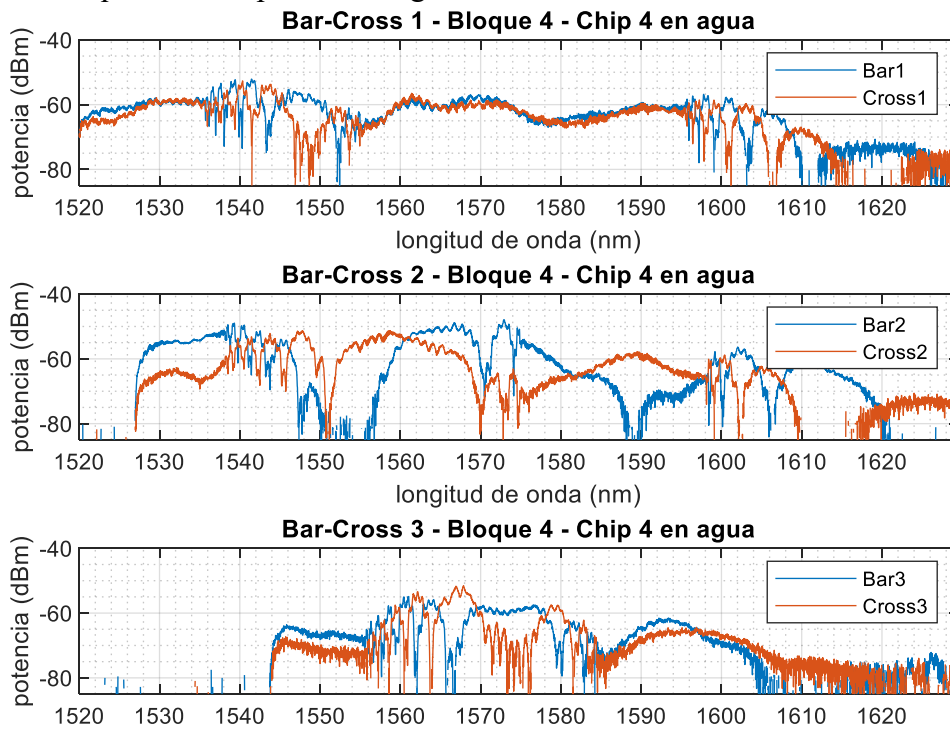


Figura 51. Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 4 del chip 4

En este cuarto bloque, si se observan más interferencias bimodales, para los tres tipos de corrugadas. Además, vemos como la estructura corrugada 2, presenta mayores valores de potencia, al igual que en el resto de bloques, exceptuando al bloque 3, que presenta niveles de potencia similares en todas sus salidas.

Una vez, caracterizado el chip 4 de corrugadas cortas en aire y en agua, nos pusimos a caracterizar en agua todas las salidas del chip 7 de corrugadas largas. En la Figura 52, podemos ver los espectros correspondientes a las salidas de los dos bloques del chip 7 en agua.

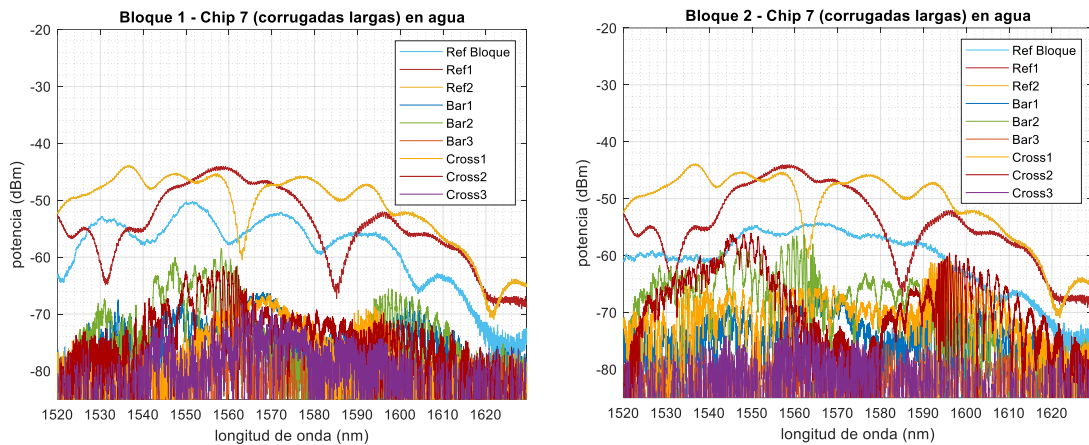


Figura 52. Espectros en agua de las salidas de los dos bloques del chip 7 de corrugadas largas

Al igual que en el chip 4 de corrugadas cortas, vemos que no se pueden observar bien las interferencias bimodales de las distintas estructuras corrugadas, pues estas se solapan. Por lo que vamos a mostrar a pares las salidas por separado, de los dos bloques de este chip. En la Figura 53, podemos observar los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 1 del chip 7 de corrugadas largas.

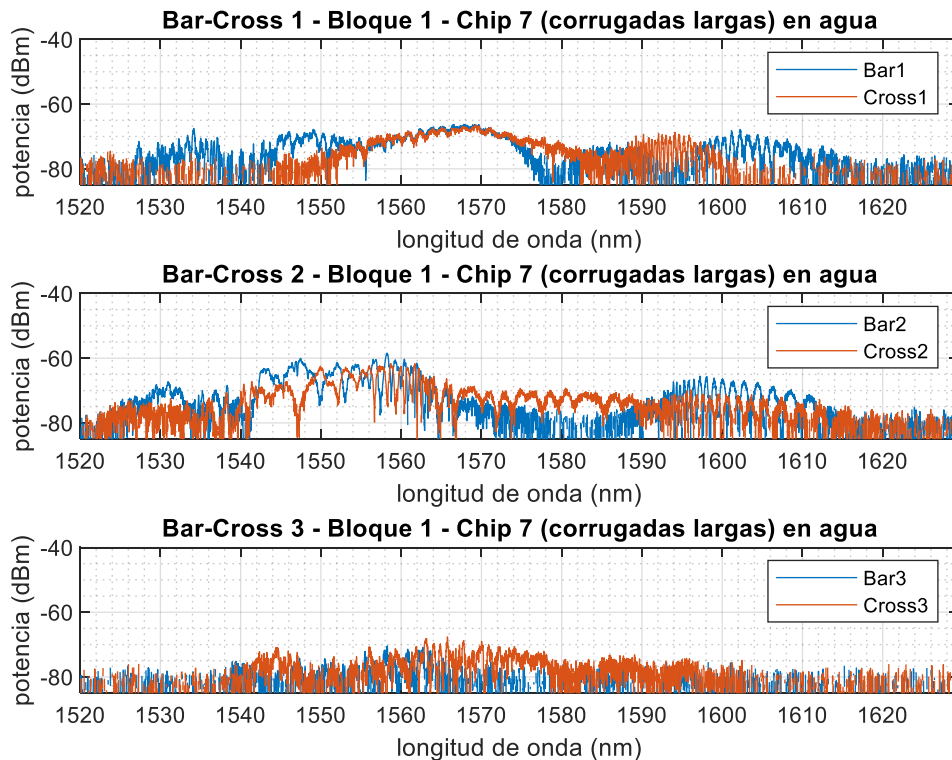
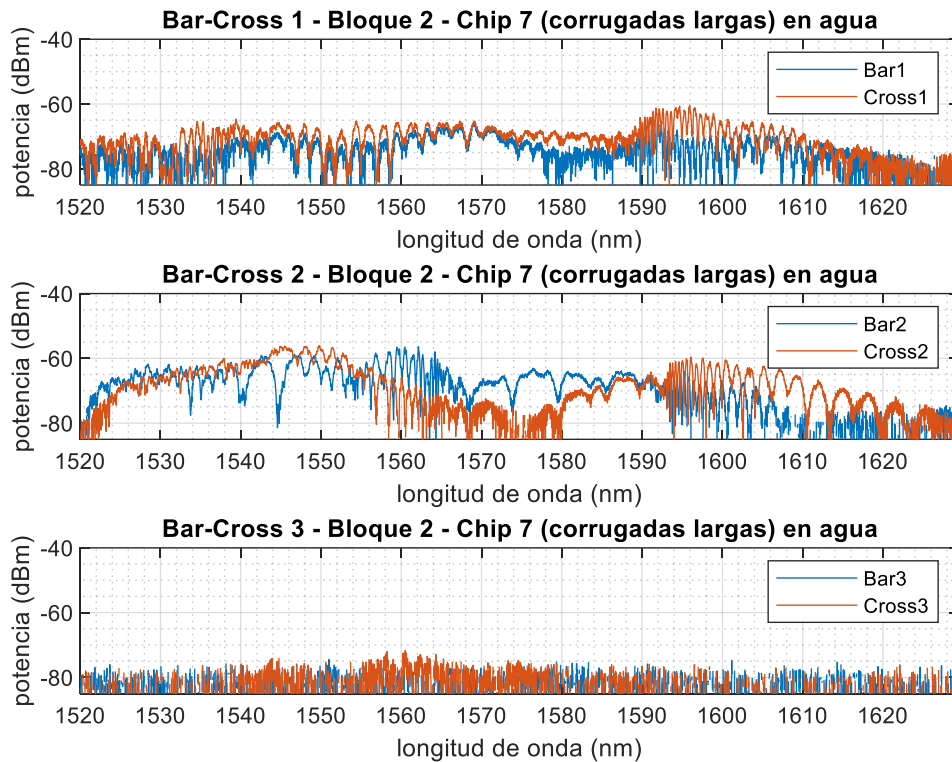


Figura 53. Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 1 del chip 7

En las anteriores gráficas, observamos como las salidas bar2 y cross2, presentan mayores valores de potencia con respecto al resto. También, que se aprecian las interferencias bimodales en mayor número, pues el desfase entre los dos caminos ópticos es mayor, al haber más diferencia de longitud (cuanto más largo, interferencias más estrechas). Además, estas se observan mejor para el primer y segundo tipo de corrugadas. Mientras que para la estructura corrugada 3, los espectros tienen muy poca potencia.

Para finalizar, en la Figura 54, podemos ver los espectros en agua de las salidas bar y cross del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas.



**Figura 54.** Espectros en agua de las salidas bar y cross de los tres tipos de corrugadas, para el bloque 2 del chip 7

En este segundo bloque, la tendencia es similar a la del primero. Pues la estructura corrugada 2 destaca sobre las otras, por tener mayores valores de potencia en sus salidas. Y la estructura corrugada 3, presenta niveles de potencia muy bajos, entre -75 y -85 dBm, casi en los límites de detección.

Tras observar los espectros correspondientes a las salidas de ambos chips en agua, hemos podido visualizar como los espectros de la estructura corrugada 2, presentan mayores valores de potencia en casi todos los bloques de ambos chips, al igual que ocurría en aire. Por lo que a la hora de hacer los experimentos, seleccionaremos las salidas bar2 y cross2. Para sensor, mediante el tracking espectral midiendo en el espectro y en potencia a una longitud de onda.

Después, de ver los espectros correspondientes a las salidas de ambos tipos de chips en agua, decidimos caracterizar todas sus salidas en agua más un 10 % de etanol. Pero como los espectros son muy parecidos a los de agua, estando solamente un poco desplazados, no se mostrarán aquí.



