



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**DESARROLLO DE SENSORES EN FIBRA DE
CRISTAL FOTÓNICO PARA DETECCIÓN DE GASES
Y TEMPERATURA**

Aitor López Aldaba

Directores: Ana Margarida Rodrigues Pinto

Sergio Rota Rodrigo

Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 12 de Noviembre de 2014



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación:

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**DESARROLLO DE SENSORES EN FIBRA DE
CRISTAL FOTÓNICO PARA DETECCIÓN DE GASES
Y TEMPERATURA**

Aitor López Aldaba

Directores: Ana Margarida Rodrigues Pinto
Sergio Rota Rodrigo

Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 12 de Noviembre³ de 2014

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al CICYT TEC2013-47264-C2-2-R y a los fondos FEDER, así como al Proyecto “ECOAL-MGT: Gestión ecológica de pilas de residuos de carbón en combustión” perteneciente al Programa de Cooperación Territorial, Espacio Sudoeste Europeo 2007-2013 la financiación recibida.

Muchas han sido las personas que con su apoyo, paciencia y motivación han hecho posible el desarrollo de la carrera y de éste proyecto final de carrera.

En primer lugar a Manuel López-Amo, por su confianza, paciencia y ánimos. Por compartir todo ese conocimiento para dar respuestas a preguntas que no eran sencillas de responder.

En segundo lugar, y no por ello menos importante, a mis dos directores. A Ana Margarida por introducirme en el mundo de las fibras de cristal fotónico y su manipulación. Gracias por la paciencia y ánimos que me dabas en aquellas tardes solitarias en el laboratorio y por las oportunidades brindadas. A Sergio por los ánimos en los momentos más difíciles del proyecto, cuando ninguna de las opciones daba resultados. Gracias por enseñarme a no rendirme y a buscar siempre una alternativa más así como por sus consejos en situaciones a las que nunca me había enfrentado.

A todo el grupo de investigación y compañeros de laboratorio, por integrarme desde el primer día y estar siempre dispuestos a ayudar y enseñarme.

Agradecer a mis compañeros y amigos el haberme acompañado todo este tiempo, tanto en los buenos momentos, que han sido muchos, como en los malos, que no fueron pocos. Hicieron bien su trabajo, ya que de los últimos cada vez me acuerdo menos.

Agradecer a mi familia en general y a mi madre, a Iñaki y a mi abuela en particular, sobre todo por aguantarme día a día. Por todo el esfuerzo realizado durante estos años. Por último, gracias a Verónica por el cambio que supuso en todos los ámbitos de mi vida. Seguro que sin su apoyo no estaría ahora escribiendo este proyecto.

A mi padre, que siempre ha estado presente ayudándome a avanzar.

Muchas gracias a todos

Aitor

Contenido

Introducción	6
I FUNDAMENTOS TEÓRICOS	7
I.1 Introducción.....	7
I.2 Fibra óptica y su aplicación como sensor.	7
I.2.1 Birrefringencia y campo evanescente.	11
I.2.2 Fibras de cristal fotónico (photonic cristal fibers, PCFs).	14
I.2.3 Sensores de fibra óptica.	19
I.3 Gases y sus propiedades. Medida de gases con fibra óptica.	26
I.4 Técnicas de fusión de fibras.	33
I.5 Teoría de concentración de tensiones.	36
I.6 Proyecto ECOAL-MGT	38
Referencias	40
II. SENSOR DE TEMPERATURA. CAVIDAD FABRY-PEROT BASADO EN FIBRA MICROESTRUCTURADA DE NÚCLEO SUSPENDIDO.	43
II.1 Caracterización numérica de la fibra.....	45
II.2 Fusión de las fibras	48
II.3 Construcción del dispositivo sensor	55
II.4 Configuración y estructuras de medida	58
II.5 Resultados	60
a) Respuesta a la temperatura:	62
b) Respuesta con la polarización:	63
c) Respuesta en el tiempo:	64
II.6 Conclusiones.....	66
Referencias	68

