



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

Estudio de fibras de cristal fotónico para biosensado haciendo uso de interrogación transversal

AUTOR: GONZALO COLLANTES PABLO

TUTOR: ALEJANDRO JOSE MARTINEZ ABIETAR

COTUTOR: JAIME GARCIA RUPEREZ

Curso Académico: 2016-17

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi familia, a mis amigos y todo el equipo del NTC que me ha ayudado a realizar este trabajo, en especial a Jaime, Salva y Raffaele por su implicación.

RESUMEN

Las fibras de cristal fotónico son un tipo de fibra óptica especial que se encuentra perforada longitudinalmente por una red de agujeros. Su microestructura característica le confiere propiedades únicas que, junto con la personalización en el diseño, la presencia de agujeros y la inmunidad a interferencias electromagnéticas, crean una combinación perfecta para poder utilizarlas como sensores. Concretamente en biomedicina, las fibras de cristal fotónico serían ideales para el sensado de líquidos, gases y biomoléculas. En este trabajo se propone un estudio teórico y experimental de este tipo de fibras para demostrar si siguen los principios físicos de los cristales fotónicos bidimensionales y si pueden utilizarse como biosensores.

Palabras Clave: Fibras de cristal fotónico, cristales fotónicos, biosensado

INDICE DE DOCUMENTOS

Documento de Memoria

Documento de Presupuesto



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Trabajo Fin de Grado en
Ingeniería Biomédica

Curso Académico 2016-2017

DOCUMENTO DE MEMORIA

ESTUDIO DE FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO PARA BIOSENSADO
HACIENDO USO DE INTERROGACIÓN TRANSVERSAL

Gonzalo Collantes Pablo

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 CONTEXTO	8
1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN	10
1.3 OBJETIVOS	10
1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA	10
1.5 CENTRO DE TECNOLOGÍA NANOFOTÓNICA DE VALENCIA	11
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	12
2.1 INTRODUCCIÓN A LA FIBRA ÓPTICA	12
2.1.A DEFINICIÓN	12
2.1.B Estructura	12
2.2 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA	13
2.2.A Según los modos propagados	13
2.2.B Según el principio físico	14
2.3 TEORÍA DE LOS CRISTALES FOTÓNICOS	15
2.3.A INTRODUCCIÓN	15
2.3.B ESTUDIO ANALÍTICO	15
3. ESTADO DEL ARTE	19
4. ESTRUCTURA DE LA FIBRA	21
4.1 DESCRIPCIÓN	21
4.2 PROPIEDADES	21
4.3 ESTRUCTURA	21
5. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LA FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO	22
5.1.A SOFTWARE	22
5.1.B PROTOCOLO DE SIMULACIONES	22
5.1.C RESULTADOS	22
6. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO	24
6.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE INFRARROJO CERCANO	24
6.1.A MONTAJE	24

6.2	CARACTERIZACIÓN CON FTIR	31
7.	PRUEBAS DE SENSADO	34
7.1	SENSADO DE LÍQUIDOS	34
7.2	SENSADO DE GASES	35
9.	CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	37
9.1	CONCLUSIONES	37
9.2	TRABAJO FUTURO	37
10.	BIBLIOGRAFÍA	38

1. INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

■ De la electrónica a la fotónica

Actualmente nos encontramos en medio de una gran revolución tecnológica: el paso de la electrónica a la fotónica. Tras haber explotado las propiedades eléctricas de los materiales, y sus aplicaciones en numerosos y diversos campos, ha llegado un punto en el que se buscan mejoras que ya no puede proporcionar la electrónica. En este sentido, la fotónica se postula como el mejor sustituto en un futuro no muy lejano.

Este cambio ha sido notablemente importante en el mundo de las telecomunicaciones, donde la fibra óptica como máximo exponente, ha cambiado de forma radical la forma de transmitir información, proporcionando mayor velocidad, garantizando menos pérdidas y reduciendo el gasto energético.

Sin embargo, el paso de trabajar con electrones a hacerlo con fotones no es tan sencillo. Actualmente el trabajo se centra en desarrollar dispositivos todo-ópticos, evitando así cuellos de botella por la conversión de fotones a electrones que optimizarían las ventajas de esta tecnología.

En esta situación empiezan a surgir numerosas investigaciones interesadas en aplicar las ventajas de esta tecnología a multitud de aplicaciones innovadoras, incluyendo como veremos en este trabajo, **la biomedicina**.

■ Medicina actual

Por otro lado, encontramos el campo de la medicina que históricamente ha aprovechado los últimos avances tecnológicos para mejorar, llegando incluso a depender, en muchos casos, totalmente de ellos para la práctica diaria. La imagen médica, la neurocirugía o la telemedicina son algunos ejemplos.

La medicina actual tiene como pilares: ser preventiva y mínimamente invasiva. Por este motivo emerge como un campo decisivo de investigación el desarrollo de dispositivos, para el diagnóstico y monitorización del paciente, que le sometan al menor daño posible.

■ Medicina y fotónica. Biofotónica

El boom de la fotónica ha cobrado una relevancia particular en el ámbito biomédico donde la unión de esta disciplina física aplicada a las ciencias de la vida, conocida como *biofotónica*, ya está presente en especialidades tan variadas como: la dermatología, la oftalmología, la cirugía, la oncología y la diagnosis.

Respecto a esta última, en el que nos centraremos en este trabajo, la biofotónica se llega a considerar la base del **biosensado** del futuro por las ventajas exclusivas que ofrece.

■ Biosensado

Las tendencias actuales que se basan en garantizar una medicina preventiva centran su investigación en el biosensado para el diagnóstico.

Un *biosensor* es un dispositivo capaz de detectar analitos (proteínas, DNA, iones, patógenos, etc.) por medio de un reconocimiento biomolecular específico.

Existen diversos tipos de biosensores según el tipo de transductor: electroquímicos, piezoeléctricos, ópticos, mecánicos y térmicos.

Todos ellos comparten unas características que garantizan el éxito en la función desempeñada: alta sensibilidad, especificidad, rapidez, necesidad de pocos volúmenes de muestras, simplicidad en el manejo, portabilidad y bajo coste

En este trabajo haremos uso de un **biosensor óptico**.

■ Biosensores ópticos

Nos referimos a biosensores ópticos como aquellos que basan su poder de medición en la variación de algún fenómeno óptico inducida por la presencia de moléculas de un determinado analito.

Este fenómeno óptico puede ser: reflexión, refracción, dispersión, resonancia, interferometría, o combinación de los anteriores.

Así pues, para ser capaces de cuantificar esas variaciones nos ayudaremos de variables medibles, siendo las más utilizadas:

- intensidad de la luz absorbida
- intensidad de la luz emitida
- tiempo de decaimiento de luminiscencia
- cambios en los espectros de vibración
- propiedades de la polaridad de la luz
- cambios en el índice de refracción

Con todo esto, y haciendo un uso eficaz de las propiedades, los biosensores ópticos se podrán detectar de manera sensible y específica todo tipo de sustancias biológicas incluyendo virus, proteínas, DNA, componentes celulares y biomarcadores.

■ Fibra de cristal fotónico

Teniendo en cuenta todo lo anterior llegamos al propósito de este trabajo: realizar un estudio de un biosensor basado en un tipo de fibra óptica especial denominada fibra de cristal fotónico, fibra microestructurada o en inglés *photonic crystal fiber (PCF)*.

Este tipo de fibras se caracterizan por estar atravesadas en su longitud por un conjunto de agujeros dispuestos en una geometría concreta que rodean a un núcleo hueco (hollow core) o sólido (solid-core).

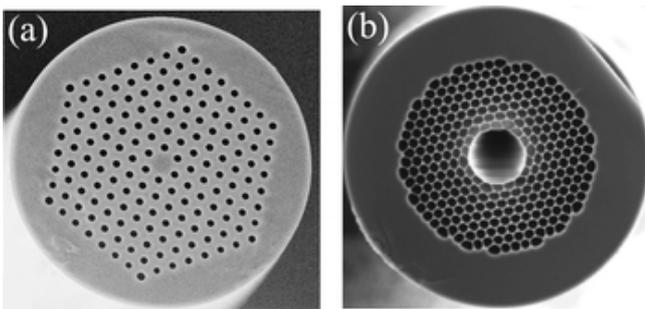


fig. 1. Corte transversal de fibras solid-core y hollow core

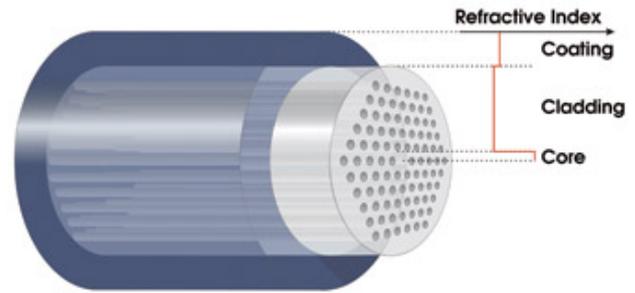


fig. 2. Estructura de la fibra solid core

Físicamente es vista como una variación periódica del índice de refracción en dos dimensiones y por tanto, como veremos, sigue los principios de un cristal fotónico bidimensional. Así, queda justificado el nombre asignado por **Philip Russell**¹ cuando, en 1996 publicó el primer prototipo de una "fibra de cristal fotónico".[1]

La microestructura determina su comportamiento y permite conseguir una serie de ventajas y posibilidades que no puede ofrecer una fibra convencional.

Como sensor ya son muchos y muy diversos los campos de aplicación que utilizan estas fibras por ser muy sensibles a parámetros físicos de interés. La aeronáutica, el control de estructuras, la robótica y las telecomunicaciones son claros ejemplos.

Sin embargo, destacamos la biomedicina como gran ámbito de aplicación de estas fibras en el sensado de biomoléculas, líquidos y gases principalmente por tres razones:

- 1) Personalización en el diseño
- 2) Presencia de agujeros
- 3) Pequeñas muestras y reactivos necesarios

El propio Philip Russel ya advirtió en su primer artículo de las posibilidades de este tipo de fibras como sensor. [1]

"(...)The fiber presented here could provide a means to enhance the interaction of light with a gas that is in the air holes, for example, for use in a gas sensor(...)"

¹ Director fundador del Max Planck Institute for the Science of Light

1.2 PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN

Las fibras de cristal fotónico (es decir, perforadas longitudinalmente por un array periódico de micro-agujeros) han cobrado un gran interés recientemente, ya que sus propiedades son muy prometedoras para aplicaciones que van desde fenómenos no lineales hasta sensado de líquidos y gases.

En ese último caso, el hecho de que los agujeros de la fibra puedan ser infiltrados con ciertas sustancias es lo que le confiere la relevancia para aplicación en bio-sensado.

En general, el sensado se produce inyectando y detectando luz en la dirección longitudinal, lo que hace que los dispositivos aunque eficientes sean de mucha longitud.

Sin embargo, las propiedades de periodicidad de la fibra permiten también que esta pueda interactuar fuertemente con la luz inyectada en la dirección transversal.

De hecho, la periodicidad debe producir bandas de propagación prohibidas cuyas frecuencias variarán enormemente con la infiltración de gases o líquidos, por lo que se podría realizar bio-sensado en una distancia mucho menor que en el caso de la inyección de luz en la dirección longitudinal.

En este TFG se propone explorar esta alternativa como una nueva vía de bio-sensado fotónico.

1.3 OBJETIVOS

Los objetivos de este proyecto son:

1. Analizar teóricamente la viabilidad de un sensor basado en fibra de cristal fotónico haciendo uso de interrogación transversal.
2. Analizar experimentalmente la viabilidad de un sensor basado en fibra de cristal fotónico haciendo uso de interrogación transversal.

3. Analizar las aplicaciones biomédicas donde se optimicen las propiedades del sensor

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

En primer lugar, se encuentra el apartado de **Fundamentos Teóricos** donde se propone una base teórica suficiente para poder entender el objetivo del proyecto.

A continuación, incluimos un capítulo de **Estado del Arte** donde explicamos en qué cometidos se está investigando la fibra de cristal fotónico como sensor.

En **Estructura de la fibra** se explica el modelo de fibra fotónica que se ha utilizado en este proyecto.

En el siguiente capítulo: **Caracterización Teórica de la fibra de cristal fotónico** se explican los mecanismos utilizados basados en simulaciones para entender el comportamiento del sensor.

En el siguiente capítulo: **Caracterización Experimental de la fibra de cristal fotónico** se explican los procedimientos utilizados para observar el comportamiento real de nuestra fibra.

A continuación en el apartado **Pruebas de sensado** se explican las distintas aplicaciones en que se ha experimentado con la fibra de cristal fotónico.

Finalmente, se añade un capítulo con **Trabajo Futuro y Conclusiones del trabajo**. Así como un apartado de bibliografía con las referencias utilizadas.

1.5 CENTRO DE TECNOLOGÍA NANOFOTÓNICA DE VALENCIA



Este trabajo se ha desarrollado íntegramente en el Centro de Tecnología Nanofotónica de Valencia (NTC).

El Instituto Universitario de Tecnología Nanofotónica es un instituto universitario de investigación adscrito a la Universidad Politécnica de Valencia dedicado al desarrollo de la tecnología, nanociencia y su aplicación en la industria.

Su áreas de investigación son:

1. Sistemas y Redes Ópticas
2. Materiales y Dispositivos Fotónicos
3. Micro/Nanofabricación e Instalaciones
4. Tecnologías de Acoplo y Encapsulado
5. Fotovoltaica
6. Nanofotónica para Microondas

Concretamente el estudio pertenece dentro del área de Materiales y Dispositivos Fotónicos a la sección de Biofotónica. El coordinador de la línea: Jaime García Rupérez es el cotutor de este trabajo.

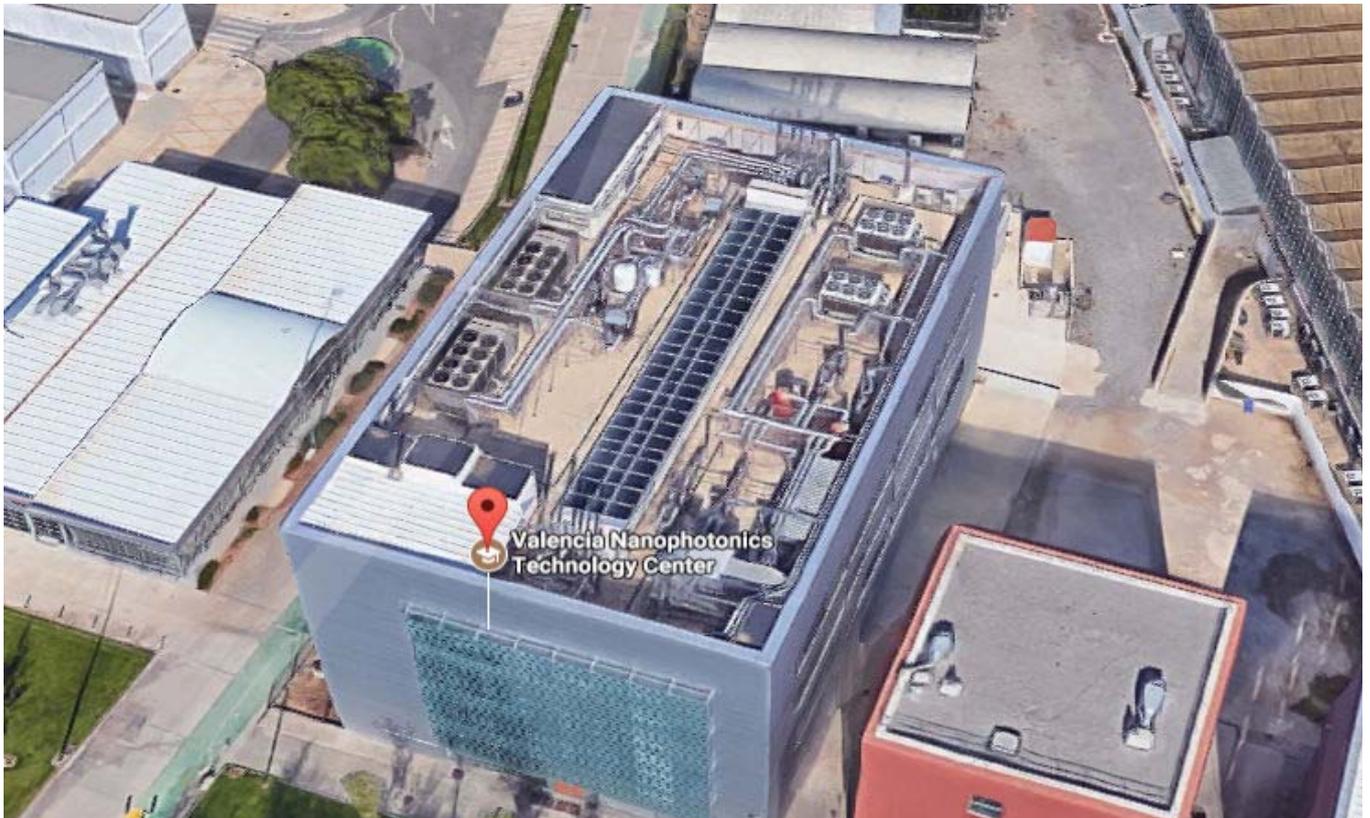
Dentro de las instalaciones se ha podido hacer uso del Laboratorio de Biofotónica y del Laboratorio de Caracterización Física.



fig. 3. Laboratorio de Biofotónica



fig. 4. Laboratorio de Caracterización Física



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este apartado se aporta la información necesaria para entender el funcionamiento del sensor propuesto.

Con este objetivo empezaremos por introducirnos en el ámbito de la fibra óptica explicando qué es, qué partes tiene y qué tipos hay.

Con esta base, seremos capaces de comprender el caso especial de fibra óptica con que vamos a trabajar: *la fibra de cristal fotónico*.

Adicionalmente, reforzaremos esa base con un completo estudio teórico de los cristales fotónicos.

2.1 INTRODUCCIÓN A LA FIBRA ÓPTICA

2.1.A DEFINICIÓN

Se conoce como *fibra óptica* a los hilos de vidrio o plástico capaces de transmitir pulsos de luz utilizados generalmente en redes de datos y telecomunicaciones, como sustitutos de los cables coaxiales, para transmitir información a largas distancias.

El método de transmisión se basa en **Ley de Snell** y concretamente en el principio de Reflexión Total Interna:

"Cuando la luz proveniente de un medio de índice de refracción n_1 incide sobre otro medio de menor índice de refracción n_2 , el rayo se desvía de la normal, de tal manera que el ángulo de salida es mayor que el ángulo incidente. A partir de un ángulo de incidencia crítico, el ángulo de salida superará los 90° produciéndose Reflexión Total Interna".