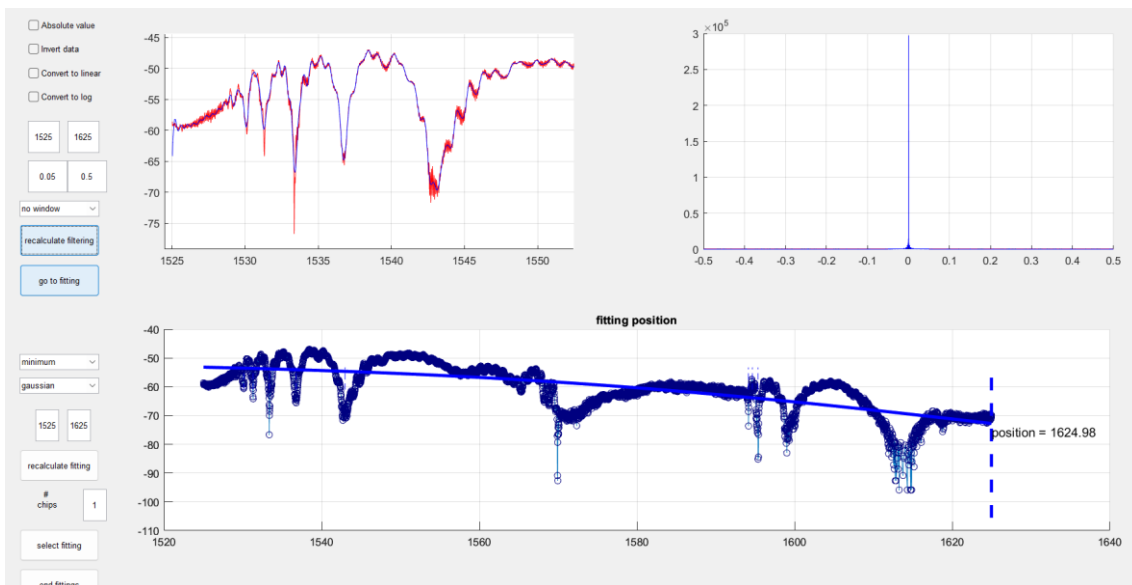
## 5.6. Experimento seguimiento espectral

Una vez elegido el chip 4 de corrugadas cortas y el chip 7 de corrugadas largas decidimos primero, evaluar experimentalmente los chips a través del tracking espectral. Para ello, el procedimiento fue el siguiente (los tiempos son aproximados):

- 1º Fluir agua, durante los primeros 10 minutos.
- 2º Fluir agua más 10% de etanol, desde el minuto 10 hasta el minuto 20.
- 3º Volver a fluir agua, desde el minuto 20 hasta el minuto 30.
- 4º Fluir agua más 5% de etanol, desde el minuto 30 hasta el minuto 40.
- 5º Fluir de nuevo agua, hasta el final del experimento.

Durante este tiempo, en vez de realizar una gráfica potencia / longitud de onda y analizarla, vamos a ir obteniendo y almacenando espectros como los anteriores cada 10 segundos aproximadamente. Una vez transcurrido todo el tiempo del experimento, para observar con más exactitud los cambios de medio, se buscan los picos de potencia (característicos de las interferencias bimodales), para poder seguirlos. Asimismo, para evitar el efecto del ruido se aproximan los datos a una función gaussiana (cogiendo el máximo o mínimo de esta para cada pico). Esta serie de datos que recogemos, para cada espectro, simplifica la cantidad de información con la que se trabaja, pasando de tener cientos de gráficas a tener cientos de posiciones de los picos, es decir, cientos de longitudes de onda. A continuación, se recogen todos estos datos y se colocan en un gráfico en función del tiempo, obteniendo una única gráfica longitud de onda frente al tiempo para cada pico, en la que se verán los desplazamientos del pico debidos a los cambios en el índice de refracción.

Para el seguimiento de los picos, tenemos una función de Matlab `sensing_tracking_generic_multipeak_multifolder.m` que, al ejecutarla, nos abre una ventana en la cual podemos configurar el procesamiento de las medidas (e.g., filtrar los espectros, elegir el rango de valores, quitar los valores de los extremos, etc.). Tras aplicar el procesamiento deseado al espectro, podemos seleccionar los picos que queremos seguir, ajustando su centro a una gaussiana. Tras esto, obtenemos una única gráfica longitud de onda frente al tiempo para cada pico. En la Figura 55, podemos observar las distintas ventanas de la función de Matlab.



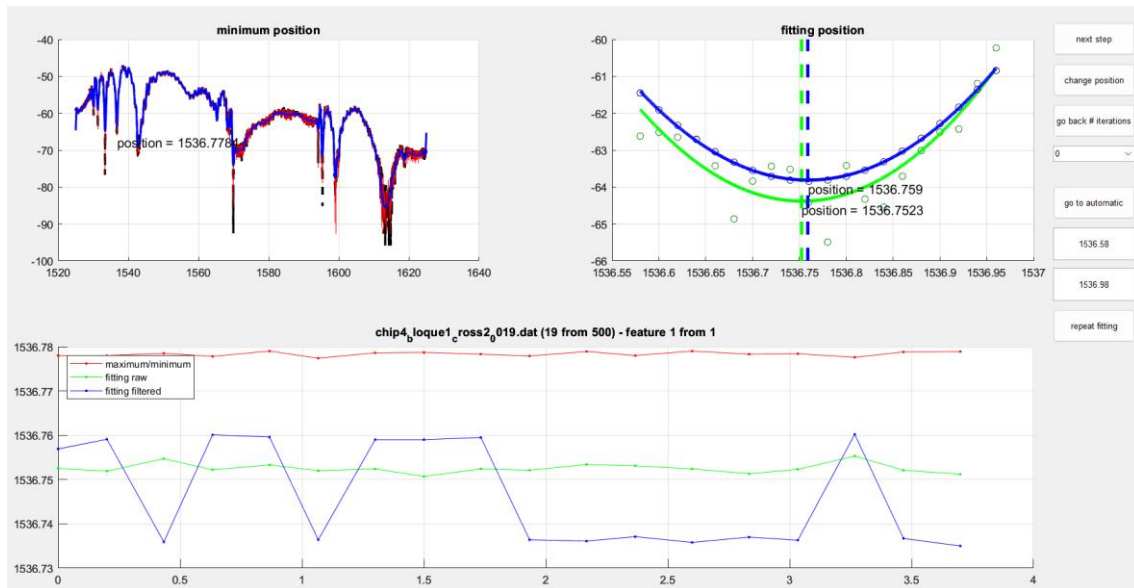


Figura 55. Captura de la ventana de la función `sensing_tracking_generic_multipeak_multifolder.m`

Tras ver el funcionamiento de la función de Matlab. Vamos a ir mostrando los resultados del seguimiento de los picos para ambos chips. Empezando por el chip 4 de corrugadas cortas, del que elegimos la salida cross 2 del bloque 1, por ser de las salidas en las que mejor se veían las interferencias bimodales. El espectro en agua de la salida cross 2 del bloque 1, se puede ver en la Figura 56, en la cual se marcan con línea discontinua los ocho picos seguidos, que mostraremos a continuación. Asimismo, podemos observar para cada pico la sensibilidad medida (en nm/RIU), a partir del desplazamiento para un 10% de EtOH (en volumen, que veremos en las Figuras 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 y 64) que equivale a un cambio de índice de  $5.386 \times 10^{-3}$  RIU.

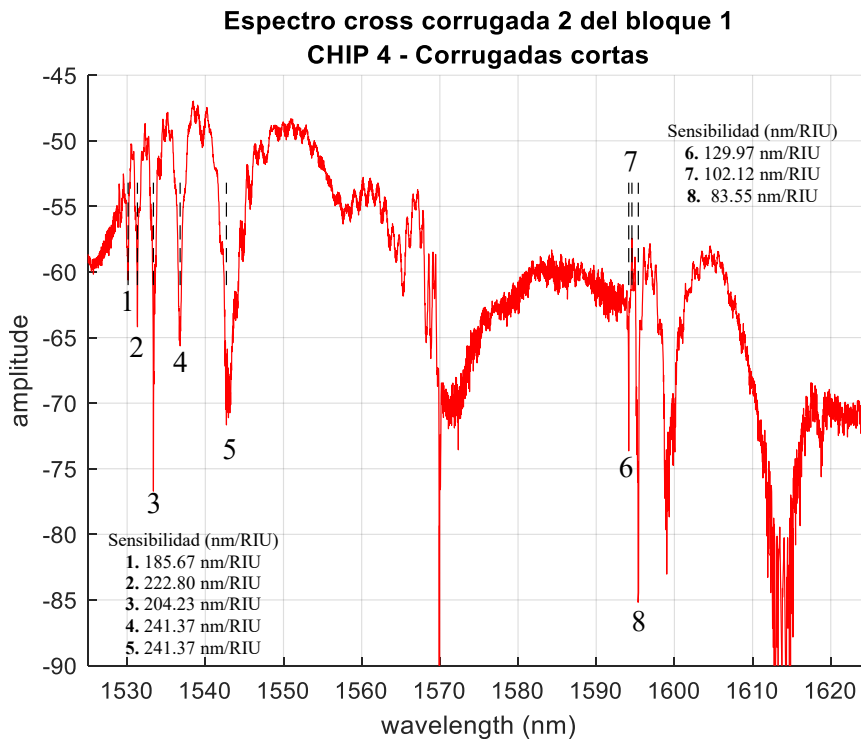
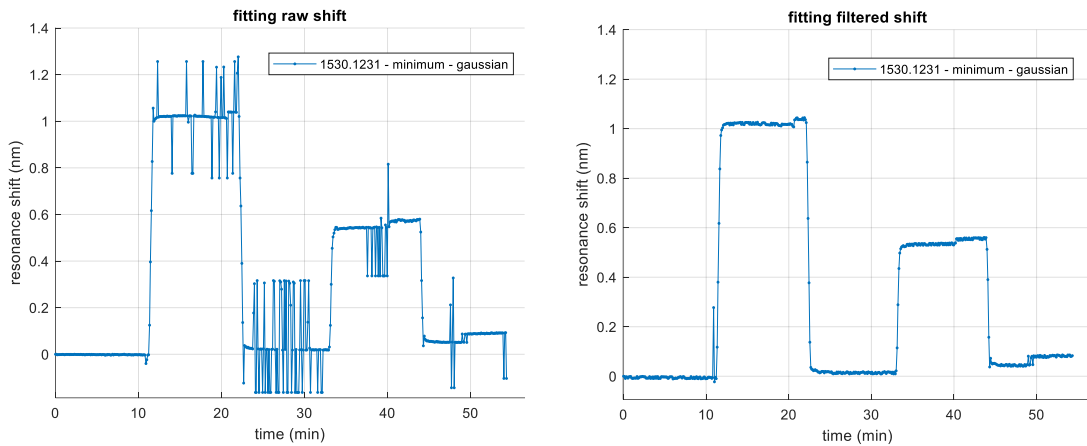


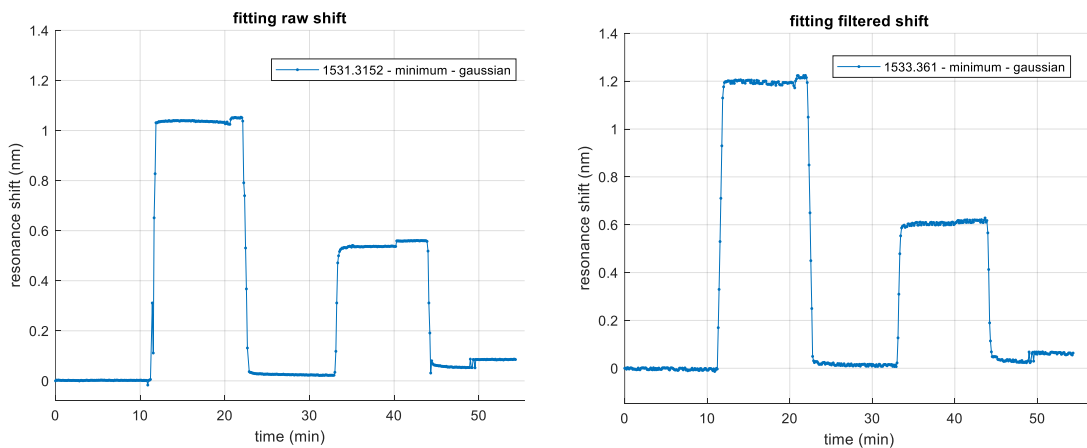
Figura 56. Espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 1 del chip 4 de corrugadas cortas

En las Figuras 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63 y 64 podemos observar el seguimiento de los ocho picos característicos, en las que se observa el seguimiento del pico sin filtrar y el seguimiento del pico filtrado.