III. SENSOR DE TENSION BASADO EN FIBRA MICROESTRUCTURADA DE NÚCLEO SUSPENDIDO.	69
III.1 Micro-posicionador Ealing 61-0329	69
III.2 Construcción del dispositivo sensor	72
III.3 Resultados	73
III.4 Conclusiones	79
IV. DESARROLLO DE UN SENSOR DE GAS BASADO EN FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO.	80
IV.1 Características de las fibras OSF	83
IV.2 Material específico	89
IV.2.1 Cámara de gas	89
IV.2.2 Panel de control gases.....	91
IV.2.3 Decapante químico	92
IV.3 Construcción del sensor	93
IV.3.1 Preparación de la fibra	93
IV.3.2 Posicionado de la fibra en la fusionadora	99
IV.3.3 Alineado de fibras.....	103
IV.3.4 Programa de fusión	105
IV.3.5 Resultados de la fusión	108
IV.4 Resultados	119
IV.5 <i>Hollow Core PCF</i>	133
IV.6 Conclusiones y líneas futuras	139
Referencias.	142
V. RESUMEN Y CONCLUSIONES	144
Materiales Utilizados	146
Estudio económico	167
Anexo 1. Problemas modificaciones realizadas a la cámara de gas.....	171

Introducción

Los sensores electromecánicos han sido durante décadas los transductores estándar para medir fenómenos físicos y mecánicos. Sin embargo estos sensores están limitados por las pérdidas en transmisión y la sensibilidad a las interferencias electromagnéticas, lo cual hace que su uso sea poco recomendable en ciertas aplicaciones. Una solución a estos problemas es la utilización de sensores de fibra óptica, ya que son inmunes a interferencias electromagnéticas, químicamente inertes, generalmente pasivos, ligeros, y cada vez tienen un menor coste.

El proyecto final de carrera, englobado dentro del proyecto europeo *Ecoal-Mgt Gestión ecológica de pilas de residuos de carbón en combustión, programa SUDOE*, tiene como objetivo el desarrollo experimental, caracterización, medida y optimización de sensores de fibra de cristal fotónico para medir temperatura y gases. Las fibras de cristal fotónico suponen una nueva oportunidad de estudio en el sensado de gases y líquidos, debido a su excepcional estructura formada por huecos. Éstos huecos permiten a un fluido circular con libertad a lo largo de la fibra, lo cual modifica sus propiedades, además de permitir usar el campo evanescente para detectar y cuantificar la presencia de gas.

Todo lo comentado anteriormente son las bases de este proyecto final de carrera, el cual se divide en dos etapas diferenciadas tanto por los materiales utilizados como por sus objetivos.

La primera parte se basa en el desarrollo experimental y optimización de un sensor de temperatura y de un sensor de tensión basados en fibras de cristal fotónico.

La segunda parte consta de un estudio en detalle de tres fibras de cristal fotónico teóricamente aptas para su uso como sensor de gas. En este apartado se estudian las técnicas óptimas de manipulación y fusión de la fibra así como los resultados, sus causas y posibles alternativas.

Finalmente se muestran las principales características del material utilizado y se realiza un estudio económico del proyecto final de carrera.

I FUNDAMENTOS TEÓRICOS

I.1 Introducción.

En este capítulo se describe brevemente la propagación de la luz por la fibra óptica, las fibras de cristal fotónico y su uso como sensores. Además se detalla de manera breve los distintos gases a estudiar y sus principales características tanto físicas como ópticas. También se realiza un ligero repaso del estado del arte de las técnicas de fusión de fibras así como una breve introducción al fenómeno de los puntos de concentración de tensiones que influyen trascendentemente en la resistencia de las fusiones, así como un resumen de la aportación de éste proyecto al proyecto ECOAL-MGT.

I.2 Fibra óptica y su aplicación como sensor.

La fibra óptica (convencional, SMF, MMF...) es, en esencia, una guíaonda cilíndrica en la que su estructura básica se caracteriza por estar formada normalmente por un núcleo sólido de sílice dopado, rodeado por una cubierta de sílice puro de forma que se asegura que el índice de refracción del núcleo es mayor que el de la cubierta. De esta forma se consigue que la luz incidente se propague de forma guiada a través del núcleo sin escapar por la cubierta. Esta propagación puede describirse por la conocida teoría de rayos, a partir de una serie de rayos de luz (equivalentes a los modos de propagación) que sufren sucesivas reflexiones, al atravesar la fibra óptica, al incidir sobre la superficie de separación del núcleo y la cubierta.

En función del número de modos guiados por una fibra, éstas se clasifican en fibras monomodo (un único modo de guiado) y multimodo (dos o más modos de guiado). Las principales fibras en función de la forma del núcleo y del número de modos guiados se muestran en la Figura 1.