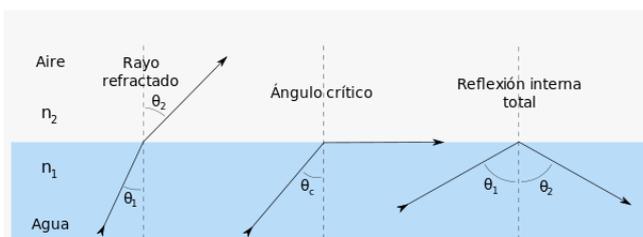


fig. 5. Ley de Snell. Explicación del principio de reflexión interna (TIR)

Así la propagación de la luz sucederá por multitud de reflexiones internas en el interior de la fibra.

Hay que tener en cuenta que el nombre de "*fibra óptica*" se utiliza para referirse a aquellas fibras que funcionan por este principio. Sin embargo, existen otros tipos de fibra óptica especiales cuya transmisión se rige por otros principios físicos. Un ejemplo será el que veremos en este trabajo: la **fibra de cristal fotónico**.

2.1.B Estructura

Todos los tipos de fibras ópticas están compuestas por cuatro partes diferentes: Núcleo, Revestimiento, Recubrimiento primario y Recubrimiento secundario.

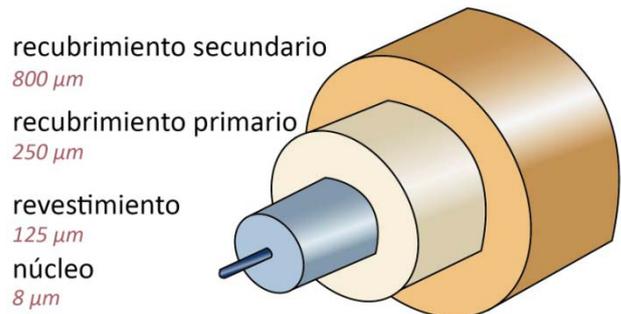


fig. 6. Esquema de la estructura. Elaboración propia

■ Núcleo

El núcleo o core es la parte más interna de la fibra y es por donde se propaga la mayor parte de la luz.

En la fibra óptica convencional está formado por un material con alto índice de refracción (mayor que el revestimiento) para cumplir con la reflexión interna total.

Concretamente, los materiales más utilizados para el núcleo son el óxido de silicio dopado con boro, germanio o fósforo y el plástico

■ Revestimiento

El revestimiento o cladding es la parte que rodea al núcleo. Su material y diseño determinarán la forma en que se propague la luz.

En la fibra óptica convencional es de un material homogéneo con índice de refracción menor al del núcleo.

Concretamente se suelen utilizar los materiales del núcleo, pero sin dopantes.

■ Recubrimiento primario

El recubrimiento o coating es una capa de muy poco espesor que rodea al revestimiento y tiene como funciones principales:

1. Proteger ópticamente la fibra de la luz exterior
2. Mejorar las propiedades mecánicas de la fibra

El material utilizado normalmente es acrilato de celulosa. 250 μm

■ Recubrimiento secundario

El recubrimiento secundario es la capa más externa y es la que proporciona las propiedades mecánicas para poder ser manipulada de forma más sencilla.

El material suele ser polietileno.

	Núcleo	Revestimiento	Recubrimiento primario	Recubrimiento secundario
I	8 a 10	125	250 - 500	900 - 2.000
II	50	125	250 - 500	900 - 2.000
III	62,5	125	250 - 500	900 - 2.000
IV	85	125	250 - 500	900 - 2.000
V	100	140	250 - 500	900 - 2.000

fig. 7. Diámetros comunes de la fibra óptica y de su protección

2.2 TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

2.2.A Según los modos propagados

Se conoce como modo propagado a cada una de las diferentes trayectorias de los rayos luminosos a lo largo de la fibra. Según el tipo de fibra la luz puede seguir una única trayectoria o viajar por diferentes caminos.

En este sentido, podemos encontrar fibras ópticas: *monomodo* o *multimodo*.

■ Fibra monomodo

Las fibras monomodo son aquellas en las que la luz sólo puede viajar por un camino. Para conseguirlo, cuentan con un núcleo de diámetro tan pequeño (9 μm) que sólo permite viajar un rayo de luz. Las grandes ventajas son las pocas pérdidas y el ancho de banda mayor. Por el contrario son más caros de fabricar. Su aplicación son en para cubrir grandes distancias.

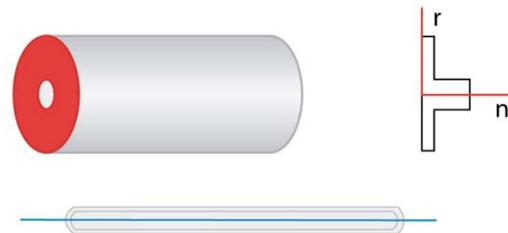


fig. 8. Fibra monomodo. Elaboración propia

■ Fibra multimodo

Las fibras multimodo son aquellas en las que los haces de luz pueden viajar por varios caminos. Según sea el revestimiento pueden ser:

▷ Fibra multimodo de gradiente de índice

En este caso, el núcleo también es grande (62,5 μm), pero el revestimiento varía de forma gradual el índice de refracción siendo mayor en las zonas cercanas al núcleo y menor en la periferia. Con esto se consiguen menores pérdidas en la refracción y un mayor ancho de banda permitido. Su aplicación son redes menores de 10 km

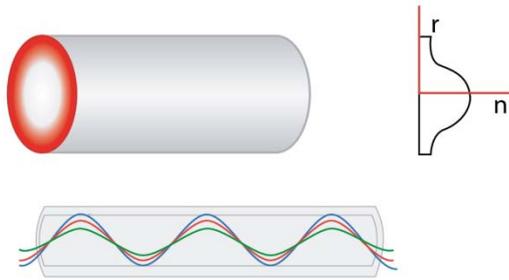


fig. 9. Fibra multimodo de gradiente de índice. Elaboración propia

▷ Fibra multimodo de salto de índice

Se caracterizan por un gran núcleo (62,5 μm) y una frontera muy marcada entre núcleo y revestimiento de forma que hay un cambio radical entre los índices de refracción. Consecuentemente, se producen grandes pérdidas en comparación con otro tipo de fibras y el ancho de banda permitido es estrecho. Son las más baratas de fabricar y se usan en distancias cortas como en redes locales.

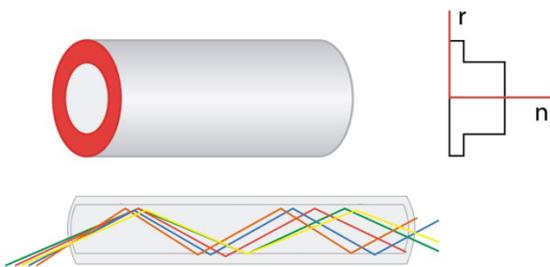


fig. 10. Fibra multimodo de salto de índice. Elaboración propia

2.2.B Según el principio físico

Como advertíamos según el tipo de principio físico por el que se produzca la propagación encontramos: fibras convencionales o fibras de cristal fotónico.

■ Fibras convencionales

Las fibras ópticas convencionales son aquellas que funcionan bajo el principio TIR (Total Internal Reflection), esto significa que cuentan con un núcleo cuyo índice de refracción es mayor que el del material del revestimiento, para conseguir confinar el haz mediante la reflexión total.

Fueron las primeras en descubrirse y su principal aplicación actualmente es sustituir a los cables coaxiales en las redes de comunicaciones.

■ Fibras de cristal fotónico

Las fibras de cristal fotónico, o también llamadas fibras microestructuradas, son fibras ópticas especiales caracterizadas por una geometría basada en un conjunto de agujeros de aire periódicamente distribuidos en la sección transversal. Este tipo de distribución es característico de los cristales fotónicos y determina completamente el tipo de propagación.

El núcleo de estas fibras puede ser sólido o incluso ser aire. Según como sea clasificaremos las PCFs en dos grandes grupos, respectivamente: *Solid-core fibers* y *Hollow core fibers*.

▷ Solid-core fibers

Las fibras solid-core se obtienen rellenando el agujero central con el material sólido del resto de la fibra (normalmente silicio) consiguiendo así generar un defecto en la estructura que será clave para confinar la luz.

En este caso el fenómeno físico es una reflexión total modificada, ya que no se produce por la presencia de una frontera evidente de dos materiales con IR distintos como en las fibras convencionales, sino por la presencia de una distribución periódica de agujeros alrededor del núcleo, y por tanto, en cómputo general por un índice de refracción menor.

▷ Hollow-core fibers

Por otro lado, las **Hollow-core fibers** rompen radicalmente con la Ley de Snell y la base de que el núcleo tiene que ser de mayor IR para que la luz quede confinada en su interior. En este caso, el núcleo es un agujero (de mayor diámetro que el resto) y por tanto es otro fenómeno físico, conocido como *Band-Gap fotónico*, el que garantiza la propagación de la luz por la fibra.

2.3 TEORÍA DE LOS CRISTALES FOTÓNICOS

2.3.A INTRODUCCIÓN

Los cristales fotónicos son materiales que presentan un índice de refracción periódico en una, dos o tres dimensiones.

Esta estructura permite controlar el movimiento de los fotones de forma parecida a como sucede en los semiconductores para los electrones.

El funcionamiento se basa en que cuando una onda electromagnética incide de una forma determinada sobre este tipo de materiales, interfieren las ondas reflejadas producidas cada vez que hay un cambio en el índice de refracción.

Controlando esas interferencias y forzando a que sean destructivas pueden conseguirse aplicaciones tan diversas como evitar la propagación de luz de una determinada longitud de onda o el confinamiento de la luz en el centro del cristal.

Ya en 1887 Lord Rayleigh realizó experimentos con lo que se puede denominar como cristales fotónicos unidimensionales compuestos por capas apiladas de materiales con distinto índice de refracción y encontró que la reflexión era casi total al incidir en la dirección de periodicidad del cristal.

Sin embargo, no fue hasta 1987 cuando realmente se produjo un salto cualitativo con los trabajos de E. Yablonovitch y S. John. Estos trabajos dedicados a la localización de la luz y la inhibición de emisión espontánea se consideran como el punto de partida de la investigación en cristales fotónicos.

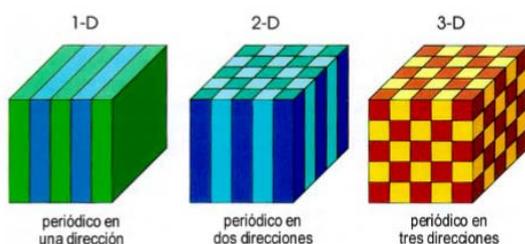


fig. 11. Ejemplos de cristales fotónicos 1-D, 2-D y 3-D. Los diferentes colores representan materiales con distinta constante dieléctrica. La característica que define un cristal fotónico es la periodicidad del material dieléctrico a lo largo de uno o más ejes.

Conocido el funcionamiento de los cristales fotónicos, podemos extrapolarlo a las fibras de cristal fotónico. Como hemos dicho, estas fibras se caracterizan por una microestructura formada por una red de agujeros que perforan la fibra a lo largo de toda su longitud.

Por tanto, su sección transversal, puede entenderse como una variación periódica del índice periódico en dos dimensiones.

Así, para estudiar el comportamiento de las fibras de cristal fotónico se aplicarán los mismos principios teóricos de los cristales fotónicos. Seguimos el ejemplo de John D. Joannopoulos en "*Photonic Crystals: Molding the Flow of Light*"

2.3.B ESTUDIO ANALÍTICO

■ Ecuaciones de Maxwell

El punto de partida del problema que pretendemos resolver, que es conocer el comportamiento de la luz en un medio determinado, pasa por estudiar las ecuaciones de Maxwell y analizar las restricciones que este tipo de medios imponen sobre las mismas.

Dichas ecuaciones son las siguientes:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

En donde:

cod.	variables
E	campo eléctrico
H	campo magnético
D	desplazamiento eléctrico
B	inducción magnética
ρ	cargas libres
J	densidad de corriente

Trabajamos en un medio compuesto por varios dieléctricos donde la luz se va a propagar, pero donde no existen fuentes de luz, así que tenemos:

$$\rho = \mathbf{J} = 0$$

No existen cargas ni corrientes libres.

A continuación, por las características del medio empleado hacemos las siguientes suposiciones:

1. campos suficientemente pequeños para encontrarnos en régimen lineal
2. material macroscópico e isótropo
3. la constante dieléctrica del medio no depende de la frecuencia. Es un medio no dispersivo.
4. los materiales dieléctricos tienen bajas pérdidas

Seguindo estas suposiciones, llegamos a que

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{H}$$

Esto significa que el campo eléctrico y el desplazamiento eléctrico están relacionados por la constante dieléctrica $\varepsilon(\mathbf{r})$. Y, considerando que la permeabilidad magnética tiene un valor muy próximo a la unidad, el campo magnético es igual a la inducción magnética.

Reescribimos por tanto las ecuaciones de Maxwell como:

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0$$

$$\nabla \cdot \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) - \frac{\varepsilon(\mathbf{r})}{c} \frac{\partial \mathbf{E}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = 0$$

El siguiente paso es descomponer los campos eléctrico E y magnético H en el tiempo en una serie de armónicos. Esto es posible por la linealidad de las ecuaciones de Maxwell.

Así, aprovechamos el desarrollo en serie de Fourier y los expresamos como un campo complejo (por conveniencia matemática). Esta expresión consiste en un patrón de campo multiplicado por una exponencial compleja.

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r})e^{j\omega t}$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})e^{j\omega t}$$

Con esta forma de expresar los campos y sabiendo que no existen cargas ni corrientes libres:

$$\nabla \cdot \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \nabla \cdot \mathbf{D}(\mathbf{r}) = 0$$

Por tanto, físicamente, en el medio no tendremos fuentes ni sumideros de desplazamiento eléctrico ni de campo magnético.

Además aporta una restricción de trabajar con ondas transversales. No será un problema puesto que es la naturaleza de las ondas electromagnéticas.

Centramos en las ecuaciones del rotacional y escribiéndolas con la que con la expresión de ondas propuesta quedarían:

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{j\omega}{c} \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) - \frac{j\omega}{c} \varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0$$

Por último pretendemos obtener una única ecuación para el campo magnético H. Lo conseguimos operando con las dos ecuaciones anteriores. En primer lugar se divide la última ecuación entre la constante dieléctrica $\varepsilon(\mathbf{r})$ y se toma el rotacional. En segundo lugar se igualan ambas ecuaciones para eliminar $\mathbf{E}(\mathbf{r})$

Llegamos a una única ecuación:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right] = \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

Que únicamente depende de $\mathbf{H}(\mathbf{r})$. Esta ecuación se conoce como **ecuación maestra** de los cristales fotónicos.

Una vez calculados los modos $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ para una determinada frecuencia, se podrá calcular el campo eléctrico como:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \left(\frac{-jc}{\omega\varepsilon(\mathbf{r})} \right) \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

■ Problema de valor propio

Analizando la **ecuación maestra** vemos que es un problema de valor propio.

Se realizarán una serie de operaciones sobre la función $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ y si es un modo electromagnético válido el resultado será un número de veces la función original. Esa función se conoce como *vector propio* y la constante multiplicativa es el *valor propio*.

Así, reescribimos la ecuación maestra para identificar la estructura de un problema de valor propio:

$$\Phi \mathbf{H}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{H}(\mathbf{r})$$

Donde el operador "OtachadaH(R)" es:

$$\Phi \mathbf{H}(\mathbf{r}) \equiv \nabla \times \left(\frac{1}{\epsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) \right)$$

Así pues vectores propios son los patrones de campo magnético $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ y sus valores propios asociados $\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$ son proporcionales al cuadrado de la frecuencia de dichos modos.

■ Simetrías

Hasta ahora hemos resuelto la expresión de los campos en medios materiales, pero aún no hemos incluido la gran peculiaridad de los cristales fotónicos: la periodicidad del índice de refracción en su estructura.

Con estas restricciones, la resolución del problema se simplifica enormemente al contar con un sistema con ciertas simetrías y por tanto invariante a algunas operaciones de traslación y rotación.

En nuestro tipo de fibra la función dieléctrica es continua en la dirección longitudinal y es periódica en la sección transversal.

Por tanto, un modo en $H(r)$ será igual que en $r+R$, siendo R cualquier combinación de los vectores que definen la red (vectores de red).

Para que esto se cumpla, podemos aplicar el **Teorema de Bloch** y expresar los modos como el producto de una onda plana modulada por una función periódica con igual periodicidad que la del cristal fotónico:

$$H_{n,k}(r) = e^{jkr} \cdot u_{n,k}(r)$$

Donde k indica el vector de onda y n la banda energética. Así tenemos caracterizadas las soluciones al problema de valores propios conocidas como los modos del sistema.

Por tanto un modo quedará totalmente representado

Una propiedad importante del Teorema de Bloch es que no vamos a necesitar considerar todos los vectores de onda, si no sólo los que conformen la **zona de Brillouin**.

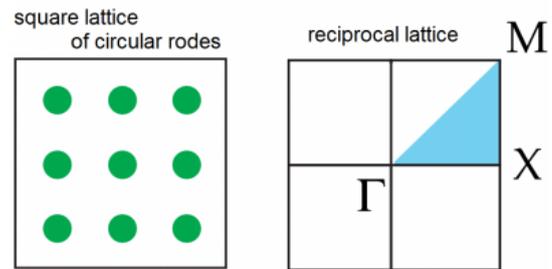


fig. 12. Red real y Zona de Brillouin de la red recíproca

Además, en nuestro caso, si la luz incide transversalmente, no existirá componente longitudinal del vector de onda. Esto significa que aparece otro tipo de simetría: la simetría especular. La simetría especular nos permitirá clasificar los modos separándolos en dos polarizaciones:

Modos TE (transversal eléctrico)

Tienen el campo magnético normal al plano transversal de la fibra y el campo eléctrico en el plano.

$$\mathbf{H} = H(\rho)\hat{z}$$

$$\mathbf{E}(\rho) \cdot \hat{z} = 0$$

Modos TM (transversal magnético)

Tienen el campo eléctrico normal al plano transversal de la fibra y el campo magnético en el plano

$$\mathbf{H}(\rho) \cdot \hat{z} = 0$$

$$\mathbf{E} = E(\rho) \cdot \hat{z}$$

■ Diagrama de bandas

Representando las frecuencias permitidas para cada vector de onda k obtendremos el diagrama de bandas del cristal fotónico.