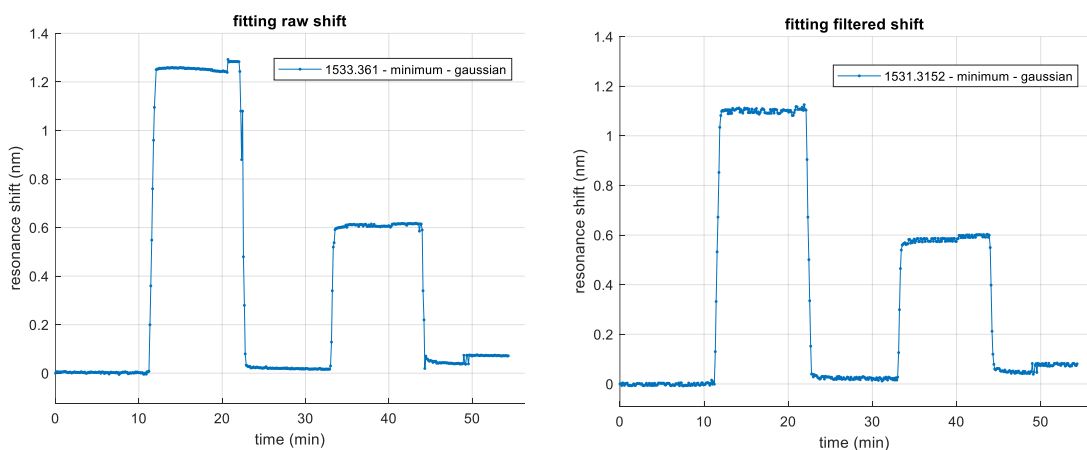
**Figura 57.** Experimento seguimiento de pico a 1530.1231 nm

En el seguimiento del primer pico característico (mínimo a 1530.1231 nm), podemos ver como el pico se desplaza a medida que se suceden los cambios de medio, viendo como dependiendo del porcentaje de etanol, el pico se desplaza más o menos. Asimismo, podemos ver que el filtrado del espectro sirve pues elimina el ruido.



**Figura 58.** Experimento seguimiento de pico a 1531.3152 nm

En este segundo pico (mínimo a 1531.3152 nm), podemos observar como el desplazamiento del pico es similar al del primero, en cuanto a amplitud.



**Figura 59.** Experimento seguimiento de pico a 1533.361 nm

Del tercer pico característico (mínimo a 1533.361 nm), podemos apreciar cómo se desplaza entre 0.15 y 0.20 nm más que los dos anteriores, al introducir los cambios de medio.

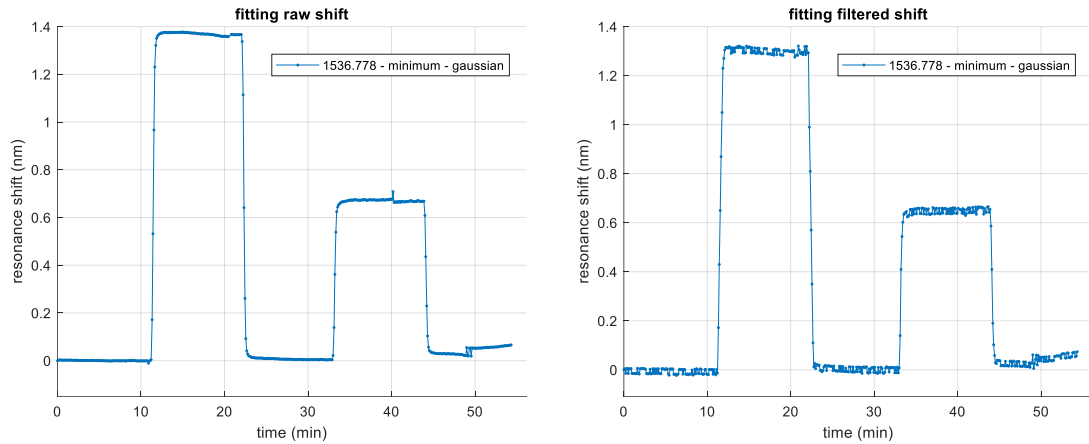


Figura 60. Experimento seguimiento de pico a 1536.778 nm

Asimismo, el cuarto pico (mínimo a 1536.778 nm), se desplaza aproximadamente 0.10 nm más que el tercer pico. Y al igual que en los anteriores el filtrado del espectro es útil para limpiar la señal de ruido.

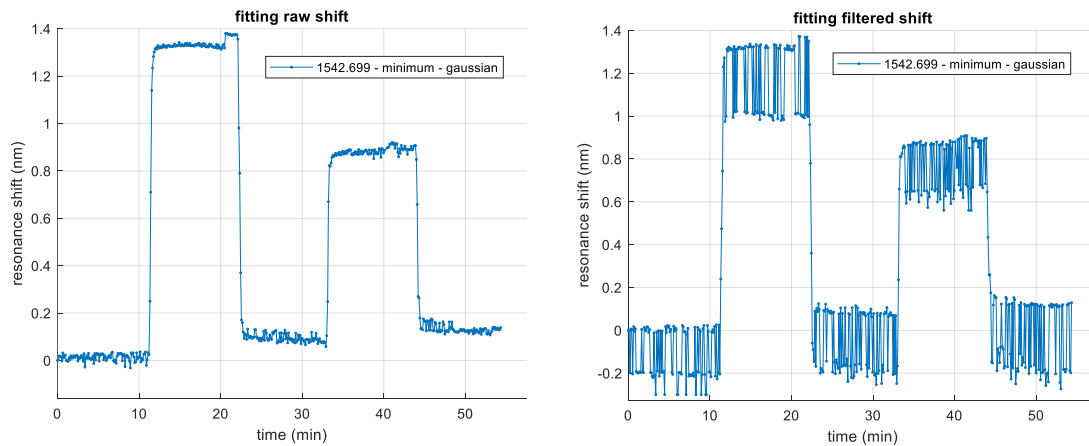


Figura 61. Experimento seguimiento de pico a 1542.699 nm

En el mínimo a 1542.699 nm, observamos como la amplitud del desplazamiento es similar al cuarto pico. Pero, al filtrar la señal, en este caso aparece más ruido, debido a que es un pico menos marcado y es más ancho. Aun así, se aprecian los cambios de medio.

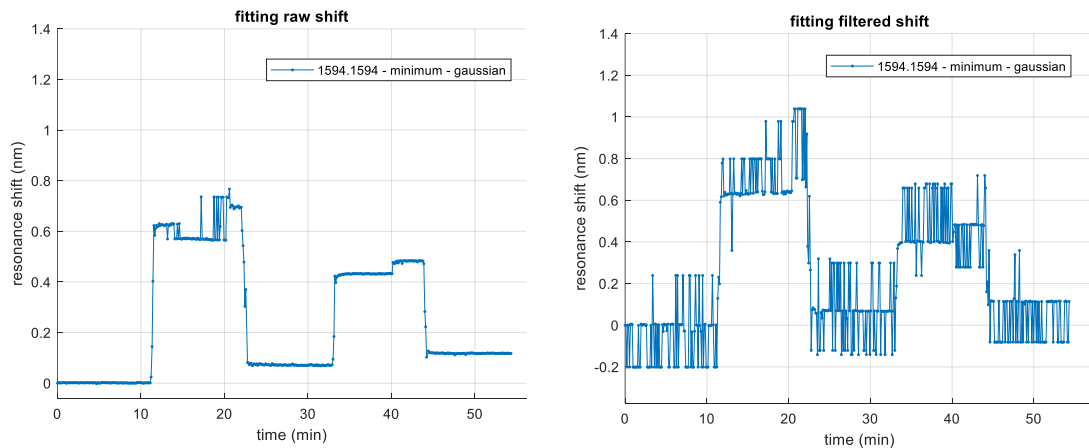


Figura 62. Experimento seguimiento de pico a 1594.1594 nm

En el sexto pico característico, a 1594.1594 nm, que seguimos, observamos que se desplaza mucho menos que los anteriores. Además, este pico al contrario que el anterior, es muy estrecho, teniendo muy pocos puntos para seguir mediante la función de Matlab, por lo que el ajuste del espectro filtrado presenta mucho ruido.

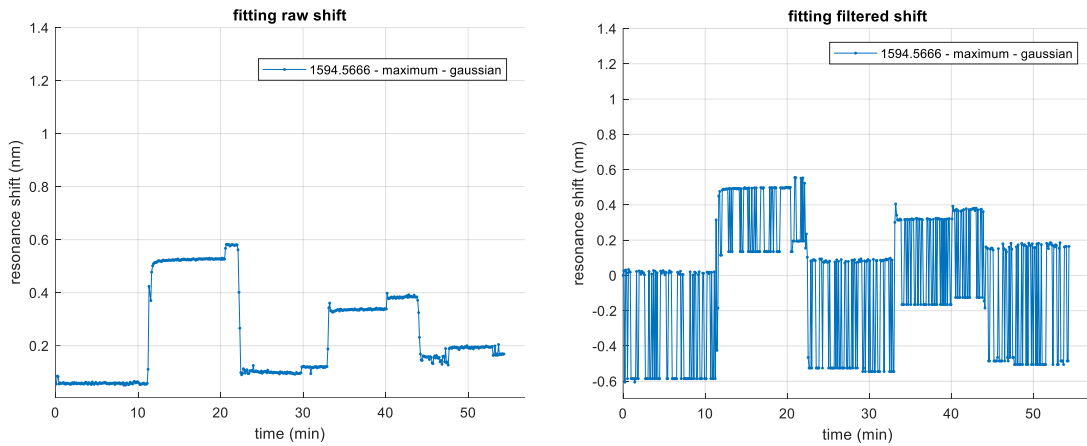


Figura 63. Experimento seguimiento de pico a 1594.566 nm

En el seguimiento del séptimo pico, que en este caso es un máximo (1594.566 nm), podemos ver como al igual que el sexto pico, al ser estrecho, el filtrado del pico no ayuda a seguir mejor el desplazamiento del pico.