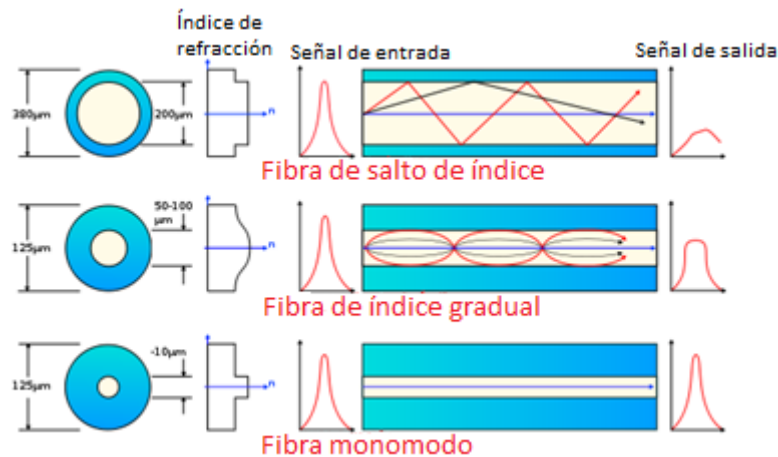


Figura 0 - Propagación de la luz en función del tipo de fibra y la forma del núcleo.

El fenómeno de propagación de la luz por la fibra óptica de salto de índice se puede explicar mediante la *Ley de Snell*, cuando un haz de luz incide sobre una superficie que separa dos medios con diferente índice de refracción parte de esta luz se refleja y parte se refracta.

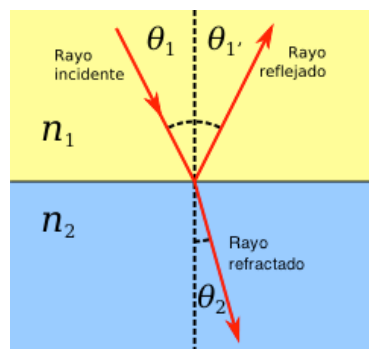


Figura 1 – Representación esquemática de la ley de Snell

Según esta ley, dado un haz de luz con un ángulo de incidencia θ_1 que cambia de un medio con índice de refracción n_1 a otro de índice n_2 , el ángulo de refracción viene dado por la siguiente ecuación:

$$n_1 \text{sen}(\theta_1) = n_2 \text{sen}(\theta_2)$$

Por lo tanto si $n_1 > n_2$ se tiene que el ángulo reflejado, θ_2 , es mayor que el incidente. Va a existir un ángulo de incidencia a partir del cual θ_2 alcanza un ángulo mayor o igual a $\pi/2$, a partir del cual toda la luz se refleja hacia el medio original. Este fenómeno se denomina reflexión total interna (TIR) y es el principio de guiado de la luz por el núcleo de la fibra. El ángulo a partir del que se produce este fenómeno se denomina ángulo crítico y viene determinado por:

$$\theta_c = \arcsen \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Existe otra teoría que explica el comportamiento de la luz guiada en el interior de la fibra conocida como teoría de ondas o teoría de campos. Es menos utilizada que la teoría de rayos, dada su complejidad matemática, pero razona fenómenos para los cuales la teoría de rayos no es válida. Ésta teoría parte de aplicar una teoría electromagnética rigurosa, y los planteamientos son diferentes.

Para que la luz se guíe se requiere, además de lo planteado por la teoría de rayos, que la luz forme en el interior de la guíaonda una distribución de campo cuya componente transversal sea estacionaria. Se llama modo a cada una de las distintas formas en que puede conseguirse tal condición. Su expresión matemática se obtiene resolviendo las ecuaciones de Maxwell correspondientes, con las condiciones de contorno dictadas por el confinamiento cilíndrico a que se ve sometida la radiación en una guíaonda circular como es la fibra óptica.

El cálculo exacto de la distribución de modos en guíaondas circulares es bastante complicado, a causa del confinamiento existente en dos direcciones ortogonales. Los modos que se originan por esta circunstancia difieren bastante de los simples TE y TM que surgen en guíaondas planas (confinadas en una sola dirección), y su tratamiento exhaustivo resulta muy laborioso.

Existe una aproximación (modos débilmente guiados o weakly-guided modes, WGM) que simplifica de forma notable el cálculo y que se puede aplicar en todos los casos de interés. La teoría de ondas da como resultado la existencia de numerosos tipos de modos coexistentes en el interior de la fibra, de los cuales nos centramos en los modos guiados y los modos de cubierta, que son los que conciernen directamente el trabajo realizado.