Este diagrama nos servirá para caracterizar las propiedades ópticas de nuestro sistema

La segunda imagen (central) corresponde a un conjunto de columnas en medio del aire. Análogamente al caso anterior, esta distribución se conocerá como cristal fotónico bidimensional, al repetirse la variación del índice de refracción en dos direcciones, mientras que en la tercera es homogéneo.

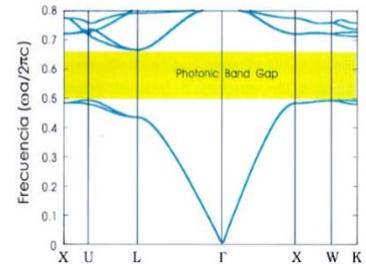
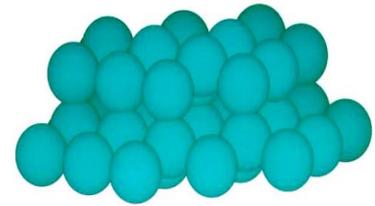
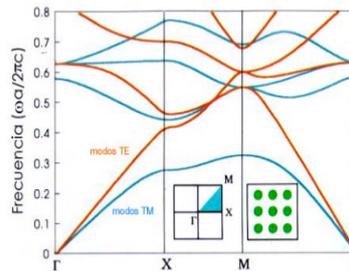
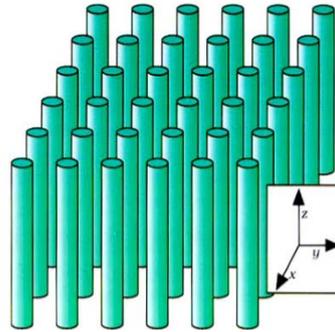
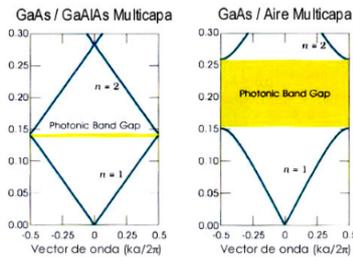
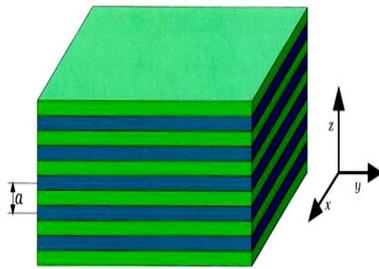


fig. 13. En esta figura vemos los diagramas para los cristales fotónicos unidimensionales (izquierda), bidimensionales (medio) y tridimensionales (derecha)

En el ejemplo anterior, podemos observar tres tipos de cristales fotónicos:

La primera imagen (izquierda) corresponde a un conjunto de capas apiladas de dos materiales con distintos índices de refracción. Esta distribución corresponde en definitiva a la variación del índice de refracción en una dirección, mientras en las otras dos es constante. Se denomina cristal fotónico unidimensional.

Se muestran dos diagramas asociados al cristal fotónico unidimensional. En el caso de la derecha, el cristal fotónico está formado por capas con un contraste de índices de refracción muy elevado por lo que vemos que el rango de frecuencias prohibidas es mucho más grande que en el primer caso, donde los materiales poseen un índice de refracción similar.

Este cambio en los índices de refracción lo podemos observar en el diagrama de bandas, donde, como se ha comentado, por simetría especular, podemos simplificar el espectro en los modos TE y TM. Así, vemos que para los modos TM hay un rango de frecuencias prohibida mientras que para los modos TE no.

Será interesante para poder conseguir un sensor muy simple, que para ambos modos encontremos una región de frecuencias prohibidas, lo que se conocería como band-gap completo.

En el último caso, observamos un cristal fotónico tridimensional, donde el índice de refracción es periódico para las tres direcciones de la red.

En el diagrama se observa que existe un band-gap completo para todas las direcciones del vector de onda.

3. ESTADO DEL ARTE

El objetivo que perseguimos en este proyecto no es un estudio aislado, sino que numerosos grupos de investigación se están centrando en el uso de la fibra de cristal fotónico como sensor sensible, confiable y económico.

En este apartado veremos las principales aplicaciones de sensado donde este tipo de fibras ya se están utilizando y otras que están empezando a cobrar bastante importancia.

Desde que en 1996 **P. Russel** presentase el primer prototipo de Fibra de óptica fotónica [1] la investigación de la época empezó a interesarse por este tipo de fibras por las posibilidades que ofrecía.

Así, los primeros estudios se centraron en caracterizar el comportamiento físico de las PCFs y más concretamente en determinar la influencia que tenían los parámetros del diseño sobre la propagación de la luz[2][3]. Además se estudiaron los distintos tipos de fibras fotónicas que se podían conseguir[4]

A la vez que se descubrían las propiedades se empezaban a encontrar aplicaciones empezando por el campo exclusivo de las comunicaciones[5][6]. Hasta llegar a prototipos de sensores y por tanto abriendo las puertas a todo tipo de ámbitos.

■ Sensores de parámetros físicos

El campo pionero en utilizar las PCFs como sensores ha sido el control de estructuras donde los estudios se han basado en aprovechar principios de interferometría de la fibra de cristal fotónico para la monitorización de parámetros físicos como [7]

- a) la presión
- b) la temperatura
- c) la deformación
- d) el desplazamiento
- e) multiparamétricos

SENSORES FÍSICOS REFERENCIAS

Sensor de presión	[8] -[17]
Sensor de temperatura	[18] -[36]
Sensor de deformación	[37]-[42]
Sensor de desplazamiento	[43]-[45]
Sensor de multiparamétricos	[46]-[68]

fig. 14. Sensores de parámetros físicos [7]

Siguiendo metodologías similares, investigaciones en aeronáutica[69], mecánica[70] y robótica[71] se centraban en monitorizar esos mismos parámetros pero satisfaciendo necesidades más específicas en sus respectivos campos.

Con todo esto, su reducido tamaño y peso, su buena respuesta en ambientes de riesgo y la inexistencia de artefactos por interferencias electromagnéticas han sido los factores claves que han permitido su rápida implantación.

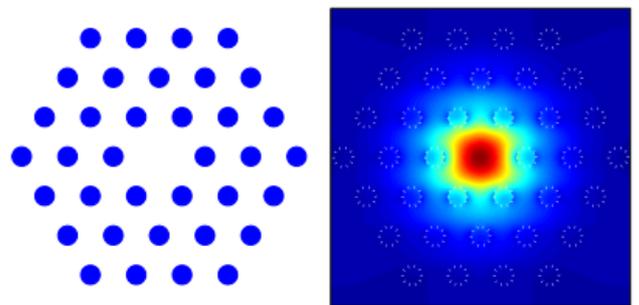


fig. 15. Estructura de una fibra hollow core y el campo evanescente asociado. Este campo puede interactuar con un líquido o un gas para aplicaciones de sensado. [62]

Sin embargo, era cuestión de tiempo que la investigación biomédica se hiciera eco de las posibilidades de estas fibras, principalmente por:

1. La personalización en el diseño

La posibilidad de crear sensores a medida según se varíen las dimensiones y la geometría de las fibras las convierten en instrumentos muy específicos para cada la aplicación de interés

2. La presencia de agujeros

La geometría transversal de estas fibras hace posible el sentido de fluidos que transcurran por su interior. Asimismo, se podría funcionalizar las paredes de esos agujeros para conseguir biosensores muy específicos.

3. La necesidad de pequeños volúmenes de muestras

Las dos ventajas anteriores junto con los pequeños volúmenes de muestras y de reactivos que se necesitan para su funcionamiento dan como resultado un sensor muy eficiente para ser usado en biomedicina.

Concretamente en PCFs se necesitan del orden de cientos de nanolitros a decenas de microlitros, mientras que en fibras ópticas convencionales se necesitan volúmenes de mililitros.

La necesidad de pequeños volúmenes los hacen ideales en aplicaciones biomédicas como detección de analitos, reconocimiento de proteínas o ADN.

El sentido biológico basado en las PCFs se ha centrado en gas, líquidos y biomoléculas (DNA, proteínas) [7]. Además de los comentados se han utilizado también para sentir actividades enzimáticas[72], moléculas de agua[73] y PH[74].

■ Sensor de gas

Una de las aplicaciones más desarrolladas de este tipo de fibras ha sido la detección de gases, actividad crucial en industrias, salud pública y medioambiente.

Los estudios están dirigidos a caracterizar la sensibilidad, el tiempo de respuesta[75] y en modelizar el llenado del gas en la fibra[76].

Se han usado tanto solid-core como hollow-core como otros tipos de fibras especiales.[7]

Los principales gases han sido: Acetileno [77], [78]. metano, [79] [80] e incluso sensores para múltiples gases [81] [82].

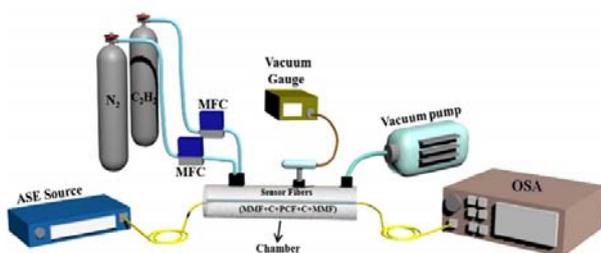


fig. 16. Esquema para el sentido de gases propuesto en [82]

■ Sensores de moléculas

El antecedente más directo se encuentra en las propias fibras ópticas convencionales utilizadas para medir la presencia o ausencia de determinadas moléculas.

Para ello, normalmente la estrategia seguida es funcionalizar la capa externa de la fibra con una capa de material selectivo a las moléculas de interés y medir su influencia en la propagación de la luz.[83][84]

La idea es la misma en las PCF, pero su estructura suponen un paso más allá pudiendo fluir pequeños volúmenes de muestra por sus agujeros. [85]

■ Sensores de DNA

En cuanto al sentido de biomoléculas, uno de los grandes intereses actuales consiste en el sentido de ADN evitando técnicas costosas como la PCR.

En este sentido hay estudios que aprovechan los conductos de la PCF para hacer pasar una solución acuosa de la muestra y detectar Cy5-labeled DNA moléculas utilizando campo evanescente.[86]

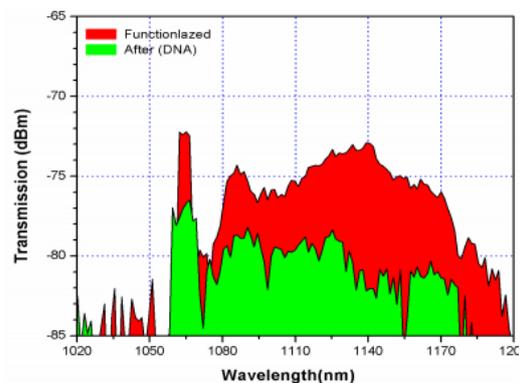


fig. 17. Resultados para sentido de DNA en [86]

■ Funcionalización

Como vemos, la mayoría de sensores basados en PCFs requieren de un paso previo de preparación de la fibra con un tipo de capa para detectar el analito.

Así la investigación también se ha centrado en estudiar los mejores mecanismos para formar capas funcionalizadas específicas del analito a detectar.[87][88]

4. ESTRUCTURA DE LA FIBRA

En este apartado se recoge el modelo de fibra que se ha utilizado para el desarrollo del proyecto.

4.1 DESCRIPCIÓN

La fibra que vamos a utilizar para el sensado ha sido fabricada por **NKT Photonics** correspondiendo con el modelo: NL-2.4-800

Es una fibra de cristal fotónico de tipo *solid core*, compuesta por una red hexagonal de agujeros de aire.

4.2 PROPIEDADES

En cuanto a sus propiedades, es una fibra de cristal fotónico monomodo con un alto coeficiente no lineal, y con muy baja dispersión en torno a 800 nm, ideal para trabajar con láseres de rango de 670-880nm.

Los principales campos de aplicación son espectroscopía, microscopía, metrología y tomografía de coherencia óptica.

4.3 ESTRUCTURA

Para observar la estructura real de la fibra y comprobar las dimensiones aportadas por el fabricante, se tomaron imágenes utilizando el Microscopio Electrónico de Barrido (SEM).

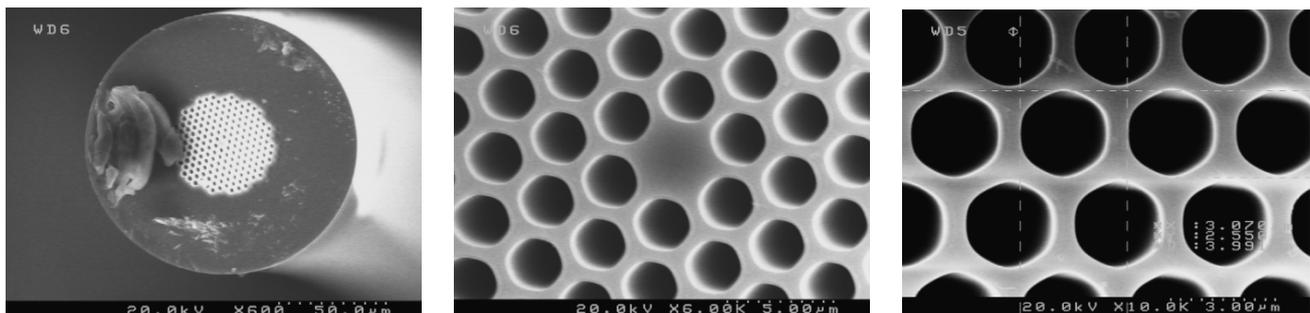


fig. 1. Vista en microscopio SEM de la estructura de nuestra fibra. Se observa el corte transversal a distintos niveles de detalle a) b) c).

Con esta información somos capaces de caracterizar la estructura de nuestra fibra.

■ Núcleo

Se trata de una fibra de tipo *Solid-core* de óxido de silicio, por tanto la región central también es de este material. Las dimensiones son:

- Diámetro del núcleo es de $2.4 \pm 0.1 \mu\text{m}$



fig. 18. Partes de la fibra

■ Revestimiento

El cladding en nuestra fibra consiste en una red periódica hexagonal de agujeros de aire en un bloque de óxido de silicio. Las dimensiones son las siguientes:

- Período de la red: $2.9 \pm 0.1 \mu\text{m}$
- Diámetro de los agujeros: $2.4 \pm 0.1 \mu\text{m}$
- Diámetro del Revestimiento: $125 \mu\text{m} \pm 10 \mu\text{m}$

■ Recubrimiento

El coating es una monocapa de acrilato de dimensiones:

- Diámetro del Recubrimientos: $230 \pm 5 \mu\text{m}$

5. CARACTERIZACIÓN TEÓRICA DE LA FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO

El primer paso es analizar teóricamente cómo se comporta la fibra óptica que tenemos, concretamente buscamos caracterizar los modos TE y TM permitidos para cada dirección en la que incida la luz sobre la fibra, y determinar si sucede *BandGap* en algún rango de longitudes de onda.

Este paso lo haremos mediante simulaciones con las dimensiones de la fibra (explicadas en el apartado anterior)

5.1.A SOFTWARE

El software utilizado para realizar las simulaciones ha sido el **MIT Photonic-Bands (MPB)** que permite realizar el cálculo de las estructuras de bandas de una determinada estructura dieléctrica tridimensional periódica.

El método utilizado por este programa se basa en la resolución de las ecuaciones de Maxwell en un medio dieléctrico, mediante la descomposición de los campos electromagnéticos como la suma de un conjunto de modos con una determinada frecuencia (base de ondas planas). Al hacer esto, el problema pasa a ser un problema de valor propio lineal que se podrá resolver con cualquier algoritmo conocido. Este tipo de método de resolución del que hace uso MPB recibe el nombre de *método en el dominio frecuencial*.

Para la representación de las medidas se ha hecho uso de unas funciones creadas en MATLAB.

5.1.B PROTOCOLO DE SIMULACIONES

Para simular el diagrama de bandas de la fibra en cuestión hemos seguido los pasos propuestos en el siguiente protocolo:

PROTOCOLO DE SIMULACIONES

1. Crear un script con la estructura de la fibra.
En este script se incluye la información de geometría, la información de los índices dieléctricos para cada subestructura y la información sobre qué modos y qué direcciones se quieren simular.
2. Crear un script de ejecución.
El script de ejecución se encarga de pasarle a MPB el archivo con la estructura de la fibra para ejecutarse. Además se encarga de preparar un archivo con el resultado que devuelve MPB .out y de extraer información a partir del resultado y guardara en otros archivos de interés para el usuario como los diagramas para te (.te) y tm (.tm)
3. Ejecutar el script de ejecución en el servidor
El software MPB se encuentra en el servidor del NTC por lo que teníamos que crear un proceso para ejecutar nuestras simulaciones
4. Representación gráfica
A partir de los archivos .te y .tm, y utilizando las funciones creadas en MATLAB, se han representado los diagramas de bandas.

5.1.C RESULTADOS

Simulamos la celda básica de la red hexagonal sin defecto, para los modos TE y TM. Se podrán dividir los modos en estas dos polarizaciones debido a la simetría existente en el plano vertical.

Debido a que el contraste de índices de refracción no es elevado, a priori no se espera un band-gap completo muy amplio para nuestra fibra.

Analizamos la estructura de bandas para localizar posibles band-gaps parciales.

En las figura 18 podemos ver las gráficas con los resultados obtenidos.