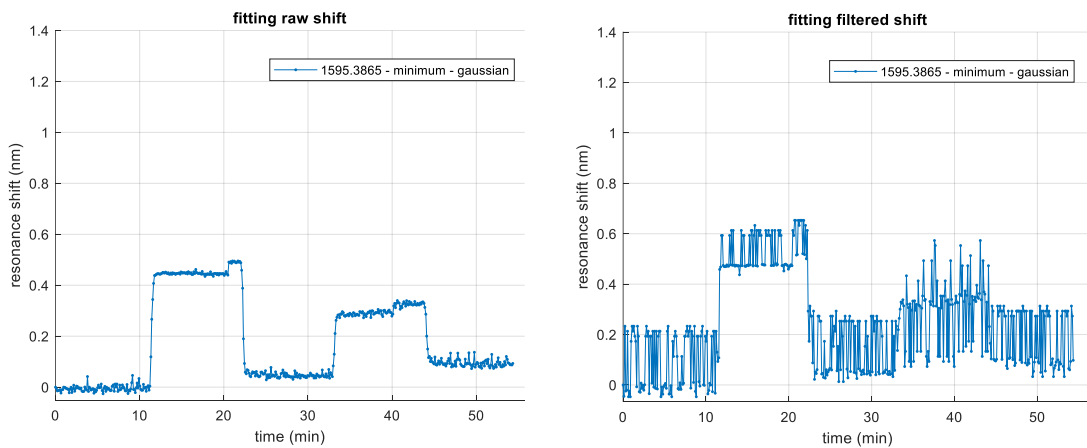
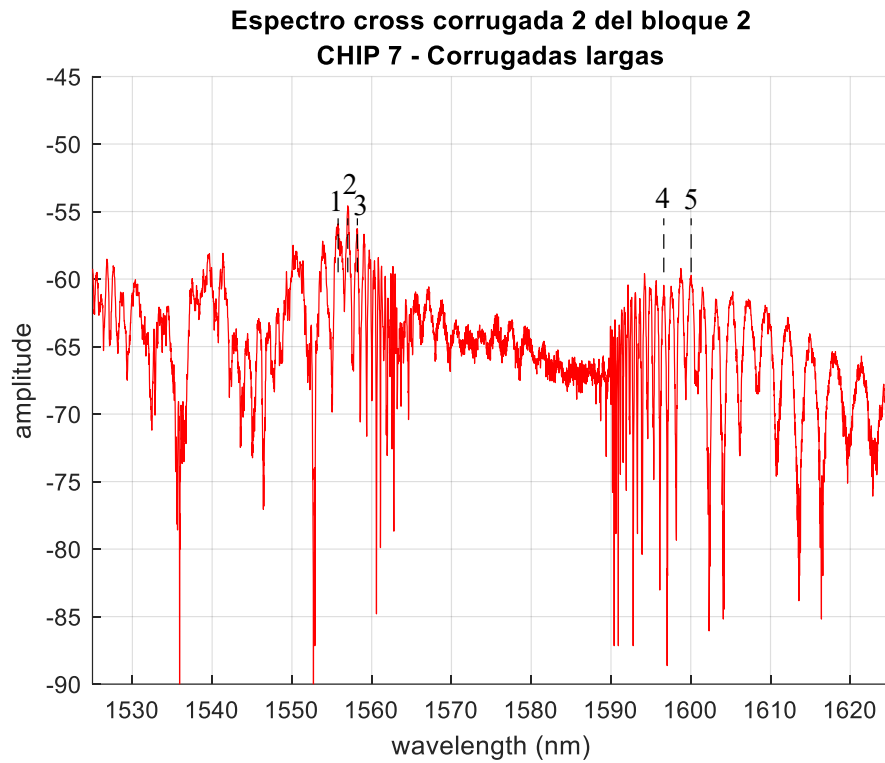


Figura 64. Experimento seguimiento de pico a 1595.3865 nm

Por último, del chip 4 de corrugadas cortas, tenemos el mínimo a 1595.3865 nm, el cual al igual que el sexto y séptimo es muy estrecho, por lo que el ajuste del espectro filtrado presenta mucho ruido. También, en estos tres últimos picos a la derecha del PBG (entre 1570 y 1590 nm), observamos como se desplazan menos en longitud de onda con respecto a los cinco picos a la izquierda del PBG. Asimismo, podemos apreciar esto en la Figura 56, ya que los picos a la izquierda del PBG presentan una sensibilidad medida (en nm/RIU) a partir del desplazamiento para EtOH 10% de en torno a 200 nm/RIU, mientras que los picos a la derecha del PBG una sensibilidad de en torno a 100 nm/RIU.

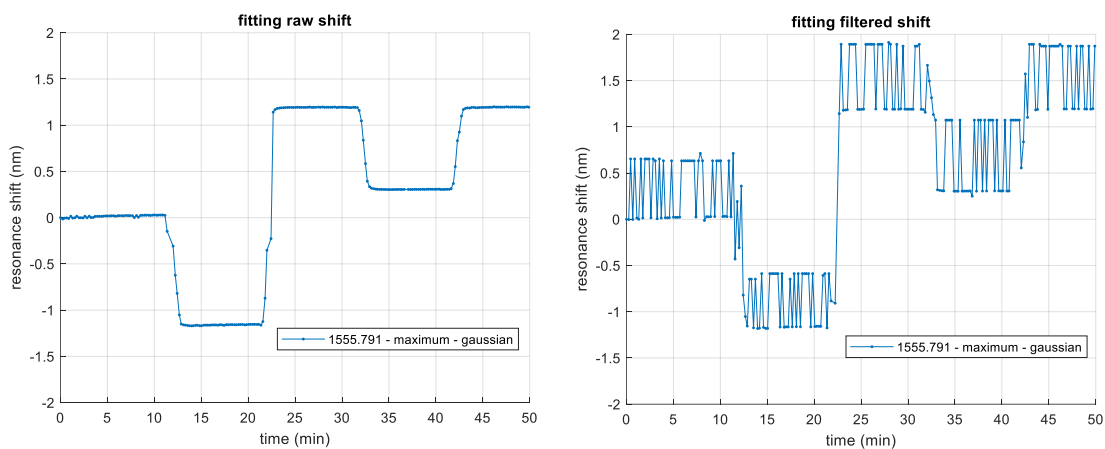
Tras haber visto el tracking espectral de una serie de picos de la salida cross 2 del bloque 1 del chip 4 de corrugadas cortas, observamos el seguimiento de cinco picos de la salida cross 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas, que podemos ver en la Figura 65, en la cual se obtenían los mejores niveles de potencia. Además, en este caso no podemos

observar para cada pico la sensibilidad medida (en nm/RIU), a partir del desplazamiento para un 10% de EtOH (en volumen) que equivale a un cambio de índice de  $5.386 \times 10^{-3}$  RIU, ya que como veremos a continuación, tenemos los “shifts” negativos que se deberán a saltos entre las interferencias a la hora de hacer el tracking. Por tanto, no tiene sentido considerar esos “shifts” para calcular la sensibilidad. Cabe remarcar que conforme se iban utilizando los chips de corrugadas largas, los niveles de potencia disminuían, dificultando su medida.



**Figura 65.** Espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas

Ahora bien, en las Figuras 66, 68, 69, 71 y 72, podemos observar el seguimiento de los cinco picos característicos, en las que se observa el seguimiento del pico sin filtrar y el seguimiento del pico filtrado. En este tipo de chips, al ser la potencia muy baja, no pudimos seguir ningún mínimo, por lo que todos son máximos



**Figura 66.** Experimento seguimiento de pico a 1555.791 nm

En el primer pico característico (máximo a 1555.791 nm), podemos ver como el pico se desplaza a medida que se suceden los cambios de medio. Sin embargo, parece que el pico que se estaba siguiendo se ha dividido en dos o se ha pasado a otro, pues en vez de ir a valores positivos, en el segundo paso entre 10 y 20 minutos aproximadamente, pasa a valores negativos.

En la Figura 67, podemos apreciar como la interferencia es ancha y posiblemente en uno de los cambios de medio, se haya dividido el pico, pudiendo afectar a la función de fitting, que es posible que se equivoque de pico al estar tan cercanas. Asimismo, podemos ver que el filtrado del espectro no funciona bien pues añade ruido al ajuste de la posición del pico, pudiendo deberse a que el pico es estrecho, lo que dificulta su seguimiento por parte de la función de fitting.

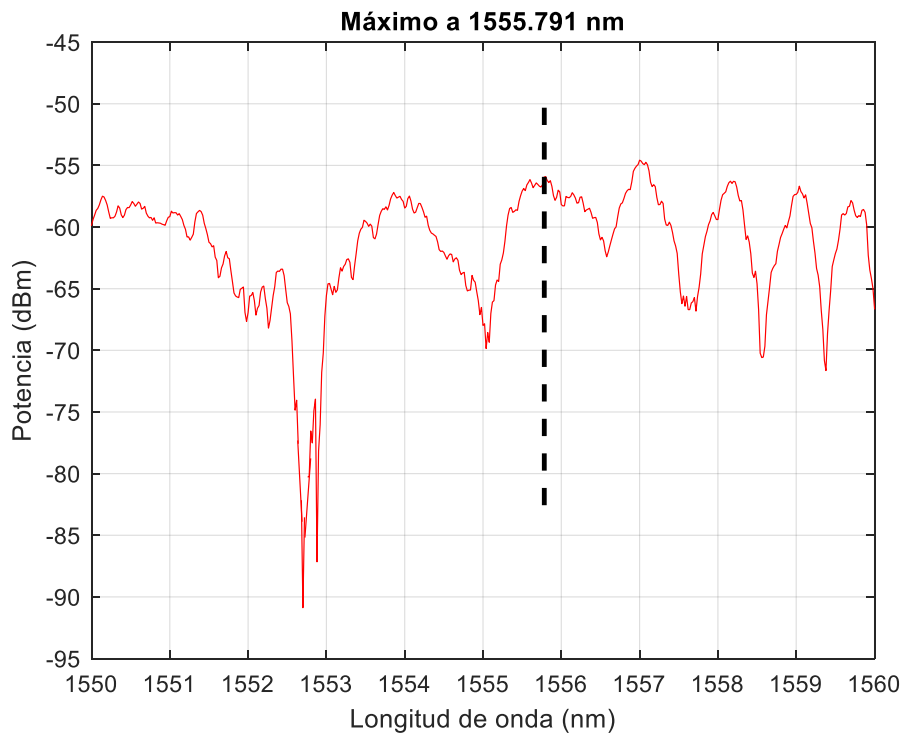


Figura 67. Zoom sobre el máximo 1555.791 nm del espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas

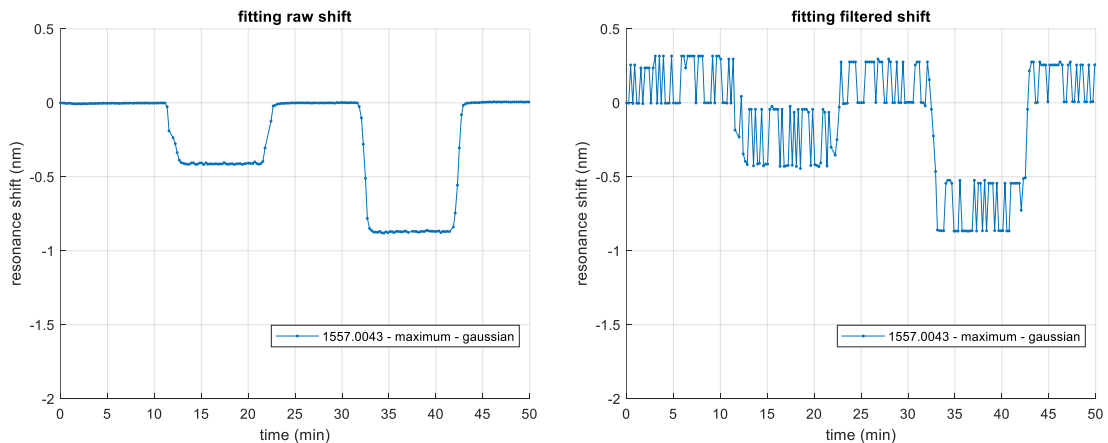
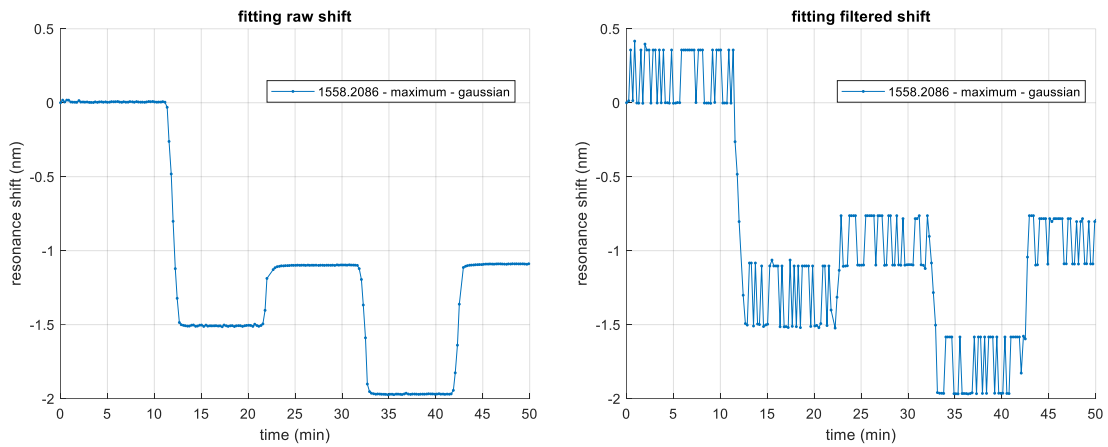


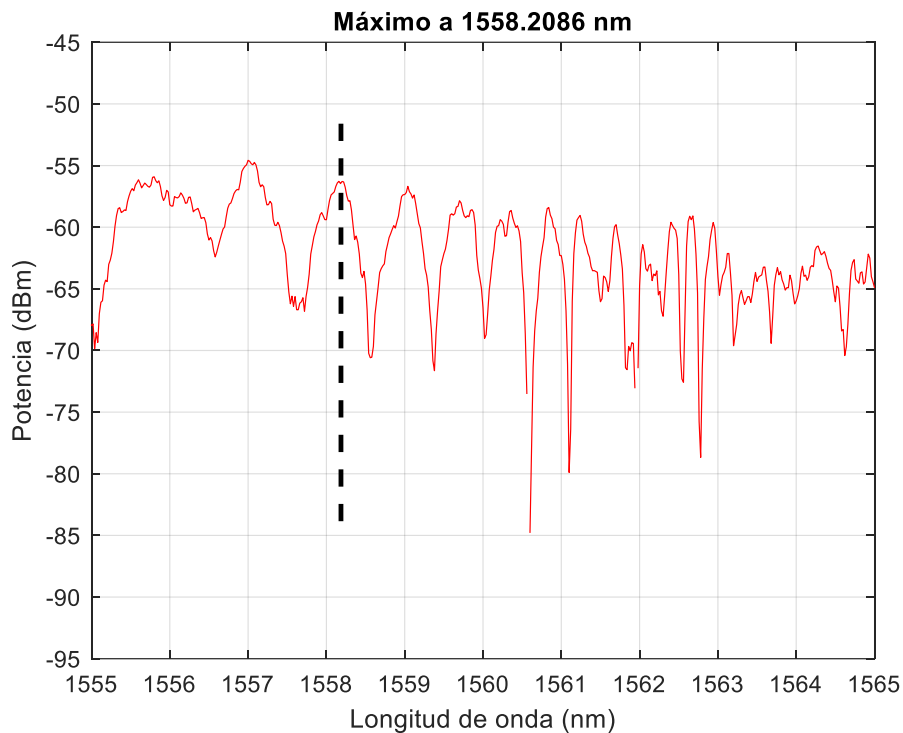
Figura 68. Experimento seguimiento de pico a 1557.0043 nm

En el seguimiento de este segundo pico (máximo en 1557.0043 nm), se aprecian los distintos cambios de medio, pero en sentido contrario, ya que la función de fitting seguramente pierda el pico, siguiendo a los anteriores (Figura 67). Además, al igual que el primer pico el filtrado no funciona bien.



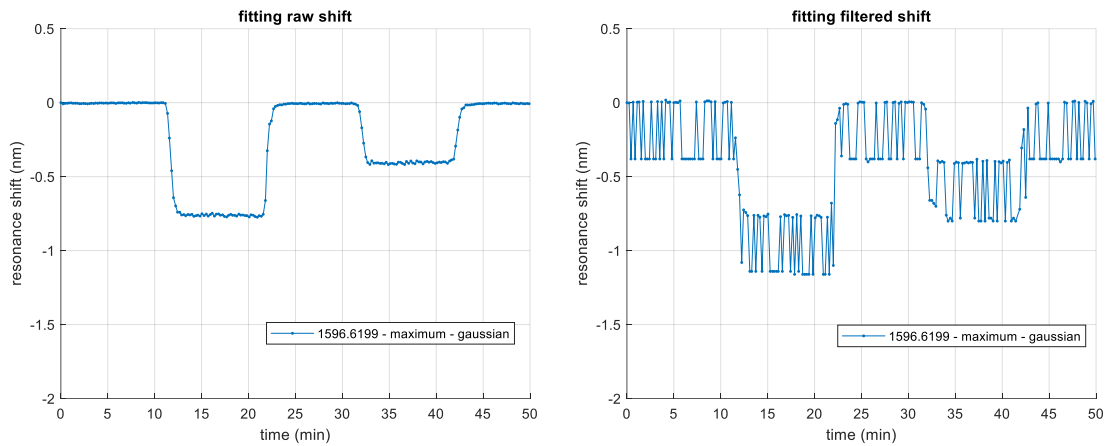
**Figura 69.** Experimento seguimiento de pico a 1558.2086 nm

En este tercer pico, que es un máximo en 1558.2086 nm, podemos observar cómo al igual que en el primer pico, al cambiar de agua a 10% de EtOH en volumen, el pico que se estaba siguiendo, cambia a otro, debido a que el pico no debería tomar valores negativos. En la Figura 70, podemos apreciar como las interferencias están muy juntas pudiendo afectar a la función de fitting, que es posible que se equivoque de pico al estar tan cercanas. Asimismo, el seguimiento del pico filtrado añade ruido y no lo elimina, pudiendo deberse a que es muy estrecho el pico y no tiene los suficientes valores para que la función fitting siga bien la curva.



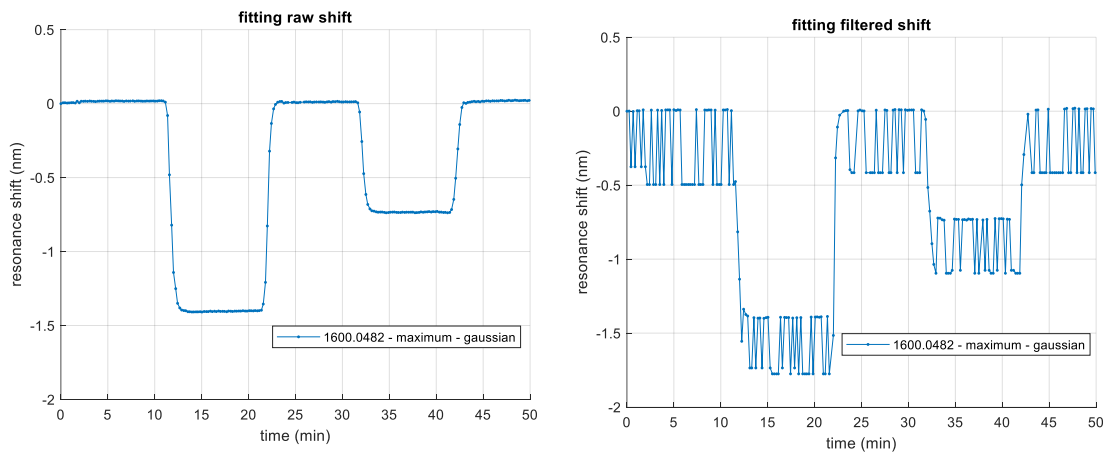
**Figura 70.** Zoom sobre el máximo 1558.2086 nm del espectro cross de la estructura corrugada 2 del bloque 2 del chip 7 de corrugadas largas





**Figura 72.** Experimento seguimiento de pico a 1596.6199 nm

En el cuarto pico característico, máximo a 1596.6199 nm, apreciamos de forma clara los cambios de medio tanto en el seguimiento del pico sin filtrar como en el seguimiento del pico filtrado, pero al igual que en los anteriores la función de fitting pierde el pico, llevando los valores a negativo y también añade ruido como en los anteriores.



**Figura 71.** Experimento seguimiento de pico a 1600.0482 nm

Por último, en el seguimiento del quinto pico, máximo en 1600.0482 nm, se puede ver también claramente las cinco fases del experimento. Sin embargo, en el seguimiento del pico filtrado, se añade ruido en vez de eliminarse. Además, de que, en vez de ser el desplazamiento positivo, es negativo ya que la función de fitting pierde el pico seguido.

Al igual que ocurría con la salida del chip de corrugadas cortas, los picos a la izquierda del PBG (entre 1565 y 1590 nm) se desplazan más en longitud de onda con respecto a los medidos a la derecha del PBG. Sin embargo, en este caso en las gráficas de desplazamiento en longitud de onda frente al tiempo, no se ve tan claro, debido a que en al ser tan estrechos los picos seguidos la función de fitting no consigue seguir de forma adecuada las interferencias bimodales.

Cabe destacar, que tanto en el chip de corrugadas cortas como en el chip corrugadas largas existe un tiempo desde que cambiamos de medio, hasta que el medio llega al chip. Por eso, cuando se van introduciendo los cambios siempre hay un retardo.

Tras el seguimiento espectral de los picos del chip 4 de corrugadas cortas y el chip 7 de corrugadas largas, hemos podido verificar que los picos de ambos chips son útiles, para el sensado y la detección de cambios de medio, pudiendo servirnos para analizar el agua y ver si está contaminada o no. No obstante, el seguimiento espectral de las interferencias bimodales de las estructuras corrugadas de mayor longitud fue más complejo de realizar, por un lado, porque solo pudimos seguir máximos debido a que el nivel de potencia era muy bajo, y, por otro lado, porque las interferencias bimodales eran muy estrechas siendo difíciles de seguir por la función de fitting.

### 5.7. Experimento seguimiento potencia

Ahora, pasamos a evaluar experimentalmente los chips a través de los experimentos de potencia a una longitud de onda determinada. Para ello, el procedimiento fue el siguiente (los tiempos son aproximados):

- 1º Fluir agua, durante los primeros 5 minutos.
- 2º Fluir agua más 10% de etanol, desde el minuto 5 hasta el minuto 10.
- 3º Volver a fluir agua, hasta el final del experimento (minuto 15).

Tiempo durante el cual, en vez de realizar una gráfica potencia / longitud de onda y analizarla, vamos a ir obteniendo el valor de potencia, para una longitud de onda determinada con el tiempo. Para el seguimiento de la potencia, tenemos otra función de Matlab, que, al ejecutarla, se nos abre la ventana que podemos ver en la Figura 73. En la cual podemos controlar algunos de los parámetros del láser, como encender / apagar, seleccionar la potencia y la longitud de onda. Asimismo, podemos seleccionar los parámetros del barrido, como la velocidad (10 nm/s), el paso (20 pm) o el rango del barrido (de 1520 nm a 1630 nm). Y, por último, controlar el experimento, a través del tiempo entre mediciones (0.1 s) y el tiempo de promediado (75 ms), que debe ser siempre menor que el tiempo entre mediciones.