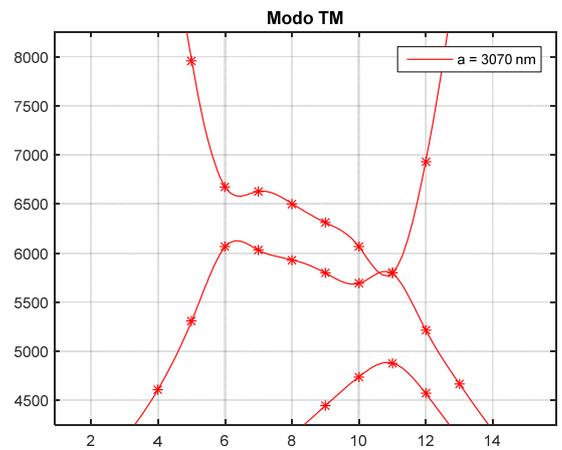
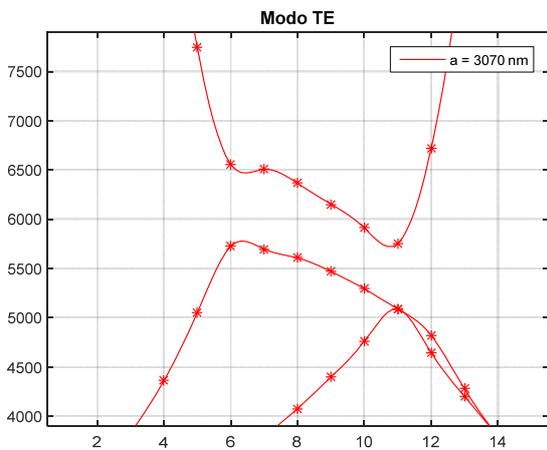
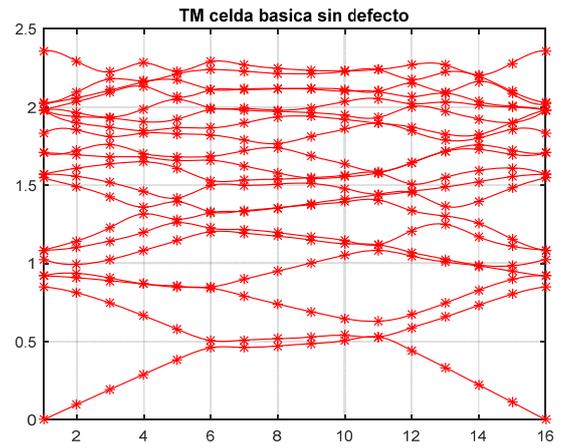
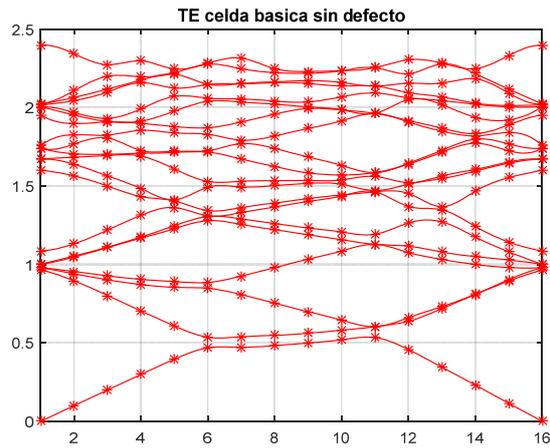


fig. 19. Resultados Simulaciones. Software MPB

Modo TE

Observamos que para el modo TE aparece un bandgap completo centrado en 6μm para nuestra fibra. Se corresponde con una frecuencia normalizada de 0.5. Es decir, para todos los ángulos en que incidamos transversalmente no se producirá transmisión.

Modo TM

Para el modo TM aparece un bandgap en longitudes de onda ligeramente más altas, centrado en 6,2 um y en este caso no es completo.

Sin embargo, este bandgap es parcial, por lo que dependiendo del ángulo de incidencia habrá o no transmisión.

6. CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO

Hemos visto que, desde el punto de vista teórico, la fibra óptica microestructurada se comporta como un cristal fotónico cuando es atravesada transversalmente por luz.

Ahora nos preguntamos si experimentalmente se podrán reproducir esos resultados. Este paso no es evidente, puesto que entran en juego factores externos que no se pueden tener en cuenta desde el punto de vista teórico.

Para reproducir experimentalmente nuestro caso, necesitamos contar con luz que incida transversalmente sobre la fibra y un equipo de detección para estudiar el comportamiento.

Para ello hemos se han utilizado dos técnicas

- a) Infrarrojo cercano
- b) FTIR

En este apartado se explican los dos procedimientos anteriores. En cada uno de ellos se explicará el montaje utilizado, el protocolo de medidas y los resultados obtenidos.

6.1 CARACTERIZACIÓN MEDIANTE INFRARROJO CERCANO

La primera forma de analizar cómo se comporta la fibra en la realidad ha sido medir su espectro en el infrarrojo cercano (NIR). Concretamente se ha medido en el rango de 1520-1630 nm.

Se ha hecho uso de un setup horizontal gracias al cual, se han podido tomar medidas de los modos TE y TM, en función del ángulo y posición de la PCF.

6.1.A MONTAJE

El montaje utilizado se basa en 3 etapas.

1. La primera etapa es la encargada iluminar la PCF con la polarización y focalización adecuadas
2. La segunda etapa es la encargada de situar correctamente la PCF en posición y orientación.
3. La tercera etapa es la encargada de recoger la luz que atraviesa la fibra y detectar la señal para luego ser analizada digitalmente.

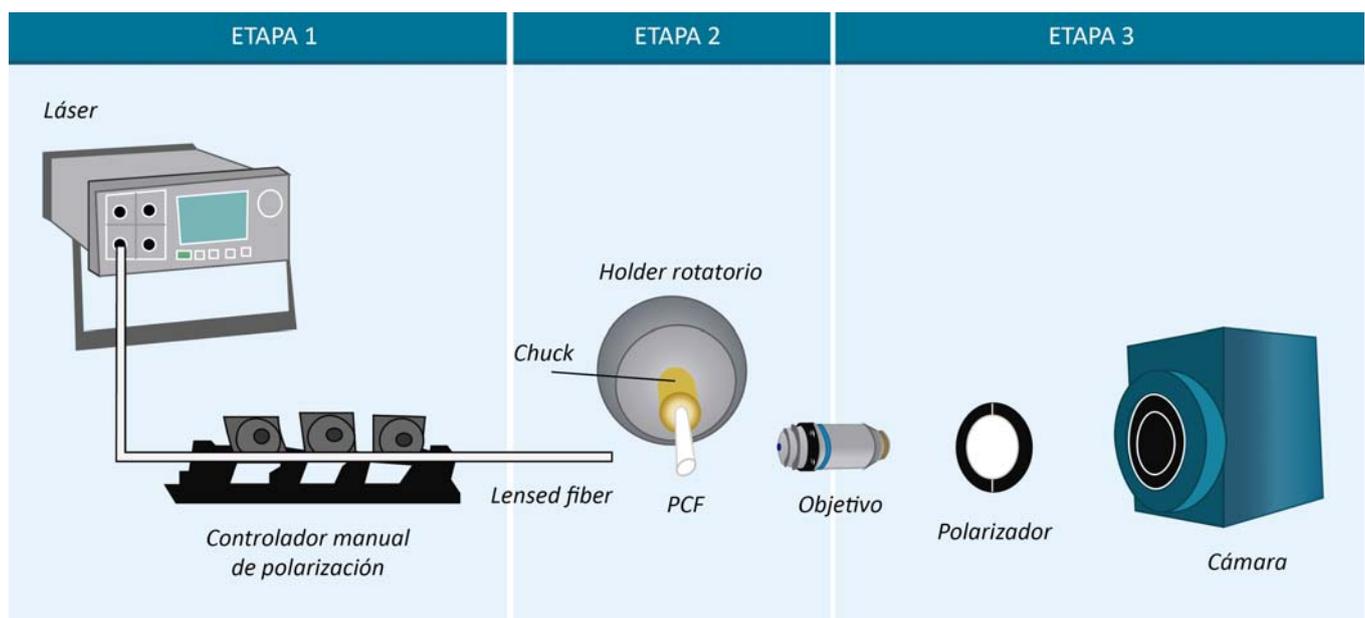


fig. 20. Esquema del montaje utilizado por etapas. Elaboración Propia

En esta imagen se puede observar el montaje real utilizado desde una vista superior.

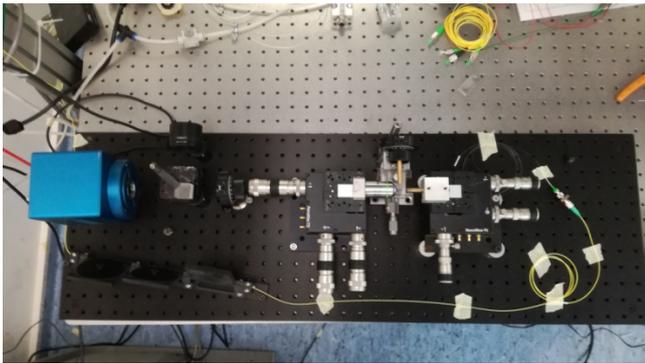


fig. 21. Disposición de elementos del montaje en la mesa antivibraciones

A continuación se explican en profundidad todos los componentes utilizados en las distintas etapas así como componentes auxiliares que participan en el montaje.

■ Primera etapa

En la primera etapa encontramos un láser como fuente de luz, una fibra especial que la guía hasta la PCF y un sistema de controladores manuales de polarización. Con esto conseguiremos que la luz llegue en las condiciones deseadas hasta la PCF.

Láser

El láser utilizado provee la luz en el rango de medida de interés: 1520-1630 nm. Se acopla a una fibra óptica especial que se encargará de guiarla.

Características

- Marca comercial: Keysight Technology
- Modelo: 819490A Compact Tunable Laser Source



fig. 22. Modelo de láser utilizado

Lensed Fiber

Este tipo de fibra especial recibe la luz del láser y la dirige hasta la PCF. Su extremo tiene una forma que actúa como lente convergente. Así conseguiremos que la luz incida de la forma más focalizada posible sobre la fibra fotónica.



fig. 23. Lensed Fiber

Controlador manual de polarización

Usamos un controlador manual de polarización de tres paletas para cambiar el estado de polarización de la señal por medio de la torsión de la fibra lensed

Características

- Marca comercial: Thorlabs
- Modelo: FPC030



fig. 24. Controlador manual de polarización

■ Segunda etapa

Esta etapa garantiza la posición correcta de la PCF. Para ello utilizaremos un *Chuck* y un *Holder rotatorio*.

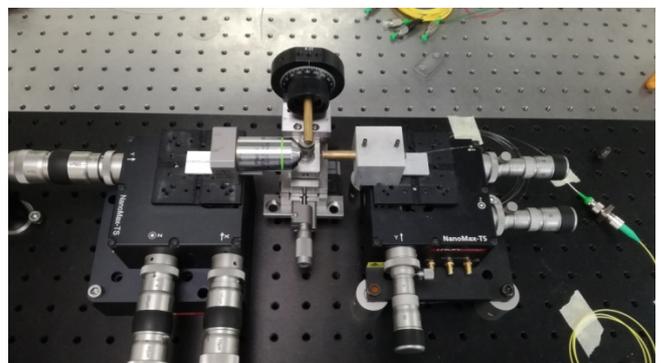


fig. 25. Segunda etapa

Fibra de cristal fotónico (PCF)

Como hemos explicado en el Apartado 4 contamos con una fibra de cristal fotónico solid core. La montaremos transversalmente a la fibra lensed y nos ayudaremos de distintos componentes para su sujeción.



fig. 26. Fibra utilizada en los experimentos del TFG

Chuck

El Chuck es un cilindro de oro con una ranura donde vamos a introducir la PCF tras haberle quitado el coating (buffer). El que vamos a usar es ideal para fibras cercanas a los 200 μm de diámetro.

Además cuenta con una pletina que ayuda que quede recta.



fig. 27. Chuck para insertar la fibra . Marca comercial Thorlabs. Modelo: HFC007

Holder rotatorio

El Holder es una montura donde se acopla el chuck.

Es rotatorio por lo que nos va a permitir tomar medidas en distintos ángulos y así podremos determinar la dirección idónea para el sensado.



fig. 28. Holder rotatorio junto al Chuck

■ Tercera etapa

La última etapa es la formada por el sistema de detección en su conjunto así como por un polarizador para discriminar entre el modo TE o TM.

Cámara

Contamos con una cámara para medir la intensidad de luz que atraviesa la fibra. Está conectada al láser y a un ordenador desde donde la podremos manejar



fig. 29. Cámara. Marca comercial: Xenics?

Objetivo

No podemos situar la cámara justo después de la fibra porque necesitamos añadir un filtro de polarización. Por tanto, el objetivo lo colocamos justo después de la PCF y lo ajustaremos para enfocar en la posición donde se sitúa la cámara.



fig. 30. Objetivo. Marca comercial: Xenics

Filtro de polarización

El polarizador dejará pasar sólo la luz que incida en un determinado ángulo. Está montado en un holder rotatorio y nos permitirá tomar medidas para las dos polarizaciones TE y TM.



fig. 31. Filtro polarizador

■ Componentes auxiliares

Además de los componentes anteriores se utilizan unos auxiliares para completar el montaje.

Plataformas

Para un montaje preciso, la fibra lensed y el objetivo se disponen en unas plataformas independientes que permiten controlar la posición X,Y,Z con una precisión de micrómetros.



fig. 32. Plataforma. Marca comercial: Thorlabs. Modelo:3-Axis MicroBlock™ Compact Flexure Stages

Mesa

Todas las plataformas y componentes antes mencionados se atornillan en una mesa especial amortiguadora de vibraciones que permite reducir artefactos externos de movimiento.



fig. 33. Mesa antivibraciones. Marca comercial: Newport™. Modelo RS2000 Precision Tuned Damped Research Optical

Software Tunable Laser

Además de los componentes físicos utilizamos el programa **Software Tunable Laser** para controlar vía software: el alineamiento, la realización de las medidas y el almacenamiento de las mismas.

Este software está desarrollado en **Labview** y establece conexión en tiempo real con la cámara y con el láser.

Además permite:

- a) ajustar parámetros de la cámara y el láser
- b) seleccionar regiones de interés
- c) modificar la resolución y
- d) guardar las medidas realizadas

6.1.B MEDIDAS

■ ¿Qué vamos a medir?

Nuestro interés pasa por medir el efecto que produce la fibra fotónica sobre el comportamiento de la luz. Concretamente analizaremos las dos polarizaciones TE y TM para distintos ángulos de la fibra con el objetivo de poder hacer un estudio completo del efecto y la evolución.

Además, en el rango de medida buscaremos ver experimentalmente si podemos detectar en el espectro algún comportamiento explicable con las simulaciones que hemos hecho previamente.

■ Protocolos de medida

Para realizar las medidas se siguen los siguientes pasos:

- 1) **Alineamiento**
- 2) **Realización de las medidas para TE y TM**
- 3) **Representación**

○ *Alineamiento*

El alineamiento para nuestro montaje consiste en posicionar correctamente la fibra lensed, la PCF y el objetivo. Para ello el protocolo consiste en 3 pasos:

1. **Alineamiento visual fibra lensed-objetivo**

Se alinean ambos componentes de forma que se enfoque la posición donde se encuentra la cámara. Este paso se hace de forma visual ayudándonos de tarjetas fotosensibles (Laser Viewing Cards).

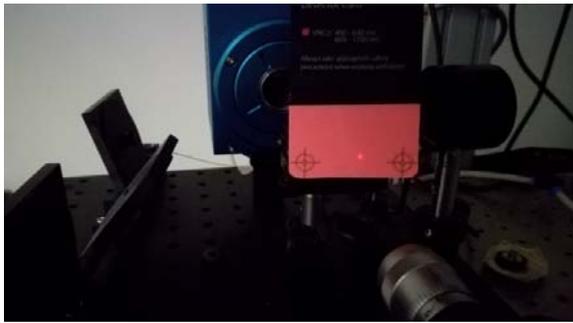


fig. 34. Alineamiento visual fibra lensed-objetivo

2. Alineamiento preciso fibra lensed-objetivo

Se mejora el alineamiento anterior utilizando el software **Setup Tunable Laser**. Para ello, se conectan cámara y láser al ordenador y vamos variando la posición del objetivo hasta que veamos en la pantalla un spot lo más enfocado posible.

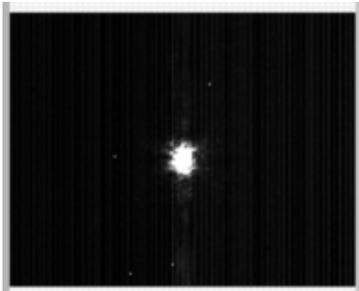


fig. 35. Alineamiento preciso mediante software. Observamos el spot enfocado. Captura tomada del Software Tunable Laser

3. Alineamiento de la PCF

Se posiciona la PCF entre la fibra y el objetivo. Para asegurar que está en la posición correcta, nos ayudamos de la imagen que devuelve el software hasta que obtenemos el patrón de difracción conocido de referencia [89]

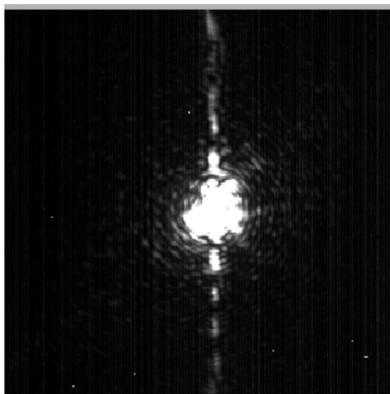


fig. 36. En esta imagen vemos el patrón de difracción que produce la luz al atravesar la fibra. Coherente con la bibliografía. Captura tomada del Software Tunable Laser.

En las siguientes imágenes podemos observar el aspecto real del alineamiento. Para conseguir un alineamiento perfecto son imprescindibles las plataformas con resolución micrométrica.

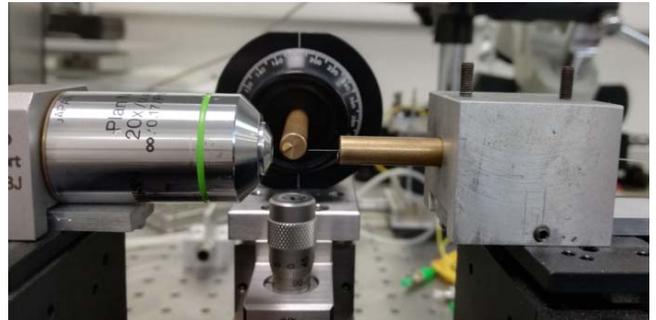


fig. 37. Vista lateral del montaje

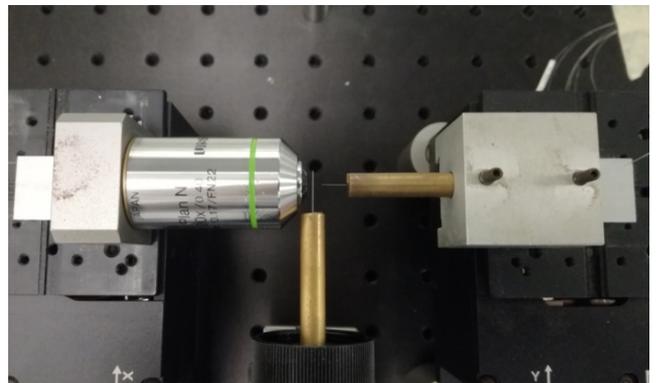


fig. 38. Vista superior del montaje

En este momento ya estamos en disposición de tomar las medidas.

o Realización de las medidas para TE y TM

Como hemos advertido anteriormente, el propio software **Setup Tunable Laser** nos va a permitir realizar las medidas y almacenarlas. Los pasos son los siguientes:

1. Elección del modo a medir TE o TM

Para medir en un modo determinado utilizaremos el polarizador. La estrategia consiste en minimizar el modo contrario utilizando los controladores manuales y finalmente, volver a cambiar el polarizador.