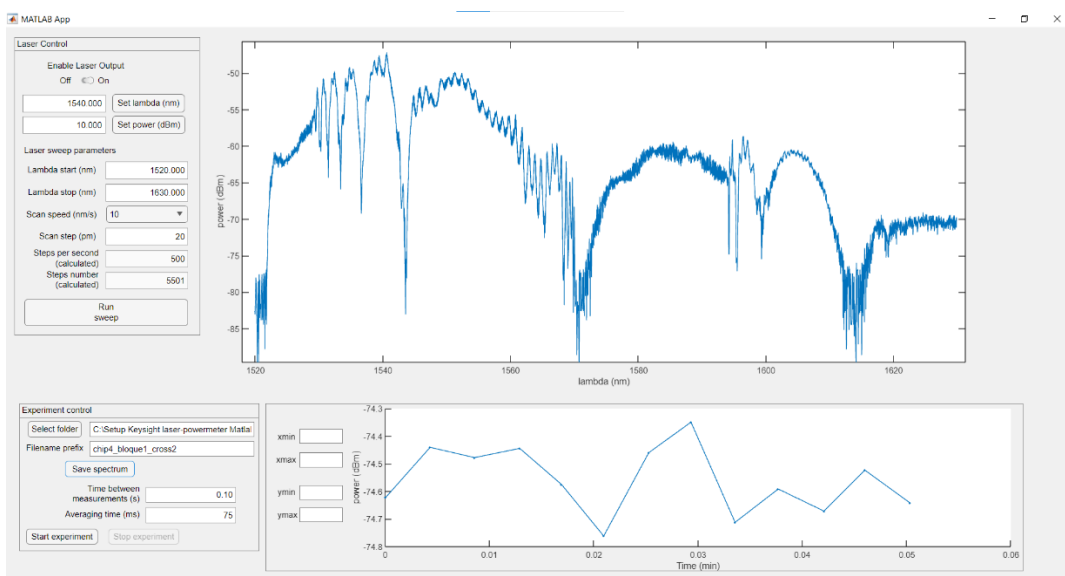
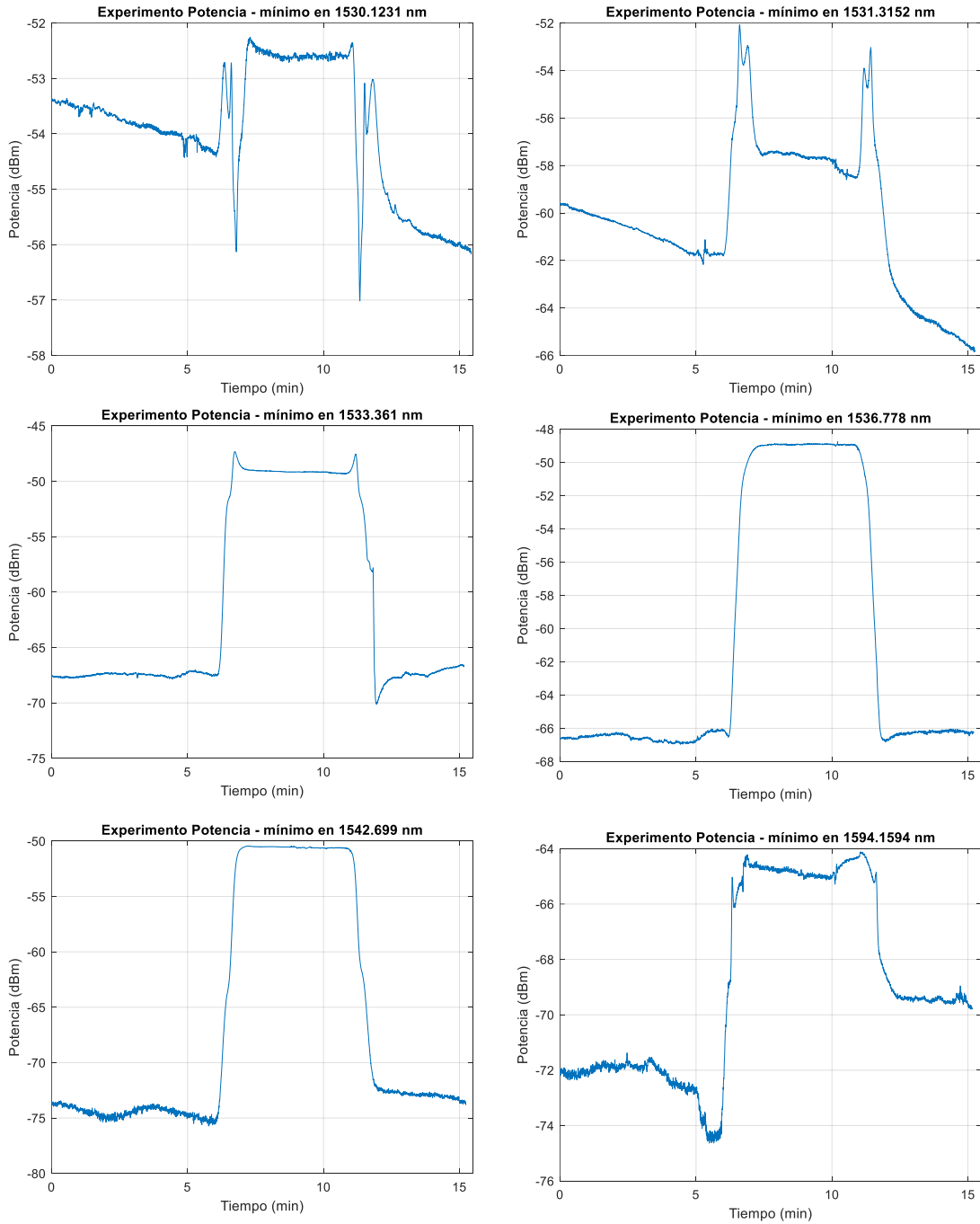
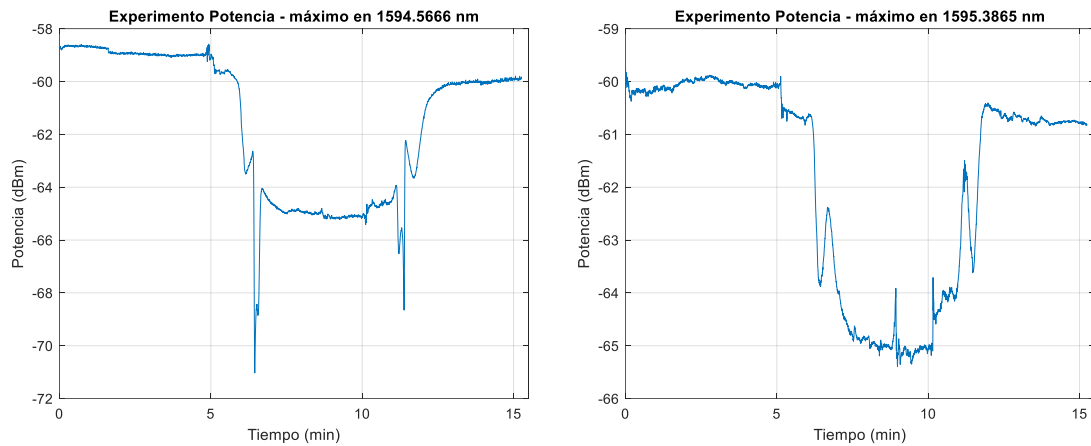


Figura 73. Captura de la ventana de la función de Matlab para los experimentos de seguimiento de la potencia

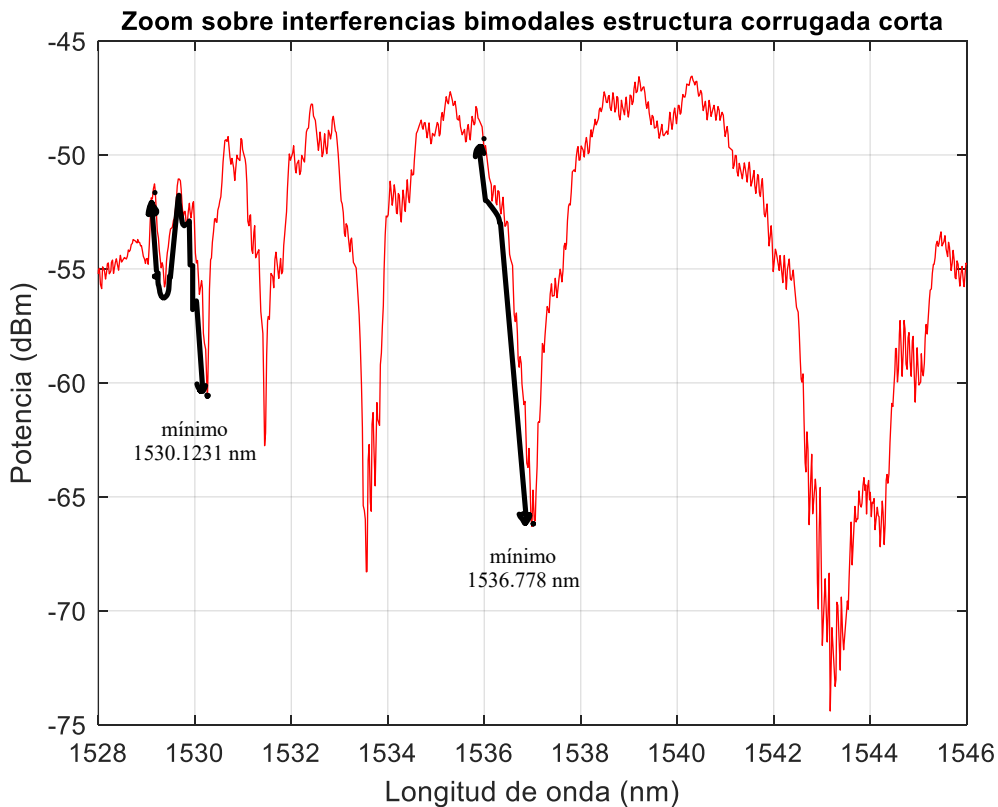
Una vez visto el funcionamiento de la función de Matlab. Vamos a ir mostrando los resultados del seguimiento de la potencia para ambos chips. Empezando por el chip 4 de corrugadas cortas, del que al igual que para el experimento del seguimiento del pico, elegimos la salida cross 2 del bloque 1, por ser de las salidas en las que mejor se veían las interferencias bimodales. El espectro en agua de la salida cross 2 del bloque 1, se puede ver en la Figura 56.





**Figura 74.** Experimentos de potencia en ocho picos característicos del chip 4 de corrugadas cortas

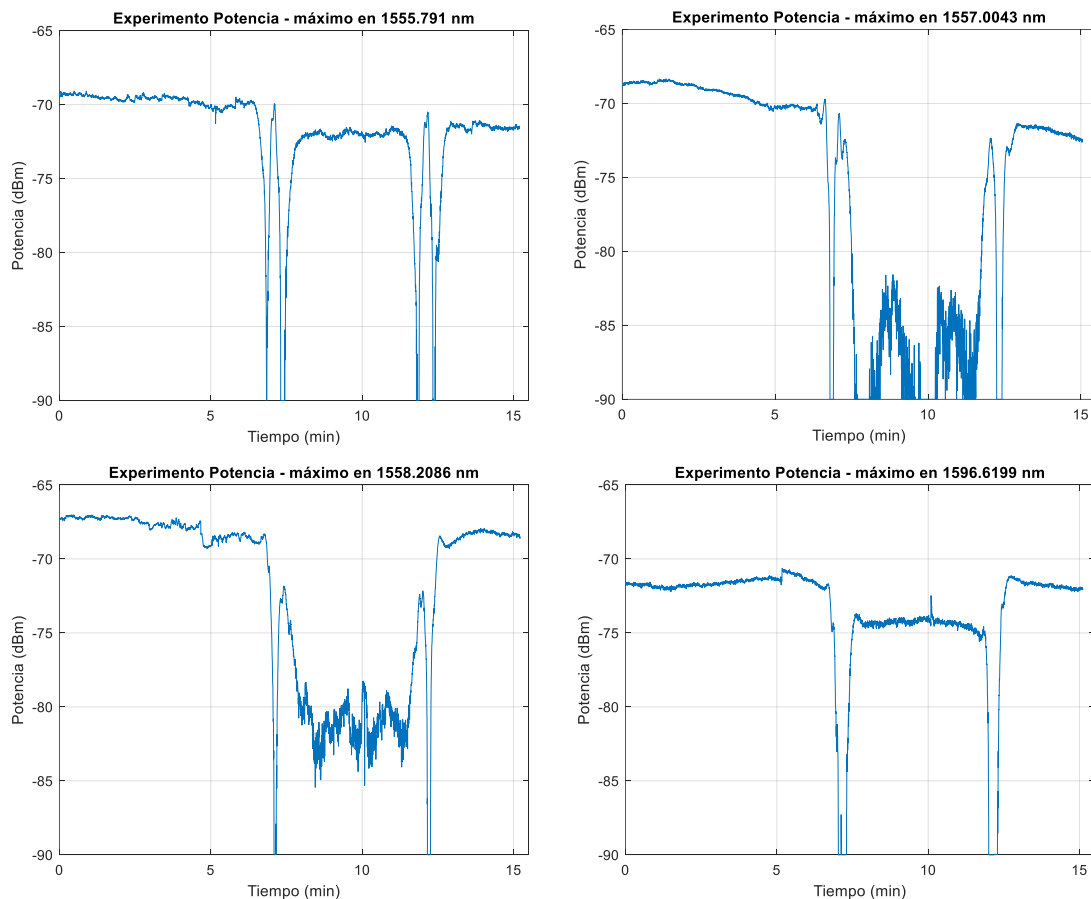
En la Figura 74, podemos observar 8 experimentos de potencia, para los ocho picos característicos vistos en los experimentos de seguimiento de pico. En estos se fija una longitud de onda y se cambia el medio cada 5 minutos, lo que provoca que cambie el índice de refracción efectivo de cada modo que se propague por la guía, provocando un cambio mayoritario en la constante de propagación de uno de los modos, es decir, cambiando la fase de uno de los modos (el de orden superior) que pasan por la corrugada y creando una diferencia de fase entre el modo fundamental y el de orden superior. Diferencias que se pueden observar en los cambios de potencia, al variar el medio que fluye sobre los chips. En la Figura 75, se representa la variación aproximada en potencia que sufren algunas de las longitudes de onda fijadas (mínimo en 1530.1231 nm y 1536.778 nm) al desfasarse la interferencia entre los modos.

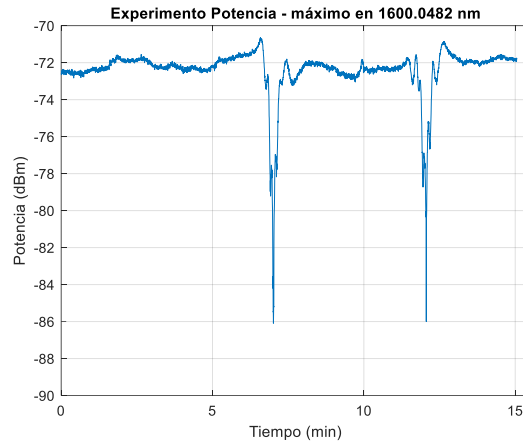


**Figura 75.** Zoom sobre las interferencias bimodales de la estructura corrugada corta

El primer experimento con el mínimo en 1530.1231 nm presenta una diferencia de fase entre los caminos ópticos de algo más de  $2\pi$ , pues la potencia sube un poco, luego baja y vuelve a subir, en el cambio de medio, esto se puede ver en la Figura 75. Esta diferencia de fase entre los modos nos posibilita observar los cambios de medio, al igual que cuando se desplazaban los picos característicos. Igual que para este mínimo, el funcionamiento es el mismo para medir el desfase entre los modos. Después, el experimento de potencia correspondiente al mínimo en 1531.3152 nm tiene una diferencia de fase entre los caminos ópticos de algo menos de  $2\pi$ , pues sube, pero no baja hasta el mismo punto. Tras este experimento, podemos observar los experimentos de potencia correspondientes, a los mínimos 1533.361 nm, 1536.778 nm (Figura 75), 1542.699 nm y 1594.1594 nm, en los cuales la diferencia de fase entre los caminos ópticos es solamente  $\pi$ , pues todos suben, pero no bajan durante el cambio de medio. Tras estos, hicimos el experimento de potencia a algún máximo, como el máximo en 1594.5666 nm con diferencia de fase entre los caminos ópticos de algo más de  $2\pi$ , en el cual baja un poco, luego sigue bajando y sube. Y, por último, para el chip 4 de corrugadas cortas, hicimos el experimento de potencia para el máximo en 1595.3865 nm, en el cual la diferencia entre los caminos ópticos es de  $\pi$  aproximadamente, pues baja la potencia, pero no sube. Asimismo, en este último experimento se puede apreciar cómo es un pico bastante ruidoso, pudiendo ser varias interferencias bimodales juntas o rizado de tipo Fabry-Pérot.

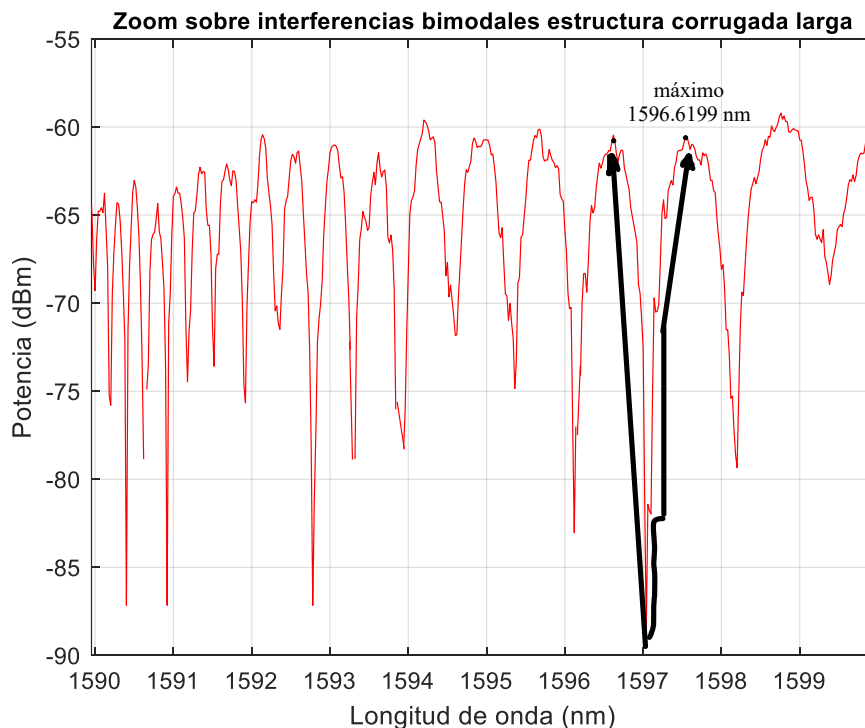
Ahora pasamos con el chip 7 de corrugadas largas, del que al igual que para el experimento del seguimiento del pico, elegimos la salida cross 2 del bloque 2, por ser de las salidas en las que mejor se veían las interferencias bimodales. El espectro en agua de la salida cross 2 del bloque 2, se puede ver en la Figura 65.





**Figura 76.** Experimentos de potencia para cinco picos característicos del chip 7 de corrugadas largas

En la Figura 76, podemos observar 5 experimentos de potencia, para los cinco picos característicos vistos en los experimentos de seguimiento de pico. En este chip de corrugadas largas, solamente pudimos fijar longitudes de onda que se encontraban en máximos, pues si seleccionábamos mínimos, cabía la posibilidad de que el monitor de potencia del láser, no nos diese valores o estos fuesen infinitos. Además, en la Figura 77, podemos apreciar como la potencia cambiará a lo largo de las interferencias cuando cambie el índice de refracción y cómo sube y baja el nivel de señal para una determinada longitud de onda (máximo en 1596.6199 nm) por el cambio en el desfase entre ambos modos.



**Figura 77.** Zoom sobre las interferencias bimodales de la estructura corrugada larga

Empezando por el primer experimento, el máximo a 1555.791 nm, vemos que la diferencia entre los caminos ópticos es de  $4\pi$ , siendo el pico en el cual se refleja mayormente el cambio de medio. Tras este experimento, hicimos el experimento de potencia para el máximo a 1557.0043 nm, en el cual podemos ver que la diferencia de

fase entre los caminos ópticos es de aproximadamente  $3\pi$ . Asimismo, en el máximo a 1558.2086 nm, la diferencia de fase entre los caminos ópticos es de algo más de  $2\pi$ , pues baja la potencia, sube y vuelve a bajar. Y, por último, en los experimentos de potencia para los máximos 1596.6199 nm (Figura 77) y 1600.0482 nm, podemos observar que son los que menor diferencia de fase presentan, unos  $2\pi$ .

Una vez evaluado experimentalmente los dos tipos de chips, hemos podido verificar que, tanto a través de los experimentos de seguimiento espectral como de los experimentos de seguimiento de potencia, los dos nos posibilitan detectar los cambios de medio. No obstante, como ya hemos ido comentado anteriormente, la medición y ejecución de los experimentos mediante los chips de corrugadas largas fue más difícil en comparación a la de los chips de corrugadas cortas. Debido principalmente a que solo pudimos seguir máximos y a que las interferencias bimodales eran muy estrechas, lo que dificultaba su seguimiento a través de las funciones de Matlab. A pesar de estos inconvenientes, cabe destacar que los chips de corrugadas largas en los experimentos de seguimiento de potencia presentaron una mayor respuesta en cuanto al desfase entre el modo fundamental y el de orden superior, que se propaga sobre las corrugadas. Sin embargo, la respuesta que se esperaba en los chips de corrugadas largas era distinta, ya que la longitud de sus estructuras corrugadas (10 veces mayor que en los chips de corrugadas cortas) nos incitaba a pensar que habría un mayor desfase. Por lo tanto, se puede observar que los chips de corrugadas cortas son más versátiles, a la hora de trabajar con ellos porque nos ofrecen menos impedimentos, aun cuando presentan menos interferencias bimodales en sus espectros.

## 6. CONCLUSIONES

Los sensores fotónicos integrados basados en estructuras interferométricas bimodales de cristal fotónico en nitruro de silicio, que se exponen en este trabajo, suponen un gran avance en el campo de los sensores fotónicos. Sus características los convierten en una gran herramienta para el biosensado, pudiendo ser de gran ayuda en el mundo en el que vivimos, lleno de amenazas biológicas y químicas, en las que su rápida detección, a partir de pequeñas muestras es fundamental para solventar cientos de problemas.

Asimismo, la tendencia actual en la fabricación de biosensores da una gran importancia a la miniaturización de los sensores, que gracias al uso de guías de onda de cristal fotónico y a las configuraciones bimodales, se ha logrado una notable miniaturización de los dispositivos sin comprometer su sensibilidad.

Las medidas realizadas confirman la aparición de interferencias bimodales en las estructuras evaluadas, observándose que estas interferencias son más estrechas cuando uno de los modos se encuentra en la región de onda lenta. Además, las diferentes configuraciones de los chips de nitruro de silicio ya sean de corrugadas largas o cortas, contienen estas interferencias en distintas posiciones del espectro, con variaciones en el número de interferencias y su anchura. Lo que sugiere que los parámetros específicos de cada configuración influyen significativamente en la respuesta espectral obtenida.

Para la estructura corrugada 2 que hemos seleccionado para hacer este estudio, por ser en la que mejor se diferenciaban las interferencias bimodales, se ha logrado medir la respuesta de sensado tanto mediante el seguimiento espectral como a través de el seguimiento en potencia. Sin embargo, el seguimiento espectral requiere una fuente láser sintonizable, que incrementa considerablemente el coste del equipamiento, mientras que la medición a una longitud de onda fija puede realizarse utilizando un láser a una longitud de onda fija, el cual representa una alternativa más económica. No obstante, para que esta opción sea viable, es imprescindible que las interferencias de interés se encuentren dentro del rango de la longitud de onda seleccionada para todos los chips que se utilicen en los experimentos.