	Medir TE	Medir TM
1)	Polarizador en 90°	Polarizador en 0°
2)	Minimizar la señal	Minimizar la señal
3)	Polarizador en 0°	Polarizador en 90°

fig. 39. Protocolo de medida para TE y TM

2. Elección del ángulo de la PCF

Para cada modo anterior tomaremos medidas cada 5 grados de la fibra en un rango de 0 a 90 grados.

Así veremos variaciones en la dirección y trataremos de buscar relaciones con el modelo teórico. Nos ayudaremos del Holder rotatorio.

3. Elección de regiones de interés

En la tercera pantalla **Search Spots** se seleccionan las regiones de interés para la toma de medidas.

Para ello, en primer lugar se han de indicar los parámetros del barrido (lambda inicial, lambda final, lambda resolution, sweeping speed).

Al finalizar el barrido indicamos un área de interés rectangular donde se seleccionarán spots candidatos.

Finalmente seleccionamos manualmente las regiones de interés introduciendo las coordenadas de la misma.

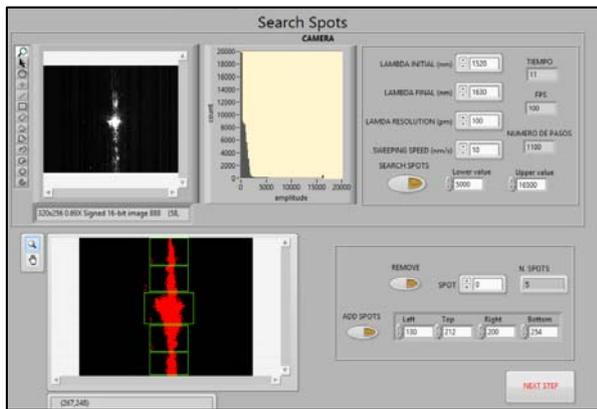


fig. 40. Elección de regiones de interés. Captura tomada del software

4. Realización de las medidas

En la última pantalla **Spectrum and Fit** realizaremos las medidas y almacenaremos los resultados para cada región de interés en una carpeta determinada.

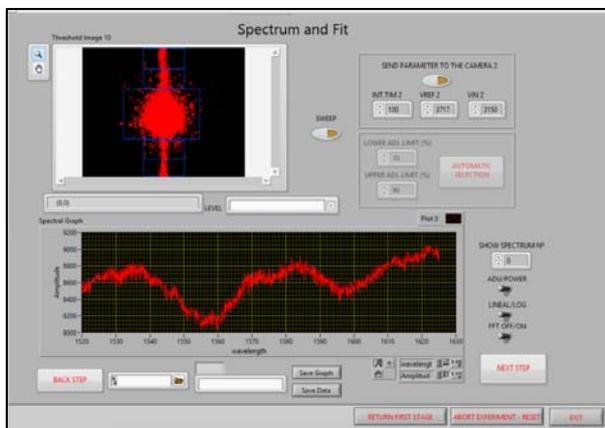
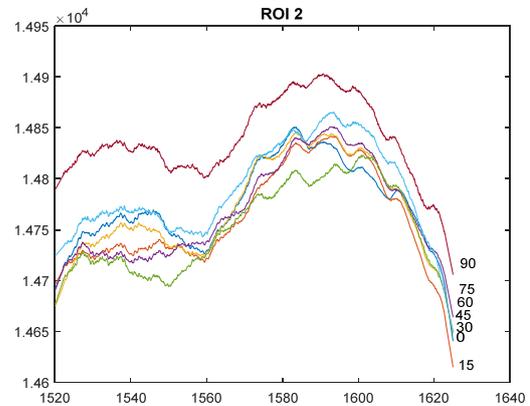


fig. 41. Ventana para la realización de las medidas. Captura tomada del software Setup Tunable Laser

6.1.C RESULTADOS

Para interpretar los resultados se han representado las medidas de la región central para cada ángulo. En la figura 41 se muestra un ejemplo.

Modo TE



Modo TM

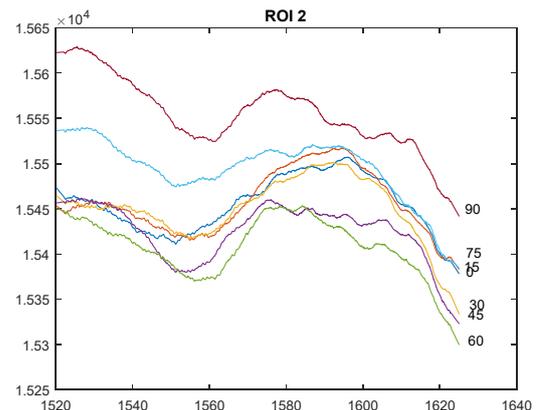


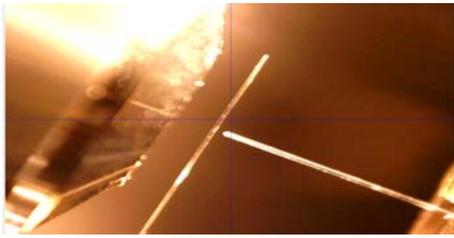
fig. 42. Modo TE y TM para la región central para todos los ángulos

En ambos modos se puede apreciar una caída en la intensidad detectada en el rango de 1540 a 1570 para todos los ángulos.

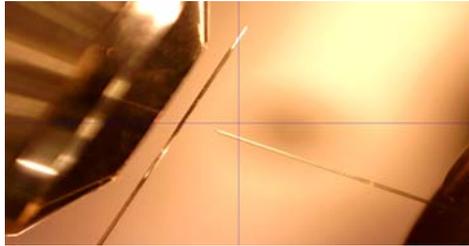
Sin embargo, hemos detectado que la reproducibilidad para este tipo de medidas es muy baja. En este sentido estudiaremos el principal factor que perturba la medida: la posición lensed fiber-PCF.

COMPARATIVA POSICIÓN PENSED FIBER-PCF

CERCA FIBRA



MEDIO



CERCA OBJETIVO

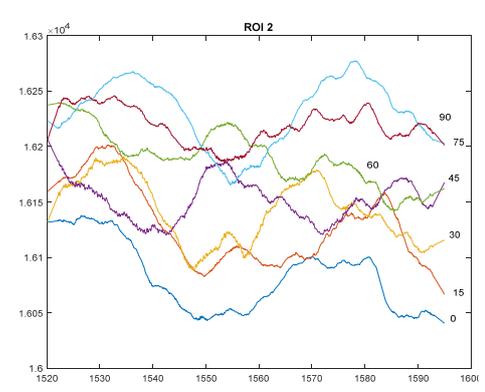
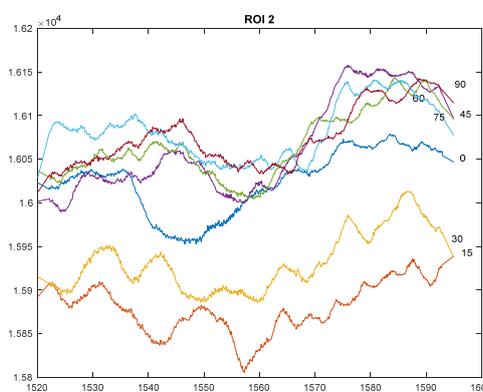
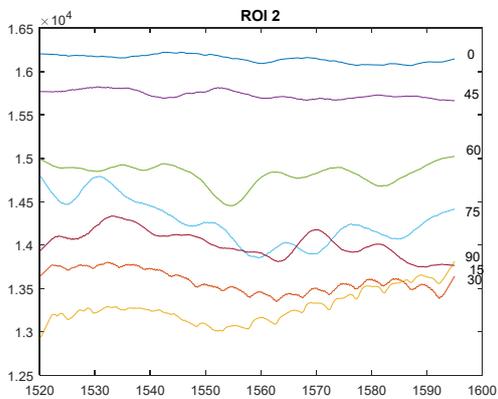
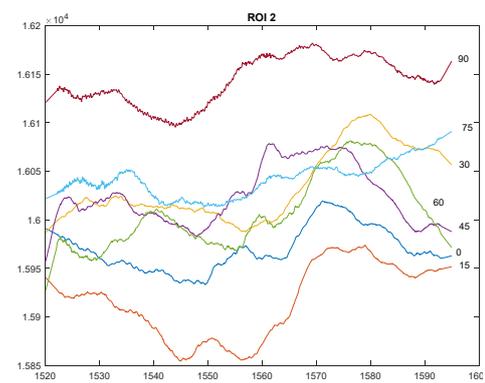
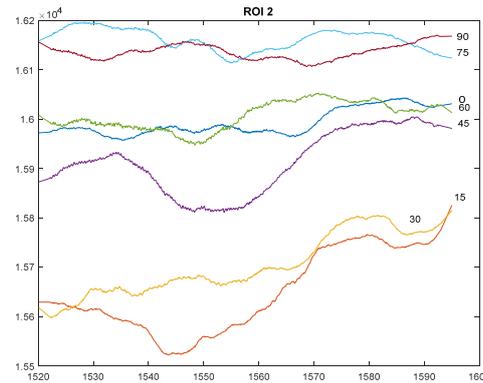
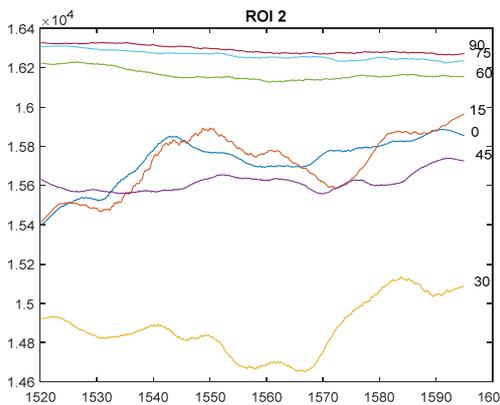
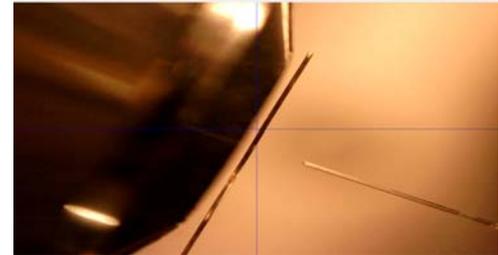


fig. 43. Se observa el cambio del espectro por posición. En a) imagen de cámara para ver la colocación de la red. En b) espectro de los modos b) TE b) y c) TM c) función del ángulo de la región central ROI2. Elaboración propia.

6.1.D DISCUSIÓN

La caracterización en el Infrarrojo cercano nos ha permitido darnos cuenta de la alta influencia que tiene el ángulo de incidencia de la luz sobre la fibra y la posición de la misma.

Sin embargo, en vista de las medidas anteriores no consideramos que sea un buen método de caracterización por la baja reproducibilidad.

En el siguiente apartado veremos un método más potente para conseguir una buena caracterización: La Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier.

6.2 CARACTERIZACIÓN CON FTIR

La segunda forma de caracterizar la fibra que se ha utilizado ha sido Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR). La principal ventaja que nos permite este método es la de medir en un **rango** muy amplio del espectro. En este sentido, empleando la fuente de luz, la óptica y el detector adecuados, es posible realizar la caracterización de una muestra con fotones con longitudes de onda que van desde el visible (400nm) hasta el infrarrojo medio (10 μm).

Además, el uso del FTIR también resulta interesante pensando en futuras pruebas de sensado. Es así debido a la alta resolución espectral que se consigue con este equipo.

6.2.A Montaje

El montaje utilizado para realizar este tipo de medidas es mucho más sencillo que en el caso anterior. Se basa en la acción combinada del equipo de FTIR y el software OPUS.

Equipo FTIR

El equipo de FTIR utilizado permite

1. Iluminar la fibra con un spot cuyo diámetro es inferior a los 100 μm
2. Posicionar la fibra de manera transversal
3. Detectar la luz transmitida o reflejada

Características

- Modelo utilizado: El equipo consiste en el Microscopio HYPERION 2000 que se acopla al espectrómetro FTIR VERTEX 70.
- Marca comercial Bruker

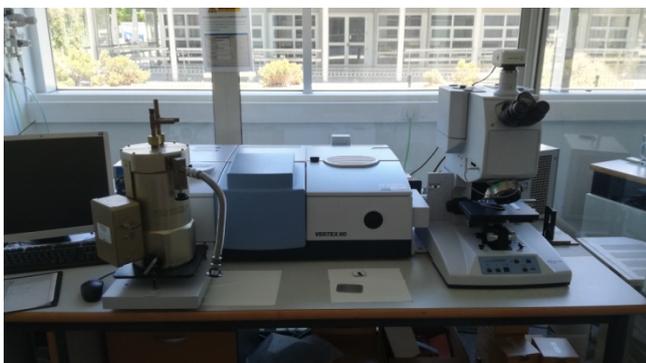


fig. 44. Equipo FTIR formado por el microscopio Hyperion y el espectrómetro VERTEX

Software OPUS

El software OPUS específico del equipo utilizado permite:

1. Realizar la toma de las medidas
2. Procesarlas
3. Almacenarlas

6.2.B Medidas

■ Qué vamos a medir

En este caso, se han tomado medidas en modo transmisión (transmisividad) y en modo reflexión (reflectividad). Se han realizado medidas tanto de la luz transmitida como reflejada en la fibra.

A diferencia del caso anterior, no tiene sentido tratar de ajustar la dirección de incidencia del haz a un ángulo específico. La razón es que, debido a la configuración de las lentes del objetivo, el haz llegará a la fibra con un ángulo sobre la normal de media de 20° y por tanto no se podrá asegurar que incida en una determinada dirección.

■ Protocolos de medida

1. Calibración

El primer paso consiste en tomar una medida de calibración para referenciar a ella todas las medidas siguientes que se realicen.

- En transmisión, se elige calibrar en aire, obteniendo una transmitancia del 100%.
- En reflexión, se ha calibrado con un patrón de oro debido a que su reflectividad es próxima al 100% en el rango del espectro analizado

2. Colocación de la fibra sobre el portaobjetos

Una plataforma de acero inoxidable con un orificio en la región central actúa de portaobjetos. Se debe colocar la fibra apoyándola en el portaobjetos quedando encima del orificio.

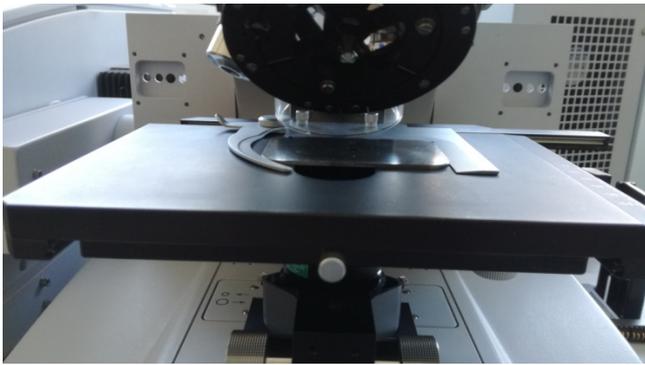


fig. 45. Portaobjetos

3. Enfoque del plano de interés

Para la toma de medidas debemos tener en cuenta el plano de la PCF sobre el que enfocar el haz incidente:

- Transmisión: Se enfoca el plano medio
- Reflexión: Se enfoca el plano superior. De acuerdo con el desplazamiento de la plataforma, los valores máximos de la reflectividad se obtenían iluminando en la parte inferior de la fibra. De este modo también se apreciaba más el filtrado de la señal asociado a los poros presentes dentro de la fibra.

En primer lugar se realiza un ajuste visual con el microscopio. En segundo lugar, se mejora este enfoque moviendo la altura de la plataforma hasta que se maximice la señal detectada por el equipo, . Este ajuste se realiza con la ayuda del software OPUS

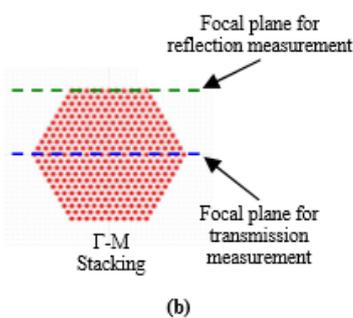


fig. 46. Plano focal. En medidas de reflexión enfocaremos el plano superior, mientras que en medidas de transmisión enfocaremos el plano medio.

4. Realización de las medidas

Finalmente se procede a la toma de medidas. Para ello se utiliza el software OPUS y se eligen los principalmente los siguientes parámetros:

- Rango de medida del espectro
- Resolución espacial
- Nº de promediados (scans)

Además existe la posibilidad de tomar series de medidas. En pruebas de sensado, se necesitará utilizar esta opción con una resolución temporal muy alta.

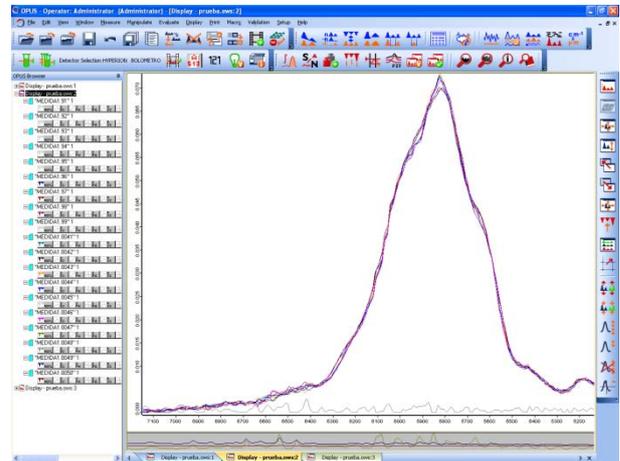


fig. 47. Interfaz de OPUS. Las medidas se van mostrando en el Display.

Procesamiento de las medidas

Por las condiciones de las medidas, los espectros tienen mucho ruido. Por tanto aplicamos procesamiento basado en el suavizado de las medidas.

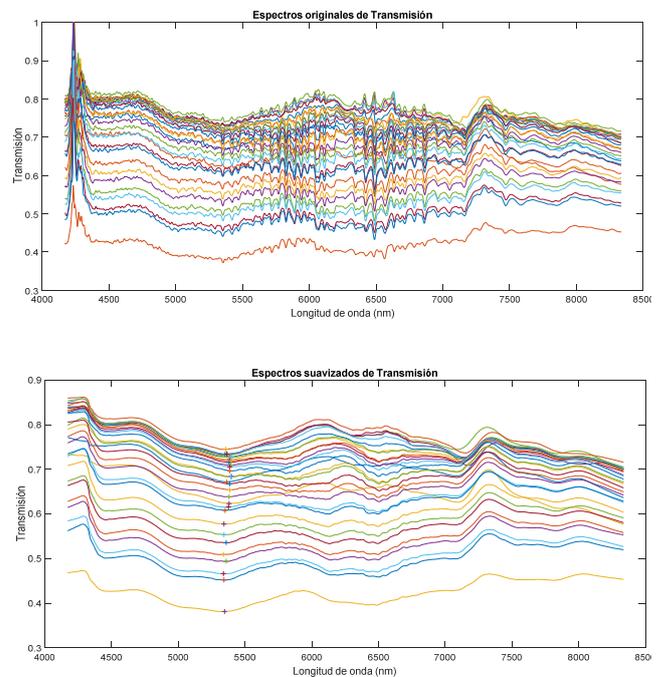


fig. 48. En la figura superior se muestran los espectros originales. En la imagen inferior los espectros tras ser suavizados.

6.2.C RESULTADOS

En la figura 48 se representa la comparativa entre el espectro de transmisión y el espectro de reflexión en las medidas de caracterización de la fibra.

Para su representación, en primer lugar se han promediado por grupos un conjunto de medidas tomadas tanto en transmisión como en reflexión. En segundo lugar se han suavizado para eliminar el ruido y facilitar la interpretación.

Transmisión

De acuerdo con la figura 48, la transmitancia media de la fibra se sitúa en torno al 70%.

Además, se evidencia una caída significativa de la transmitancia que alcanza su mínimo en torno a 6 micras. Esta caída es coherente con el bandgap esperado.

Reflexión

En el espectro de reflexión podemos ver que la reflectividad media es del 17%.

En el rango esperado de bandgap, se aprecia un ligero aumento de la reflectividad.

6.2.D DISCUSIÓN

En vista de los resultados anteriores confirmamos que la fibra se comporta como teóricamente se había estimado.

En el entorno de 6 micras, rango esperado de bandgap, se observa que la fibra no transmite la luz igual de bien que el resto de longitudes de onda. Las medidas de reflectividad respaldan dicho comportamiento.

Llama la atención la poca señal detectada para la reflectividad. Se puede explicar por la gran transmisión a través de la fibra y por la alta dispersión de la luz debida a la estructura de la fibra [89]. Dicha dispersión de la luz se potencia con la configuración utilizada, al tener que atravesar dos veces la fibra.

En cualquier caso, dicho espectro se ha reproducido en todas las medidas realizadas, por lo que es característico del efecto de la fibra.

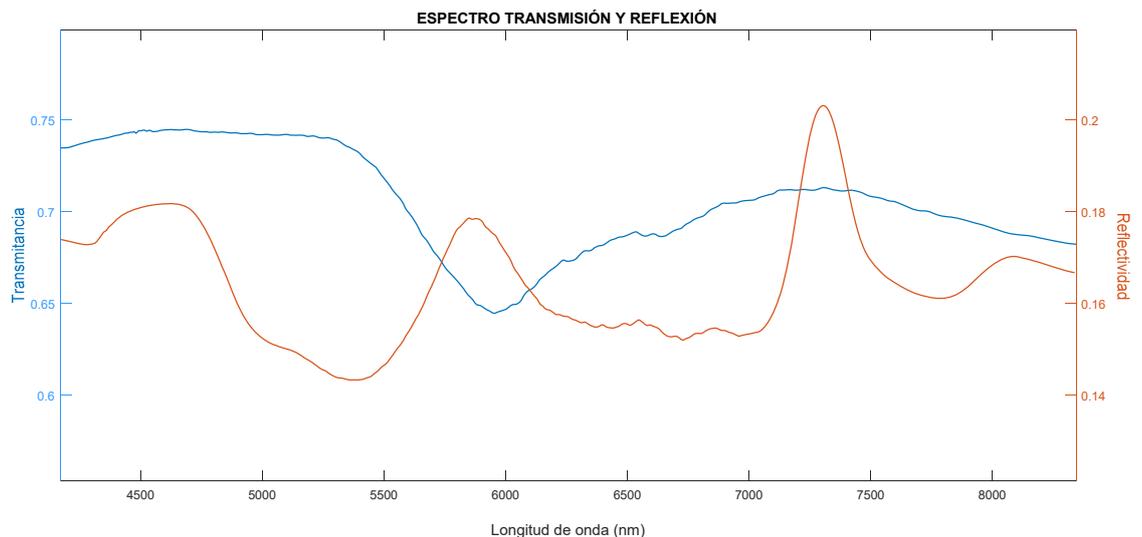


fig. 49. Comparativa en los espectros de transmisión y reflexión utilizando Espectrometría Infrarroja por Transformada de Fourier.

7. PRUEBAS DE SENSADO

Una vez hemos caracterizado teórica y experimentalmente el comportamiento de la fibra proponemos en este apartado distintas pruebas de sensado que se han realizado con los resultados de las mismas.

7.1 SENSADO DE LÍQUIDOS

El objetivo de la primera prueba de sensado es hacer pasar un líquido por el interior de la fibra.

La primera prueba que se ha probado ha realizado consiste en hacer sido el sensado de líquidos, concretamente con agua y etanol.

7.1.A MONTAJE

El montaje utilizado consta de los siguientes componentes:

Bomba de jeringa

Utilizada para empujar y succionar el líquido a una velocidad controlada.

Características:

- Marca comercial: TSE
- Modelo: 540060/540060-HP Single Syringe

Aguja

La aguja de 0,3um de diámetro externo se acopla a la jeringa y se introduce en el tubo para hacer pasar el líquido en su interior.

Tubo

Se ha utilizado un tubo de plástico como conductor del líquido hasta la fibra. Se encuentra sellado con silicona en ambas regiones para evitar fugas.

Fibra de cristal fotónico

La fibra de cristal fotónico se encuentra en el extremo del montaje. Se dejan 2 cm de la fibra dentro del tubo para facilitar el sellado.



fig. 50. Bomba de jeringa utilizada. Se aprecia también la aguja acoplada y parte del tubo de plástico. Elaboración propia.

7.1.B EXPERIMENTO

Se han probado como líquidos agua y etanol cuyas características de interés se muestran en la tabla.

	Densidad (g.cm-3)	Índice de refracción
Agua	0,9971	1,3328
Etanol	0,7852	1,3592

■Protocolos

Con el objetivo de hacer pasar un líquido por la fibra se ha probado dos protocolos:

Protocolo 1

1. Llenar la jeringa con líquido
2. Bomba en modo empuje

Protocolo 2

1. Colocar la fibra en un vaso de precipitado lleno de líquido
2. Bomba en modo extracción

La bomba en ambos casos se ha programado en una tasa constante de inyección/extracción de 5 microlitros por minuto.

7.1.C RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han realizado numerosas pruebas con el montaje indicado para conseguir hacer pasar un líquido por la fibra de cristal fotónico.

Sin embargo, en todas las pruebas se ha repetido el mismo problema: el colapso de las fijaciones siendo el más repetido, el de la unión tubo-fibra.

Tras una primera prueba con agua se pensó que el fallo podía deberse a una alta tensión superficial debida a la densidad del líquido. Por esa razón se repitió el experimento con etanol sin mayor éxito.

Sin descartar el motivo de la tensión superficial, se llegó a probar el experimento con aire. Sin embargo, en modo extracción, no se conseguía estirar de la jeringa, por lo que se entiende que los poros estaban bloqueados y la situación era de vacío. De la misma forma, se intentó inyectar aire en un vaso de precipitado de agua, pero no se observaron burbujas que hubieran sido marcadores de éxito.

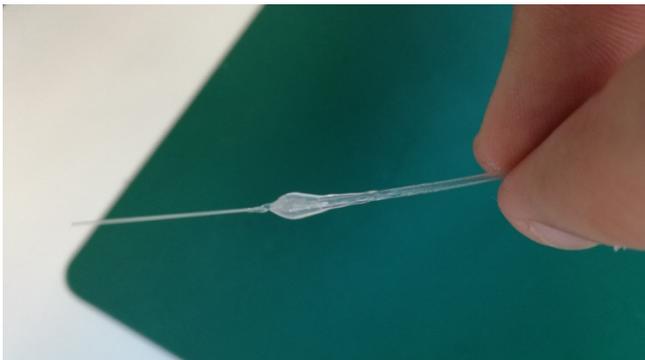


fig. 51. Imagen tomada en el momento en que empezaba a colapsar la unión tubo-silicona. Llegado este punto, ya no se puede continuar con el experimento.

Por todo esto, concluimos que este montaje no es eficaz para situaciones de sensado. La presencia del paso de sellado manual hace muy complicado conseguir fluir un líquido por la fibra.

Tras un estudio de la bibliografía sobre el sensado de líquidos con fibra de cristal fotónico, no se encontró ningún artículo que explicara exactamente el montaje utilizado.

Por otro lado, tras detectar que la mayoría de la investigación se centraba en el sensado de gases, se decidió cambiar a este tipo de sensado.

7.2 SENSADO DE GASES

La segunda prueba de sensado tiene como objetivo hacer pasar un **gas** por el interior de la fibra y observar un cambio en el espectro debido a la nueva relación entre índices de refracción.

En las pruebas con líquido los problemas encontrados se basaban en el montaje. El montaje manual resultaba ser una fuente de errores. Por tanto, se decide el paso al sensado con gases donde se utilizará un montaje mucho más sencillo.

7.2.A MONTAJE

El montaje utilizado consta de los siguientes componentes:

8. Componentes

Equipo FTIR

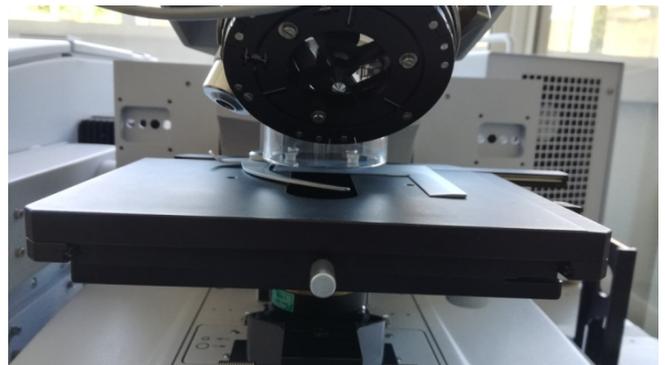


fig. 52. Plataforma del microscopio FTIR donde podemos apreciar la campana que utilizaremos para el sensado.

Utilizamos el FTIR para realizar las medidas. Está provisto de una campana de plástico que utilizaremos para las medidas.

Software OPUS

Como explicamos anteriormente, este programa está sincronizado con el FTIR y nos permite controlar la realización de las medidas.

Fibra óptica fotónica

Colocamos la fibra óptica fotónica en el portaobjetos igual que hicimos para su caracterización. Sin embargo, en este caso necesitamos trabajar con trozos de fibra más cortos para que la campana de plástico pueda bajar completamente.

8.1.A EXPERIMENTO

Se han probado como líquidos agua y etanol cuyas características de interés se muestran en la tabla.

	Densidad (g.cm-3)	Índice de refracción
Vapor de propanol	0.002	1,001

■ Protocolo

Con el objetivo de hacer pasar un gas por la fibra se ha seguido el siguiente protocolo

1) Situación de control

Las primeras tres medidas se toman en la situación de control: sin vapor de propanol

2) Introducción del propanol

A continuación, se introduce una gota de propanol en el portaobjetos, se cierra la campana del microscopio y se toman 9 medidas con un intervalo de 20 segundos

3) Sin propanol

Finalmente, se abre la campana para dejar escapar el vapor de propanol tomando las últimas 18 medidas con un intervalo de un 20 segundos cada una.

8.1.B RESULTADOS

En la siguiente gráfica se observan los resultados de una prueba de sensado de propanol.

Se ha utilizado un pico característico en 5 micras para el seguimiento de su desplazamiento.

Podemos observar que se cumple la tendencia esperada para este experimento.

A partir de que se introduce la gota de propanol (medida 4) empieza a producirse un desplazamiento del pico de sensado hacia longitudes de onda más altas.

La campana se abre en la medida 12, sin embargo, no es hasta la medida 21 cuando empieza a regresar el pico de sensado a las longitudes de onda de control.

Viendo la tendencia, podemos decir que sí se ha conseguido sensar vapor de propanol. Además la respuesta es casi instantánea Sin embargo hay unos factores a tener en cuenta.

Aunque la tendencia es evidente, hay varias medidas que muestran un comportamiento extraño. Por ejemplo, la segunda medida de control tiene una variación demasiado elevada para la condición en la que fue tomada.

Pese a ello, el desplazamiento es significativo por lo que se admite el poder de sensado para este gas.

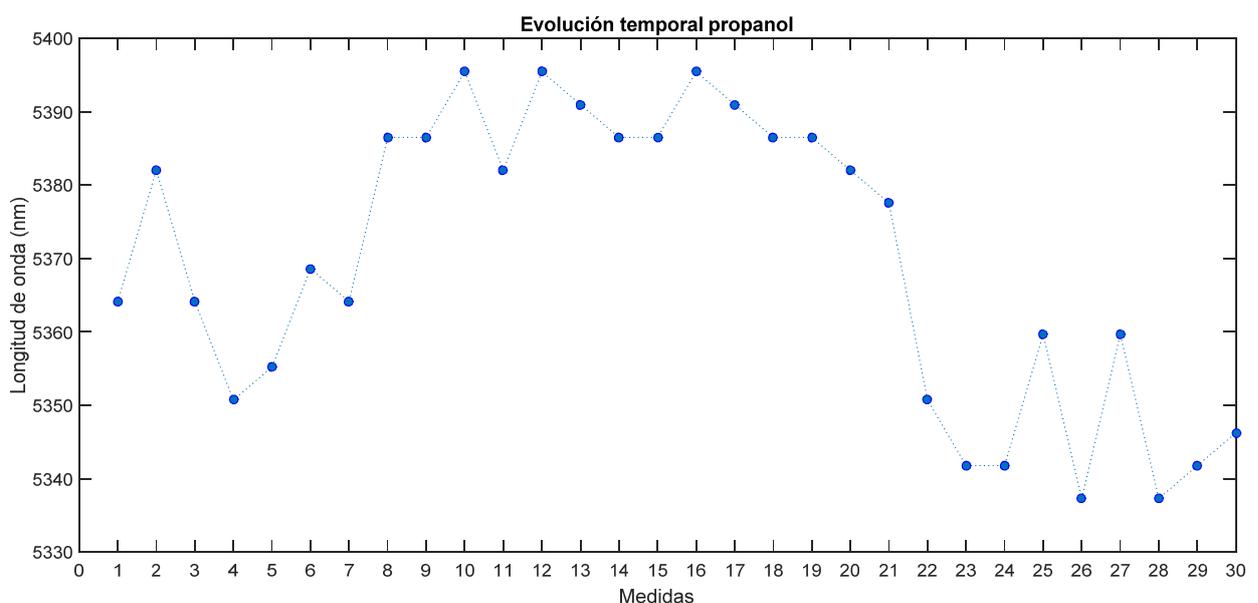


fig. 53. Evolución del pico de sensado en el tiempo

9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 CONCLUSIONES

Viabilidad teórica

Se ha demostrado la viabilidad teórica de un sensor basado en fibra de cristal fotónico.

Mediante simulaciones se ha podido observar que este tipo de fibras ópticas especiales siguen los principios de un cristal fotónico bidimensional.

Viabilidad experimental

Se ha demostrado la viabilidad experimental de un sensor basado en fibra de cristal fotónico.

Midiendo en Infrarrojo cercano con la cámara de infrarrojo se ha observado la alta influencia del ángulo de incidencia y del posicionamiento de la fibra.

Mediante Espectrofotometría Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR) se ha conseguido caracterizar totalmente el espectro de la fibra. Confirmándose los resultados obtenidos teóricamente.

Pruebas de sensado

Se han realizado pruebas de sensado de líquidos y gases. Concretamente se ha probado con agua, etanol, aire y propanol.

Respecto al sensado de líquidos no se han conseguido resultados satisfactorios por problemas en el montaje propuesto.

Respecto al sensado de gases, sí se han conseguido buenos resultados. Pese a la baja reproducibilidad, las tendencias que se observan son correctas.

A lo largo de todo el trabajo hemos sido conscientes de numerosos problemas de reproducibilidad. Un factor importante es la poca bibliografía existente al respecto al tratarse de una técnica muy novedosa.

Sin embargo, se piensa que la gran utilidad de este trabajo es servir como punto de partida para sucesivas investigaciones.

9.2 TRABAJO FUTURO

Problemas de reproducibilidad

En cuanto a los problemas de reproducibilidad se podrán solucionar si se aseguran montajes basados en mecanismos precisos de sujeción y posicionamiento.

Mejoras en el sensor

Se deben explotar las posibilidades de este tipo de sensor una vez se cuenten con equipos y montajes especiales para este tipo de fibras.

Así futuras mejoras de este tipo de sensores deben incluir:

- Integración multiescala
- Multifuncionalidad
- Sensado multiparamétrico

Aplicación en biomedicina

Concretamente podrán aprovechar sus características en aplicaciones biomédicas si son:

Muy sensibles: Llegando incluso a detectar una molécula. Este factor es imprescindible en monitorización.

Muy específicos: No sólo deben sensar la presencia de moléculas, si no detectar las que sean de interés. Este factor es imprescindible en diagnóstico

Estables: Deben estar preparados para cambios de temperatura, movimientos o humedad. Sólo así se garantizará la reproducibilidad.