En las condiciones experimentales actuales, el seguimiento espectral nos permite determinar con precisión el desplazamiento de las interferencias, lo que es crucial para establecer una relación entre el desplazamiento espectral y la concentración de EtOH al 5% o 10% (en volumen). Por otro lado, la medición basada en la potencia de la señal presenta mayores dificultades para correlacionar los cambios de señal con las concentraciones específicas de EtOH al 10%, dado que cada interferencia presenta variaciones en su profundidad y anchura. Sin embargo, cuando se utilizan chips con las estructuras corrugadas más largas, el sensado basado en la potencia nos posibilita observar un mayor número de oscilaciones, ya que se produce un cambio más significativo en el desfase comparado con las estructuras de corrugadas más cortas. Lo que sugiere que las estructuras corrugadas más largas pueden ofrecer una mayor sensibilidad en aplicaciones en la que se utilicen mediciones de potencia para la detección de cambios de medio.



Aun así, existen aspectos de mejora en estos dispositivos, como la sensibilidad al ruido ambiental y de medida, así como la mejora de los setups del laboratorio para la automatización de las medidas. Para futuros trabajos sería interesante explorar la funcionalización de las distintas estructuras corrugadas, pudiendo funcionalizar cada uno de los bloques de los chips con diferentes bioreceptores para mejorar la detección selectiva de diferentes analitos, permitiendo una detección multiplexada y aumentando la capacidad de los chips para detectar simultáneamente varias sustancias en una única muestra, lo cual es fundamental para aplicaciones en diagnóstico médico. Asimismo, la implementación de Inteligencia Artificial (IA) podría proporcionar mejoras significativas en el análisis de los datos y la optimización de los parámetros de barrido. Así, la IA se podría utilizar para el procesamiento en tiempo real de los datos espectrales y de potencia, mejorando la precisión de sensado, posibilitándonos maximizar la sensibilidad y reducir el ruido, potenciando de esta manera la eficacia de estos sensores fotónicos integrados.

## REFERENCIAS

- [1] La revolución de la nanotecnología en la medicina del futuro. (2014, marzo 25). ELMUNDO. <https://www.elmundo.es/ciencia/2014/03/25/5331560a268e3e8a688b4571.html>
- [2] Morillo, Y. (2023, mayo 12). Nanotecnología en la medicina | Aplicaciones y desafíos. Futuro Electrico. <https://futuroelectrico.com/nanotecnologia-en-la-medicina/>
- [3] Miluska.Jara. (s. f.). Objetivos y metas de desarrollo sostenible. Desarrollo Sostenible. Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [4] Salud. (s. f.). Desarrollo Sostenible. Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/health/>
- [5] Moran, M. (s. f.). Agua y saneamiento. Desarrollo Sostenible. Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>
- [6] *Optics & photonics news - nanophotonic biosensors: Driving personalized medicine.* (s. f.). Recuperado 30 de agosto de 2024, de [http://www.optica-opn.org/home/articles/volume\\_31/april\\_2020/features/nanophotonic\\_biosensors\\_driving\\_personalized\\_medic/](http://www.optica-opn.org/home/articles/volume_31/april_2020/features/nanophotonic_biosensors_driving_personalized_medic/)
- [7] Llorente Sáez R, Sensado interferométrico (Mach-Zehnder) [transparencias]. Micro-Nano Tecnología. 23 de julio de 2024. Universitat Politècnica de Valencia.
- [8] Xiao, Y., Pichler, E., Hofmann, M., Bethmann, K., Köhring, M., Willer, U., & Zappe, H. (2014). *Towards integrated resonant and interferometric sensors in polymer films. Procedia Technology, 15*, 691-701. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.040>
- [9] Llorente Cerezuela, P. (2022). Desarrollo de estructuras interferométricas bimodales de cristal fotónico en nitruro de silicio para aplicaciones de sensado [Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/187819>
- [10] *Development of bimodal waveguide interferometric sensors for environmental monitoring.* (s. f.). Portal de Investigación de la Universitat Autònoma de Barcelona. Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://portalrecerca.uab.cat/es/studentTheses/development-of-bimodal-waveguide-interferometric-sensors-for-envi>
- [11] Castelló, J. G. (2013, febrero 22). Anillos resonantes en SOI para aplicaciones de sensado. <https://www.semanticscholar.org/paper/Anillos-resonantes-en-SOI-para-aplicaciones-de-Castell%C3%B3/343aa5e4e11e919f989ca29a617f5c33951470d6>
- [12] Torrijos-Morán, L., Griol, A., & García-Rupérez, J. (2021). *Slow light bimodal interferometry in one-dimensional photonic crystal waveguides.* *Light: Science & Applications, 10*(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-00460-y>

- [13] Torrijos-Morán, L., Brimont, A., Griol, A., Sanchis, P., & García-Rupérez, J. (2021). *Ultra-compact optical switches using slow light bimodal silicon waveguides*. *Journal of Lightwave Technology*, 39(11), 3495-3501. <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3066479>
- [14] Llorente Sáez R, Sensado mediante fibra óptica [transparencias]. Micro-Nano Tecnología. 23 de julio de 2024. Universitat Politècnica de Valencia.
- [15] Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N., & Meade, R. D. (2011, octubre 30). *Photonic crystals: Molding the flow of light - second edition*. <https://doi.org/10.2307/j.ctvc4m4gz9>
- [16] Hariharan, P. (2007). Preface to the second edition. En P. Hariharan & P. Hariharan (Eds.), *Basics of Interferometry (Second Edition)* (pp. xix-xx). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012373589-8/50001-8>
- [17] Yu, C., & Irudayaraj, J. (2007). *Multiplex biosensor using gold nanorods*. *Analytical Chemistry*, 79(2), 572-579. <https://doi.org/10.1021/ac061730d>
- [18] Wu, Y., Wang, G., Yu, X., Fan, Y., Chen, X., & Liu, S. (2024). *Label-free dna hybridization detection using a highly sensitive fiber microcavity biosensor*. *Sensors*, 24(1), 278. <https://doi.org/10.3390/s24010278>
- [19] Vishalatchi, S., Murugan, K., Ramrao, N., & Sharan, P. (2024). *Modeling and realization of photonic biosensor for hazardous virus detection using ML approach*. *Journal of Optics*. <https://doi.org/10.1007/s12596-023-01643-7>
- [20] Martínez-Pérez, P., Gómez-Gómez, M., Angelova, T., Griol, A., Hurtado, J., Bellieres, L., & García-Rupérez, J. (2020). *Continuous detection of increasing concentrations of thrombin employing a label-free photonic crystal aptasensor*. *Micromachines*, 11(5), 464. <https://doi.org/10.3390/mi11050464>
- [21] Flores-Rivera, O. I., Ramírez-Morales, K., Meza-Márquez, J. M., & Nava-López, J. A. (2014). Fisiología de la coagulación. *Revista Mexicana de Anestesiología*, 37(S2). <https://www.medigraphic.com/cgi-bin/new/resumen.cgi?IDARTICULO=54265>
- [22] *Polarizing optical fiber*. (s. f.). Recuperado 29 de agosto de 2024, de <https://www.thorlabs.com>
- [23] Galan, J. V., Griol, A., Hurtado, J., Sanchis, P., Preve, G. B., Hakansson, A., & Marti, J. (2009). *Packaging of silicon photonic devices: Grating structures for high efficiency coupling and a solution for standard integration*. *2009 European Microelectronics and Packaging Conference*, 1-6. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5272951>

# **Parte II**

## **Presupuesto**

## 1. Introducción al Presupuesto

El desarrollo de este Trabajo de Final Grado ha necesitado de recursos, tanto materiales, como humanos. A continuación, se presenta un presupuesto detallado que refleja los gastos necesarios para evaluar experimentalmente las dos configuraciones de sensores vistas. Este presupuesto se desglosa en los presupuestos parciales de mano de obra, materiales y maquinaria, los cuales serán sumados con otros gastos para obtener el presupuesto de ejecución por contrata de este trabajo.

## 2. Costes parciales

### 2.1. Cuadro de mano de obra

En este apartado se detallan los costes asociados al personal que ha colaborado en el desarrollo de este trabajo. El coste parcial de la mano de obra está determinado por el número de personas involucradas y el tiempo dedicado por cada una. Así, los participantes de este trabajo han sido el tutor, el Ingeniero de Laboratorio y el Ingeniero Biomédico Junior.

Tabla 1. Cuadro de precios de la mano de obra

Código	Descripción	Precio (€/h)	Tiempo (h)	Total (€)
MO01	Tutor	31.00	60.5	1875.50
MO02	Ingeniero de Laboratorio	31.00	30	930.00
MO03	Ingeniero Biomédico Junior	15.00	280	4200.00
<b>Total mano de obra:</b>				<b>7005.50</b>

Como se observa, el precio asociado a la mano de obra es de **siete mil cinco euros con cincuenta céntimos**.

### 2.2. Cuadro de materiales

En esta sección se muestran los materiales usados para la realización de este trabajo.

Tabla 2. Cuadro de materiales

Código	Descripción	Precio (€/ud.)	Cantidad (uds.)	Total (€)
MAT01	Pipetas de varios volúmenes	370.00	2	740.00
MAT02	Puntas de pipeta	0.01	20	0.20
MAT03	Licencia Matlab Estándar	100.00	1	100.00
MAT04	Pack de guantes de látex	13.00	1	13.00
MAT05	Jeringa bomba de extracción	10.00	1	10.00
MAT06	Pinzas para manipular muestras	2.00	3	6.00
MAT07	Portátil	500.00	1	500.00
MAT08	Monitor de sobremesa	100.00	2	200.00
MAT09	Teclado	25.00	1	25.00
MAT10	Ratón	5.00	1	5.00
MAT11	Licencia de Office 365	200.00	1	200.00
MAT12	Chip corrugadas cortas	0.50	5	2.50
MAT13	Chip corrugadas largas	0.50	7	3.50
MAT14	Tubos eppendorf	0.03	10	0.30
MAT15	Lámpara	20.00	1	20.00
<b>Total materiales:</b>				<b>1825.50</b>

Como se puede apreciar, el precio asociado a los materiales es de **mil ochocientos veinticinco euros con cincuenta céntimos**.

### 2.3. Cuadro de maquinaria

En esta parte se presentan los precios asociados a la maquinaria que se ha utilizado para la caracterización y evaluación experimental de los distintos chips.

Tabla 3. Cuadro de maquinaria

Código	Descripción	Coste total (€)	Vida útil estimada (años)	Precio (€/h)	Cantidad (h)	Total (€)
MAQ01	Módulo láser	18000	10	1.73	100	173.00
MAQ03	Mainframe	5000	10	0.48	100	48.00
MAQ03	Detector	7000	10	0.67	100	67.00
MAQ04	Bomba ext.	1100	10	0.11	70	7.70
MAQ05	Setup*	4000	10	0.38	100	38.00
<b>Total maquinaria:</b>						<b>333.70</b>

Como se puede observar, el precio asociado a la maquinaria es de **trescientos treinta y tres con setenta céntimos**.

\*Setup incluye posicionadores, piezas del setup y microscopio con la cámara

### 3. Coste total

El coste total de este trabajo se corresponde a la suma de todos los costes parciales anteriormente calculados. Además, a este coste, hay que añadirle los costes por desplazamiento y dietas que aproximadamente son 300€. Asimismo, se añaden los costes estructurales, calculados como el 10% de los costes de ejecución total. Tras esto, se obtendrá el presupuesto en bruto, al que se tendrá que añadir el 21% de IVA para obtener el presupuesto de ejecución por contrata.

Tabla 4. Coste total

Descripción	Total (€)
Coste mano de obra	<b>7005.50</b>
Coste de los materiales	<b>1825.50</b>
Coste de la maquinaria	<b>333.70</b>
Coste de ejecución total	9164.70
Coste por desplazamiento y dietas	300.00
Costes estructurales (10%)	916.47
Presupuesto en bruto	10381.17
IVA (21%)	2180.05
<b>Presupuesto de ejecución por contrata</b>	<b>12561.22</b>

Finalmente, observamos que el coste asociado al presupuesto de ejecución por contrata es de **doce mil quinientos sesenta y un euros con veintidós céntimos**.