10. BIBLIOGRAFÍA

1. J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. J. Russell, and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.* 21, 1547-1549, 1996
2. Stig E. Barkou, Jes Broeng, and Anders Bjarklev, "Silica-air photonic crystal fiber design that permits waveguiding by a true photonic bandgap effect," *Opt. Lett.* 24, 46-48 (1999)
3. A. Ferrando, E. Silvestre, J. J. Miret, P. Andrés, and M. V. Andrés, "Full-vector analysis of a realistic photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* 24, 276-278, 1999
4. M. J. Gander, R. McBride, J. D. C. Jones, T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell, P. M. Blanchard, J. G. Burnett, and A. H. Greenaway, "Measurement of the wavelength dependence of beam divergence for photonic crystal fiber," *Opt. Lett.* 24, 1017-1019, 1999
5. T. Yamamoto, H. Kubota, S. Kawanishi, M. Tanaka, and S. Yamaguchi, "Supercontinuum generation at 1.55 μm in a dispersion-flattened polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Opt. Express* 11, 1537-1540, 2003
6. M.D. Nielsen, J.R. Folkenberg, N.A. Mortensen, and A. Bjarklev, "Bandwidth comparison of photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers," *Opt. Express* 12, 430-435, 2004
7. Ana M. R. Pinto and Manuel Lopez-Amo, "Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications," *Journal of Sensors*, vol. 2012, Article ID 598178, 21 pages, 2012.
8. W. J. Bock, J. Chen, P. Mikulic, T. Eftimov, and M. KorwinPawlowski, "Pressure sensing using periodically tapered long-period gratings written in photonic crystal fibres," *Measurement Science and Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 3098-3102, 2007
9. W. J. Bock, J. Chen, T. Eftimov, and W. Urbanczyk, "A photonic crystal fiber sensor for pressure measurements," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 4, pp. 1119-1123, 2006.
10. H. K. Gahir and D. Khanna, "Design and development of a temperature-compensated fiber optic polarimetric pressure sensor based on photonic crystal fiber at 1550nm," *Applied Optics*, vol. 46, no. 8, pp. 1184-1189, 2007
11. F. C. Fávero, S. M. M. Quintero, C. Martelli et al., "Hydrostatic pressure sensing with high birefringence photonic crystal fibers," *Sensors*, vol. 10, no. 11, pp. 9698-9711, 2010.
12. Y. S. Shinde and H. K. Gahir, "Dynamic pressure sensing study using photonic crystal fiber: application to tsunami sensing," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 279-281, 2008.
13. T. Nasilowski, T. Martynkien, G. Statkiewicz et al., "Temperature and pressure sensitivities of the highly birefringent photonic crystal fiber with core asymmetry," *Applied Physics B*, vol. 81, no. 2-3, pp. 325-331, 2005.
14. T. Martynkien, M. Szpulak, G. Statkiewicz et al., "Measurements of sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in highly birefringent photonic crystal fibers," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 39, no. 4-6, pp. 481-489, 2007.
15. T. Martynkien, G. Statkiewicz-Barabach, J. Olszewski et al., "Highly birefringent microstructured fibers with enhanced sensitivity to hydrostatic pressure," *Optics Express*, vol. 18, no. 14, pp. 15113-15121, 2010.
16. H. Y. Fu, H. Y. Tam, L. Y. Shao et al., "Pressure sensor realized with polarization-maintaining photonic crystal fiber-based Sagnac interferometer," *Applied Optics*, vol. 47, no. 15, pp. 2835-2839, 2008.
17. H. Y. Fu, C. Wu, M. L. V. Tse et al., "High pressure sensor based on photonic crystal fiber for downhole application," *Applied Optics*, vol. 49, no. 14, pp. 2639-2643, 2010
18. J. Ju, Z. Wang, W. Jin, and M. S. Demokan, "Temperature sensitivity of a two-mode photonic crystal fiber interferometric sensor," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 20, pp. 2168-2170, 2006.
19. D. Monzon-Hernandez, V. P. Minkovich, and J. Villatoro, "High-temperature sensing with tapers made of microstructured optical fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 3, pp. 511-513, 2006.
20. S. S. Li, Z. D. Huang, X. S. Song et al., "Photonic crystal fiber based high temperature sensor with three-beam path interference," *Electronics Letters*, vol. 46, no. 20, pp. 1394-1396, 2010.
21. S. M. Nalawade and H. V. Thakur, "Photonic crystal fiber strain-independent temperature sensing based on modal interferometer," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 21, pp. 1600-1602, 2011.
22. J. Ju, W. Jin, and H. L. Ho, "Compact in-fiber interferometer formed by long-period gratings in photonic crystal fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 23, pp. 1899-1901, 2008.
23. Y. Geng, X. Li, X. Tan, Y. Deng, and Y. Yu, "Sensitivity-enhanced high-temperature sensing using all-solid photonic bandgap fiber modal interference," *Applied Optics*, vol. 50, no. 4, pp. 468-472, 2011.

24. H. Y. Choi, K. S. Pack, S. J. Park, U. C. Paek, B. H. Lee, and E. S. Choi, "Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer," *Optics Letters*, vol. 33, no. 21, pp. 2455–2457, 2008.
25. A. M. R. Pinto, O. Frazão, J. L. Santos, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, and K. Schuster, "Interrogation of a suspended-core Fabry-Perot temperature sensor through a dual wavelength Raman fiber laser," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 21, Article ID 5582123, pp. 3149–3155, 2010.
26. A. M. R. Pinto, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, and K. Schuster, "Temperature fiber laser sensor based on a hybrid cavity and a random mirror," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, no. 99, 2011.
27. Y. Zhu, P. Shum, H. W. Bay et al., "Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber," *Optics Letters*, vol. 30, no. 4, pp. 367–369, 2005.
28. B. H. Kim, S. H. Lee, A. Lin, C. L. Lee, J. Lee, and W. T. Han, "Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium," *Optics Express*, vol. 17, no. 3, pp. 1789–1794, 2009.
29. W. Qian, C. L. Zhao, S. He et al., "High-sensitivity temperature sensor based on an alcohol-filled photonic crystal fiber loop mirror," *Optics Letters*, vol. 36, no. 9, pp. 1548–1550, 2011.
30. B. Larrion, M. Hernandez, F. J. Arregui, J. Goicoechea, J. Bravo, and I. R. Matias, "Photonic crystal fiber temperature sensor based on quantum dot nanocoatings," *Journal of Sensors*, vol. 2009, Article ID 932471, 6 pages, 2009.
31. A. Bozolan, R. M. Gerosa, C. J. S. de Matos, and M. A. Romero, "Temperature sensing using colloidal-core photonic crystal fiber," *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 195–200, 2012.
32. Y. Miao, B. Liu, K. Zhang, Y. Liu, and H. Zhang, "Temperature tunability of photonic crystal fiber filled with Fe_3O_4 nanoparticle fluid," *Applied Physics Letters*, vol. 98, no. 2, Article ID 021103, 2011.
33. Y. Yu, X. Li, X. Hong et al., "Some features of the photonic crystal fiber temperature sensor with liquid ethanol filling," *Optics Express*, vol. 18, no. 15, pp. 15383–15388, 2010.
34. W. Ying, Y. Minwei, D. N. Wang, and C. R. Liao, "Selectively infiltrated photonic crystal fiber with ultrahigh temperature sensitivity," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 20, pp. 1520–1522, 2011.
35. L. Zou, X. Bao, and L. Chen, "Distributed Brillouin temperature sensing in photonic crystal fiber," *Smart Materials and Structures*, vol. 14, no. 3, pp. S8–S11, 2005.
36. Y. Dong, X. Bao, and L. Chen, "Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Optics Letters*, vol. 34, no. 17, pp. 2590–2592, 2009.
37. J. Villatoro, V. Finazzi, V. P. Minkovich, V. Pruneri, and G. Badenes, "Temperature-insensitive photonic crystal fiber interferometer for absolute strain sensing," *Applied Physics Letters*, vol. 91, no. 9, Article ID 091109, 2007.
38. Q. Shi, F. Y. Lv, Z. Wang et al., "Environmentally stable Fabry-Perot-type strain sensor based on hollow-core photonic bandgap fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 237–239, 2008.
39. Q. Shi, Z. Wang, L. Jin et al., "A hollow-core photonic crystal fiber cavity based multiplexed Fabry-Perot interferometric strain sensor system," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 20, no. 15, pp. 1329–1331, 2008.
40. O. Frazão, J. M. Baptista, and J. L. Santos, "Temperature independent strain sensor based on a Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirror," *IEEE Sensors Journal*, vol. 7, no. 10, pp. 1453–1455, 2007.
41. W. Qian, C. L. Zhao, X. Dong, and W. Jin, "Intensity measurement based temperature-independent strain sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber loop mirror," *Optics Communications*, vol. 283, no. 24, pp. 5250–5254, 2010.
42. W. Zhou, W. C. Wong, C. C. Chan, L. Y. Shao, and X. Dong, "Highly sensitive fiber loop ringdown strain sensor using photonic crystal fiber interferometer," *Applied Optics*, vol. 50, no. 19, pp. 3087–3092, 2011.
43. H. Zhang, B. Liu, Z. Wang et al., "Temperature-insensitive displacement sensor based on high-birefringence photonic crystal fiber loop mirror," *Optica Applicata*, vol. 40, no. 1, pp. 209–217, 2010.
44. M. Bravo, A. M. R. Pinto, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, and K. Schuster, "High precision micro-displacement fiber sensor through a suspended-core Sagnac interferometer," *Optics Letters*, vol. 37, no. 2, pp. 202–204, 2012.
45. B. Dong and E. J. Hao, "Temperature-insensitive and intensity-modulated embedded photonic-crystal-fiber modal-interferometer-based microdisplacement sensor," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 28, no. 10, pp. 2332–2336, 2011.
46. L. Zou, X. Bao, V. Shahraam Afshar, and L. Chen, "Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber," *Optics Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1485–1487, 2004.
47. Y. G. Han, Y. Chung, S. B. Lee, C. S. Kim, M. Y. Jeong, and M. K. Kim, "Temperature and strain discrimination based on a temperature-insensitive birefringent interferometer incorporating an erbium-doped fiber," *Applied Optics*, vol. 48, no. 12, pp. 2303–2307, 2009.
48. C. Martelli, J. Canning, N. Groothuis, and K. Lyytikäinen, "Strain and temperature characterization of photonic crystal fiber Bragg gratings," *Optics Letters*, vol. 30, no. 14, pp. 1785–1787, 2005.

49. O. Frazão, S. H. Aref, J. M. Baptista et al., "Fabry-Perot cavity based on a suspended-core fiber for strain and temperature measurement," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 17, pp. 1229–1231, 2009.
50. Y. J. Rao, M. Deng, T. Zhu, and H. Li, "In-line Fabry-Perot etalons based on hollow-core photonic bandgap fibers for high-temperature applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 19, pp. 4360–4365, 2009.
51. O. Frazão, J. M. Baptista, J. L. Santos, J. Kobelke, and K. Schuster, "Strain and temperature characterisation of sensing head based on suspended-core fibre in Sagnac interferometer," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 25, pp. 1455–1456, 2008.
52. Y. G. Han, Y. Chung, and S. B. Lee, "Discrimination of strain and temperature based on a polarization-maintaining photonic crystal fiber incorporating an erbium-doped fiber," *Optics Communications*, vol. 282, no. 11, pp. 2161–2164, 2009.
53. R. M. Andre, M. B. Marques, P. Roy, and O. Frazao, "Fiber loop mirror using a small core microstructured fiber for strain and temperature discrimination," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 15, pp. 1120–1122, 2010.
54. G. Kim, T. Cho, K. Hwang et al., "Strain and temperature sensitivities of an elliptical hollow-core photonic bandgap fiber based on Sagnac interferometer," *Optics Express*, vol. 17, no. 4, pp. 2481–2486, 2009.
55. O. Frazão, J. L. Santos, and J. M. Baptista, "Strain and temperature discrimination using IF concatenated high-birefringence fiber loop mirrors," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, pp. 1260–1262, 2007.
56. B. Gu, W. Yuan, S. He, and O. Bang, "Temperature compensated strain sensor based on cascaded Sagnac interferometers and all-solid birefringent hybrid photonic crystal fibers," *IEEE Sensors Journal*, no. 99, 2011.
57. S. H. Aref, R. Amezcua-Correa, J. P. Carvalho et al., "Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement," *Optics Express*, vol. 17, no. 21, pp. 18669–18675, 2009.
58. G. Statkiewicz-Barabach, J. P. Carvalho, O. Frazão et al., "Intermodal interferometer for strain and temperature sensing fabricated in birefringent boron doped microstructured fiber," *Applied Optics*, vol. 50, no. 21, pp. 3742–3749, 2011.
59. G. A. Cardenas-Sevilla, V. Finazzi, J. Villatoro, and V. Pruneri, "Photonic crystal fiber sensor array based on modes overlapping," *Optics Express*, vol. 19, no. 8, pp. 7596–7602, 2011.
60. R. M. Silva, M. S. Ferreira, J. Kobelke, K. Schuster, and O. Frazão, "Simultaneous measurement of curvature and strain using a suspended multicore fiber," *Optics Letters*, vol. 36, no. 19, pp. 3939–3941, 2011.
61. G. Statkiewicz, T. Martynkien, and W. Urbanczyk, "Measurements of modal birefringence and polarimetric sensitivity of the birefringent holey fiber to hydrostatic pressure and strain," *Optics Communications*, vol. 241, no. 4–6, pp. 339–348, 2004.
62. C. M. Jewart, Q. Wang, J. Canning, D. Grobncic, S. J. Mihailov, and K. P. Chen, "Ultrafast femtosecond-laser-induced fiber bragg gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing," *Optics Letters*, vol. 35, no. 9, pp. 1443–1445, 2010.
63. T. Chen, R. Z. Chen, C. Jewart et al., "Regenerated gratings in air-hole microstructured fibers for high-temperature pressure sensing," *Optics Letters*, vol. 36, no. 18, pp. 3542–3544, 2011.
64. J. Xu, Y. G. Liu, Z. Wang, and B. Tai, "Simultaneous force and temperature measurement using long-period grating written on the joint of a microstructured optical fiber and a single mode fiber," *Applied Optics*, vol. 49, no. 3, pp. 492–496, 2010.
65. Y. J. Rao, M. Deng, D. W. Duan, and T. Zhu, "In-line fiber Fabry-Perot refractive-index tip sensor based on endlessly photonic crystal fiber," *Sensors and Actuators A*, vol. 148, no. 1, pp. 33–38, 2008.
66. W. J. Bock, W. Urbanczyk, and J. Wojcik, "Measurements of sensitivity of the single-mode photonic crystal holey fibre to temperature, elongation and hydrostatic pressure," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1496–1500, 2004.
67. H. Dobb, K. Kalli, and D. J. Webb, "Measured sensitivity of arc-induced long-period grating sensors in photonic crystal fibre," *Optics Communications*, vol. 260, no. 1, pp. 184–191, 2006.
68. O. Frazão, S. O. Silva, J. M. Baptista et al., "Simultaneous measurement of multiparameter using a Sagnac interferometer with polarization maintaining side-hole fiber," *Applied Optics*, vol. 47, no. 27, pp. 4841–4848, 2008.
69. M. Deng, C. P. Tang, T. Zhu and Y. J. Rao, "PCF-Based Fabry-Pérot Interferometric Sensor for Strain Measurement at High Temperatures," in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 11, pp. 700–702, June 1, 2011.
70. H. Y. Fu, S. K. Khijwania, H. Y. Tam, P. K. A. Wai, and C. Lu, "Polarization-maintaining- photonic-crystal-fiber-based alloptical polarimetric torsion sensor," *Applied Optics*, vol. 49, no. 31, pp. 5954–5958, 2010.
71. P. M. Blanchard, J. G. Burnett, G. R. G. Erry et al., "Twodimensional bend sensing with a single, multi-core optical fibre," *Smart Materials and Structures*, vol. 9, no. 2, pp. 132–140, 2000.

72. Warren-Smith, Stephen C. et al. "Enzyme Activity Assays within Microstructured Optical Fibers Enabled by Automated Alignment." *Biomedical Optics Express* 3.12 (2012): 3304–3313. PMC. Web. 11 July 2017.
73. S. O. Konorov, A. B. Fedotov, A. M. Zheltikov, and R. B. Miles, "Phase-matched four-wave mixing and sensing of water molecules by coherent anti-stokes Raman scattering in large-core-area hollow photonic-crystal fibers," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 22, no. 9, pp. 2049–2053, 2005.
74. X. H. Yang and L. L. Wang, "Fluorescence probe based on microstructured polymer optical fiber," *Optics Express*, vol. 15, no. 25, pp. 16478–16483, 2007.
75. Yeuk L. Hoo, Wei Jin, Chunzheng Shi, Hoi L. Ho, Dong N. Wang, and Shuang C. Ruan, "Design and modeling of a photonic crystal fiber gas sensor," *Appl. Opt.* 42, 3509-3515 (2003)
76. Isabelle Dicaire, Jean-Charles Beugnot, and Luc Thévenaz, "Analytical modeling of the gas-filling dynamics in photonic crystal fibers," *Appl. Opt.* 49, 4604-4609, 2010
77. G. F. Yan, A. P. Zhang, G. Y. Ma et al., "Fiber-optic acetylene gas sensor based on microstructured optical fiber bragg gratings," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 21, pp. 1588–1590, 2011.
78. S. H. Kassani, R. Khazaeinezhad, Y. Jung, J. Kobelke and K. Oh, "Suspended Ring-Core Photonic Crystal Fiber Gas Sensor With High Sensitivity and Fast Response," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, Feb. 2015.
79. Jianchun Yang, Lang Zhou, Xin Che, Jing Huang, Xueming Li, Weimin Chen, Photonic crystal fiber methane sensor based on modal interference with an ultraviolet curable fluoro-siloxane nano-film incorporating cryptophane A, *Sensors and Actuators B: Chemical*, Volume 235, 2016
80. J. P. Carvalho, H. Lehmann, H. Bartelt, et al., "Remote System for Detection of Low-Levels of Methane Based on Photonic Crystal Fibres and Wavelength Modulation Spectroscopy," *Journal of Sensors*, vol. 2009, Article ID 398403, 10 pages, 2009
81. V. P. Minkovich, D. Monzón-Hernández, J. Villatoro, and G. Badenes, "Microstructured optical fiber coated with thin films for gas and chemical sensing," *Optics Express*, vol. 14, no. 18, pp. 8413–8418, 2006.
82. S. H. Kassani, R. Khazaeinezhad, Y. Jung, J. Kobelke and K. Oh, "Suspended Ring-Core Photonic Crystal Fiber Gas Sensor With High Sensitivity and Fast Response," in *IEEE Photonics Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 1-9, Feb. 2015.
83. M. Y. Azab, M. F. O. Hameed, A. M. Heikal, S. S. A. Obayya and M. A. Swillam, "Surface plasmon photonic crystal fiber biosensor for glucose monitoring," 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium, pp. 1-2, 2017
84. Lars Rindorf, Jesper B. Jensen, Martin Dufva, Lars Hagsholm Pedersen, Poul Erik Høiby, and Ole Bang, "Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing," *Opt. Express* 14, 8224-8231, 2006
85. Yinlan Ruan, Erik P. Schartner, Heike Ebendorff-Heidepriem, Peter Hoffmann, and Tanya M. Monro, "Detection of quantum-dot labeled proteins using soft glass microstructured optical fibers," *Opt. Express* 15, 17819-17826, 2007
86. Jesper B. Jensen, Lars H. Pedersen, Poul E. Hoiby, Lars B. Nielsen, T. P. Hansen, J. R. Folkenberg, J. Riishede, Danny Noordegraaf, Kristian Nielsen, A. Carlsen, and A. Bjarklev, "Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions," *Opt. Lett.* 29, 1974-1976 (2004)
87. A. Ricciardi and A. Cusano, "Lab-on-Fiber Technology for Biological Sensing Applications," in *Frontiers in Optics 2016*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016.
88. Jesper B. Jensen, Poul E. Hoiby, Grigoriy Emiliyanov, Ole Bang, Lars H. Pedersen, and Anders Bjarklev, "Selective detection of antibodies in microstructured polymer optical fibers," *Opt. Express* 13, 5883-5889, 2005
89. Hong C. Nguyen, Peter Domachuk, Benjamin J. Eggleton, Michael J. Steel, Martin Straub, Min Gu, and Mikhail Sumetsky, "New slant on photonic crystal fibers," *Opt. Express* 12, 1528-1539, 2004



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

Trabajo Fin de Grado en
Ingeniería Biomédica

Curso Académico 2016-2017

DOCUMENTO DE PRESUPUESTO

ESTUDIO DE FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO PARA BIOSENSADO
HACIENDO USO DE INTERROGACIÓN TRANSVERSAL

Gonzalo Collantes Pablo

INDICE PRESUPUESTO

1. INTRODUCCIÓN	3
2. CUADRO DE PRECIOS DE MANO DE OBRA	4
3. CUADRO DE PRECIOS DE MATERIALES, EQUIPOS Y SOFTWARE	4
4. CUADRO DE PRECIOS DE MAQUINARIA	4
5. CUADRO DE PRESUPUESTOS PARCIALES	6
6. CUADRO DE PRECIOS UNITARIOS	7
7. CUADRO DE PRECIOS DESCOMPUESTOS	8
PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y CONOCIMIENTO DEL ESTADO DEL ARTE _____	8
MODELO DE SIMULACIÓN POR ORDENADOR _____	8
MONTAJE DE LA MESA DE LABORATORIO _____	8
REDACCIÓN DEL TFG Y SU EXPOSICIÓN _____	9
8. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DE OBRA	11

1. Introducción

Para calcular el sueldo bruto de un ingeniero biomédico recién graduado (IBJ) se ha tomado el valor de las ayudas para la contratación de personal investigador en formación de carácter predoctoral de la Conselleria de Educación (GVA) para 2017² que es de 1.200 €/mes.

El sueldo bruto de un ingeniero que es de 2.230 € al mes y el de un administrativo es de 1.320€/mes, para el año 2017³.

técnico	salario bruto/mes	SS empresa/mes	salario bruto/año	SS empresa/año	coste salarial bruto/año	coste/hora
IBJ	1.200 €	370 €	16.800	4.435	22.193	12,38
IIS	2.230 €	687 €	31.220	8.242	39.462	22,02
ADM	1.320 €	407 €	18.480	4.879	23.359	13,04

El coste salarial bruto por cuenta ajena⁴ del IBJ es de 16.800 €/año, a lo que hay que sumar 4.121€ (el 30,8%) de cotización de la empresa a la seguridad social por el trabajador, lo que supone un total de 21.235 €.

El número de horas trabajadas al año es de 1.792 (resultado de 224 días por 8 horas por jornada, teniendo en cuenta que en la comunidad valenciana los días laborables para 2017 son 249, a los que hay que descontar los 22 días de vacaciones y 3 de asuntos propios). El coste salarial total del IBJ es de 11,85 €/h, mientras que el coste salarial ingeniero industrial superior (IIS) es de 22,02 €/h, y el de un administrativo de 13,04€/h.

En cuanto a los costes de experimentación se han obtenido teniendo en cuenta la amortización de equipamiento y licencias de software empleados.

La distribución del trabajo desarrollado ha seguido el siguiente Cronograma

Actividades	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun
1. Búsqueda bibliográfica sobre los fundamentos teóricos de la fotónica	■ ■ ■	■ ■ ■							
2. Simulaciones		■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■					
3. Experimentos					■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	■ ■ ■	
4. Redacción									■ ■ ■

² RESOLUCIÓN de 25 de enero de 2017, de la Conselleria de Educación, Investigación, Cultura y Deporte, por la que se convocan, para el ejercicio 2017, subvenciones del Programa para la promoción de la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación en la Comunitat Valenciana. [2017/647] (DOGV30.01.2017)

³Listado de sueldos medios para 2017 <http://www.modelocurriculum.net/los-sueldos-en-espana.html>

⁴ Simulador de sueldo neto <https://cincodias.elpais.com/herramientas/calculadora-sueldo-neto>

2. Cuadro de precios de mano de obra

nº código	denominación de la mano de obra	precio	hora	total
1 MO.IBJ	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	428 h	5.300,51 €
2 MO.IIS	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h	23 h	506,49 €
3 MO.ADM	Administrativo (dpto.)	13,04 €/h	1 h	13,04 €
total mano de obra:				5.820,04 €

3. Cuadro de precios de materiales, equipos y software

nº código	denominación del material / equipo / software	precio	cantidad	fact. amort.	total
1 MES. Fib	Fibra de cristal fotónico. Tipo solid	800,00 €	1	--	800,00 €
2 MES. Lab	Licencia Labview Profesional	6.005,00 €	1	6/48	750,63 €
3 MES. Mat	Licencia Matlab	2.000,00 €	1	7/48	291,67 €
4 MES. Off	Licencia Suite Office 365	99,00 €	1	--	99,00 €
5 MES. Ord	Acer Aspire E15 - Ordenador Portátil de 15,6 " HD (Intel Core i5-7200U, 8 GB RAM, 1 TB HDD, Nvidia GT 940MX 2 GB, Windows 10)	599,00 €	1	7/48	87,35 €
6 MES. Imp	Impresión TFG	0,05 €	70	--	3,50 €
7 MES. Enc	Encuadernación	3,00 €	1	--	3,00 €
<i>total materiales, equipo y software:</i>					2.035,15 €

4. Cuadro de precios de maquinaria

nº código	denominación del maquinaria	precio	cantidad	fact. amort.	total
1 MES.Las	Keysight Technology Modelo: 81949A Compact Tunable Laser Source	35.375,00 €	1	3/60	1.768,75 €
2 MES. Len	Lensed Fiber	100,00 €	1	3/60	5,00 €
3 MES. Con	Controlador manual de polarización. Thorlabs	186,00 €	1	3/60	9,30 €
4 MES. Chu	Chuck. HFC007. Thorlabs	69,50 €	1	3/60	3,48 €
5 MES. Rot	Rotatable Fiber Mount	65,25 €	1	3/60	3,26 €
6 MES. Cam	Cámara Xenics. Xeva-FPA-1.7	18.000,00 €	1	3/60	900,00 €

nº	código	denominación del maquinaria	precio		cantidad	fact. amort.	total	
7	MES. Fil	Filtro de polarización. LPUV050. Thorlabs	244,00	€	1	3/60	12,20	€
8	MES. Ben	Beamsplitter. Thorlabs	170,00	€	1	3/60	8,50	€
9	MES. Pla	Plataforma. 3-Axis MicroBlock™ Compact Flexure Stages. Thorlabs	995,00	€	1	3/60	49,75	€
10	MES. Mes	Mesa Newport™ RS2000 Precision Tuned Damped Research Optical	3.000,00	€	1	3/60	150,00	€
11	MES. Car	Laser Viewing Cards. VRC2 - VIS/IR Detector Card, 400 - 640 nm, 800 - 1700 nm. Thorlabs	73,25	€	1	3/60	3,66	€
12	MES. Bom	Bomba. 540060/540060-HP Single Syringe. TSE	800,00	€	1	3/60	40,00	€
						<i>total maquinaria:</i>	2.944,60	€

5. Cuadro de Presupuestos Parciales

1 *Planificación del proyecto y conocimiento del estado del arte*

nº	ud	denominación	cantidad	precio	total
1.1	h	Reunión para la planificación del TFG	1	68,81 €	68,81 €
1.2	h	Revisión de la bibliografía sobre uso de la fotónica en biosensores	1	1.238,44 €	1.238,44 €
1.3	u	Instalación de software	1	1.289,95 €	1.289,95 €
<i>total presupuesto parcial nº: 1</i>					2.597,20 €

2 *Modelo de simulación por ordenador*

nº	ud	denominación	cantidad	precio	total
2.1	h	Estudio del algoritmo	1	83,94 €	83,94 €
2.2	h	Simulaciones	1	729,33 €	729,33 €
2.3	h	Comparativa de magnitudes	1	291,73 €	291,73 €
<i>total presupuesto parcial nº: 2</i>					1.105,00 €

3 *Montaje de la mesa de laboratorio*

nº	ud	denominación	cantidad	precio	total
3.1	h	Instalación de componentes	1	3.035,10 €	3.035,10 €
3.2	u	Toma de mediciones	1	1.485,28 €	1.485,28 €
3.3	h	Discusión de resultados	1	103,22 €	103,22 €
<i>total presupuesto parcial nº: 3</i>					4.623,60 €

4 *Redacción del TFG y su exposición*

nº	ud	denominación	cantidad	precio	total
4.1	h	Elaboración de los documentos del TFG	1	1.548,05 €	1.548,05 €
4.2	u	Revisión y mejora de los documentos	1	818,76 €	818,76 €
4.3	u	Impresión TFG	1	6,50 €	6,50 €
4.4	u	Preparación exposición TFG	1	818,76 €	818,76 €
<i>total presupuesto parcial nº: 4</i>					3.192,07 €

5 *Administración*

nº	ud	denominación	cantidad	precio	total
5.1	h	Secretaría	1	25,42 €	25,42 €
<i>total presupuesto parcial nº: 5</i>					25,42 €

6. Cuadro de Precios Unitarios

nº	denominación	Importe	
		en cifra(€)	en letra (€)
1 <u>Planificación del proyecto y conocimiento del estado del arte</u>			
1.1	h Reunión para la planificación del TFG	68,81	sesenta y ocho euros con ochenta y un céntimos
1.2	h Revisión de la bibliografía sobre uso de la fotónica en biosensores	1.238,44	mil doscientos treinta y ocho euros con cuarenta y cuatro céntimos
1.3	u Instalación de software	1.289,95	mil doscientos ochenta y nueve euros con noventa y cinco céntimos
2 <u>Modelo de simulación por ordenador</u>			
2.1	h Estudio del algoritmo	83,94	ochenta y tres euros con noventa y cuatro céntimos
2.2	h Simulaciones	729,33	setecientos veintinueve euros con treinta y tres céntimos
2.3	h Comparativa de magnitudes	291,73	doscientos noventa y un euros con setenta y tres céntimos
3 <u>Montaje de la mesa de laboratorio</u>			
3.1	h Instalación de componentes	3.035,10	tres mil treinta y cinco euros con diez céntimos
3.2	u Toma de mediciones	1.485,28	mil cuatrocientos ochenta y cinco euros con veintiocho céntimos
3.3	h Discusión de resultados	103,22	ciento tres euros con veintidós céntimos
4 <u>Redacción del TFG y su exposición</u>			
4.1	h Elaboración de los documentos del TFG	1.548,05	mil quinientos cuarenta y ocho euros con cinco céntimos
4.2	u Revisión y mejora de los documentos	818,76	ochocientos dieciocho euros con setenta y seis céntimos
4.3	u Impresión TFG	6,50	seis euros con cincuenta céntimos
4.4	u Preparación exposición TFG	818,76	ochocientos dieciocho euros con setenta y seis céntimos
5 <u>Administración</u>			
5.1	h Secretaría	25,42	veinticinco euros con cuarenta y dos céntimos

7. Cuadro de Precios Descompuestos

n°	ud	denominación		precio		total
		código	amortización	cantidad		
1		PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y CONOCIMIENTO DEL ESTADO DEL ARTE				
1.1	h	Reunión para la planificación del TFG				
		MO.IBJ		2 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 24,77 €
		MO.IIS		2 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h 44,04 €
precio total por h:						68,81 €
1.2	h	Revisión de la bibliografía sobre uso de la fotónica en biosensores				
		MO.IBJ		100 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 1.238,44 €
precio total por h:						1.238,44 €
1.3	u	Instalación de software				
		MO.IBJ		10 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 123,84 €
		MO.IIS		1 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h 22,02 €
		MES. Lab	6/48	1 u	Licencia Labview Profesional	6.005,00 €/u 750,63 €
		MES. Mat	7/48	1 u	Licencia Matlab	2.000,00 €/u 291,67 €
		MES. Off	--	1 u	Licencia Suite Office 365	99,00 €/u 14,44 €
		MES. Ord	7/48	1 u	Acer Aspire E15 - Ordenador Portátil de 15,6 " HD (Intel Core i5-7200U, 8 GB RAM, 1 TB HDD, Nvidia GT 940MX 2 GB, Windows 10)	599,00 €/u 87,35 €
precio total por u:						1.289,95 €
2		MODELO DE SIMULACIÓN POR ORDENADOR				
2.1	h	Estudio del algoritmo				
		MO.IBJ		5 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 61,92 €
		MO.IIS		1 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h 22,02 €
precio total por h:						83,94 €
2.2	h	Simulaciones				
		MO.IBJ		50 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 619,22 €
		MO.IIS		5 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h 110,11 €
precio total por h:						729,33 €
2.3	h	Comparativa de magnitudes				
		MO.IBJ		20 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h 247,69 €
		MO.IIS		2 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h 44,04 €
precio total por h:						291,73 €
3		MONTAJE DE LA MESA DE LABORATORIO				
3.1	u	Instalación de componentes				

nº	ud	denominación				total		
		código	amortización	cantidad		precio		
		MO.IBJ		3 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	37,15 €	
		MO.IIS		2 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h	44,04 €	
		MES.Las	3/60	1 u	Keysight Technology Modelo: 81949A Compact Tunable Laser Source	35.375,00 €/u	1.768,75 €	
		MES. Len	3/60	1 u	Lensed Fiber	100,00 €/u	5,00 €	
		MES. Con	3/60	1 u	Controlador manual de polarización. Thorlabs	186,00 €/u	9,30 €	
		MES. Chu	3/60	1 u	Chuck. HFC007. Thorlabs	69,50 €/u	3,48 €	
		MES. Rot	3/60	1 u	Rotatable Fiber Mount	65,25 €/u	3,26 €	
		MES. Cam	3/60	1 u	Cámara Xenics. Xeva-FPA-1.7	18.000,00 €/u	900,00 €	
		MES. Fil	3/60	1 u	Filtro de polarización. LPUV050. Thorlabs	244,00 €/u	12,20 €	
		MES. Ben	3/60	1 u	Beamsplitter. Thorlabs	170,00 €/u	8,50 €	
		MES. Pla	3/60	1 u	Plataforma. 3-Axis MicroBlock™ Compact Flexure Stages. Thorlabs	995,00 €/u	49,75 €	
		MES. Mes	3/60	1 u	Mesa Newport™ RS2000 Precision Tuned Damped Research Optical	3.000,00 €/u	150,00 €	
		MES. Car	3/60	1 u	Laser Viewing Cards. VRC2 - VIS/IR Detector Card, 400 - 640 nm, 800 - 1700 nm. Thorlabs	73,25 €/u	3,66 €	
		MES. Bom	3/60	1 u	Bomba. 540060/540060-HP Single Syringe. TSE	800,00 €/u	40,00 €	
					precio total por u:		3.035,10 €	
3.2	h	Toma de mediciones						
		MO.IBJ		50 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	619,22 €	
		MO.IIS		3 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h	66,06 €	
		MES. Fib	--	1 u	Fibra de cristal fotónico. Tipo solid	800,00 €/u	800,00 €	
					precio total por h:		1.485,28 €	
3.3	h	Discusión de resultados						
		MO.IBJ		3 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	37,15 €	
		MO.IIS		3 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h	66,06 €	
					precio total por h:		103,22 €	
4		REDACCIÓN DEL TFG Y SU EXPOSICIÓN						
4.1	h	Elaboración de los documentos del TFG						
		MO.IBJ		125 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	1.548,05 €	
					precio total por :		1.548,05 €	
4.2	h	Revisión y mejora de los documentos						
		MO.IBJ		35 h	Ingeniero biomédico junior	12,38 €/h	433,45 €	
		MO.IIS		3 h	Ingeniero industrial superior (tutor)	22,02 €/h	66,06 €	
					precio total por h:		818,76 €	
4.3	h	Impresión TFG						

nº	ud	denominación		total
		código	amortización cantidad	precio
		MES. Imp	-- 70 u	Impresión TFG 0,05 €/u 3,50 €
		MES. Enc	-- 1 u	Encuadernación 3,00 €/u 3,00 €
				precio total por u: 6,50 €
4.4	h	Preparación exposición TFG		
		MO.IBJ	24 h	Ingeniero biomédico junior 12,38 €/h 297,23 €
		MO.IIS	1 h	Ingeniero industrial superior (tutor) 22,02 €/h 22,02 €
				precio total por h: 818,76 €
5		ADMINISTRACIÓN		
5.1	h	Secretaría		
		MO.IBJ	1 h	Ingeniero biomédico junior 12,38 €/h 12,38 €
		MO.ADM	1 h	Administrativo (dpto.) 13,04 €/h 13,04 €
				precio total por h: 25,42 €

8. Presupuesto de ejecución de obra

Capítulo		Importe
Capítulo 1	PLANIFICACIÓN DEL PROYECTO Y CONOCIMIENTO DEL ESTADO DEL ARTE	2.597,20 €
Capítulo 2	MODELO DE SIMULACIÓN POR ORDENADOR	1.105,00 €
Capítulo 3	MONTAJE DE LA MESA DE LABORATORIO	4.623,60 €
Capítulo 4	REDACCIÓN DEL TFG Y SU EXPOSICIÓN	3.192,07 €
Capítulo 5	ADMINISTRACIÓN	25,42 €
<i>Presupuesto de ejecución material</i>		11.543,28 €
<i>Gastos generales (13%)</i>		1.500,63 €
<i>Beneficio industrial (6%)</i>		692,60 €
<i>SUMA</i>		13.736,51 €
<i>IVA (21%)</i>		2.884,67 €
<i>Presupuesto de ejecución de contrata</i>		16.621,17 €

El presupuesto de ejecución por contrata asciende a la cantidad de **diez y seis mil seiscientos veintiún euros con diecisiete céntimos**.