Los modos guiados presentan una componente E_z o H_z nula, es decir, son transversales eléctricos (TE) o magnéticos (TM). En la Figura 3 se muestra la distribución de campo de los cuatro primeros modos TE en una guíaonda plana simétrica. El campo tiene una variación armónica en el interior del núcleo, y además no está estrictamente confinado al mismo, si no que aparece una componente residual en la cubierta, llamada campo evanescente, que se atenúa exponencialmente con la distancia.

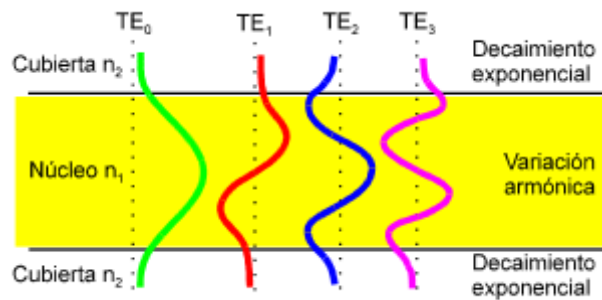


Figura 3. Modos en una guíaonda plana simétrica.

La cubierta no tiene espesor infinito. Si el campo evanescente no se ha hecho nulo (en realidad despreciable) cuando se alcanza la parte externa de la cubierta, el salto de índice de ésta puede llegar a ser condición de contorno, y aparecen modos que se propagan por la cubierta. Éste fenómeno se da tanto en guíaondas planas como en fibras.

El problema surge porque ni los modos de núcleo ni los de cubierta están estrictamente confinados “a su terreno”, por lo que puede surgir un acoplamiento entre ellos que generalmente se traduce en una pérdida de potencia de los modos guiados en el núcleo, en especial los de orden más alto.

Los dos mecanismos que limitan las prestaciones de la fibra óptica como medio de transmisión son la atenuación (pérdida de potencia de la señal) y la dispersión, fenómeno que provoca el ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos por la fibra y como consecuencia limita la velocidad de transmisión digital que puede soportar para evitar la ISI (interferencia inter-simbólica).

Se distinguen dos tipos de dispersión:

- *Dispersión intermodal* se produce únicamente en fibras multimodo y está originada debido a que los diferentes modos de propagación tardan tiempos diferentes en propagarse a través de la fibra, ya que, pese a propagarse con la misma velocidad, cada uno de ellos sigue un camino de diferente longitud. De forma que a la salida se obtiene el pulso de entrada ensanchado temporalmente.
- *Dispersión intramodal o cromática* es importante en fibras monomodo. Se produce debido al que existe un retardo de propagación a través de la fibra dependiente de la frecuencia.

Con la aparición de los primeros sistemas coherentes se detectó un nuevo problema derivado de la naturaleza peculiar del modo fundamental de la fibra monomodo. La geometría cilíndrica de la fibra permite la existencia de dos estados de polarización en el modo fundamental lo que tiene asociado el fenómeno de la birrefringencia [1].

I.2.1 Birrefringencia y campo evanescente.

Dos de los fenómenos más importantes que se dan lugar en la fibra óptica y que afectan de forma directa el desarrollo del proyecto son la birrefringencia y el campo evanescente.

Como consecuencia de que las dos polarizaciones posibles para el modo fundamental (LP_{01}) poseen la misma constante de propagación cuando el medio es isótropo, es decir, en condiciones ideales para las que se supone un núcleo idealmente cilíndrico. Se dice entonces que LP_{01}^x y LP_{01}^y son degenerados ya que sus constantes de propagación son las mismas ($\beta_{01}^x = \beta_{01}^y = \beta$).

En condiciones reales (medio anisótropo), la fibra óptica presenta variaciones en la uniformidad y forma del núcleo a lo largo de su longitud, además sufren tensiones de tipo estructural y mecánico durante la instalación que rompen la circularidad del núcleo. Para este caso, las constantes de propagación para las dos polarizaciones posibles del modo fundamental son diferentes, $\beta_{01}^x \neq \beta_{01}^y$. A este efecto se le denomina *birrefringencia de la fibra*. Esta se define como la diferencia entre los valores de los índices modales correspondientes a ambas constantes de propagación y viene dada por:

$$B = \left| \overline{n_{01}^x} - \overline{n_{01}^y} \right|$$

Debido a la birrefringencia, la fibra no mantiene el estado de polarización de la señal que se le inyecta, sino que se produce un intercambio periódico de energía entre ambos estados de polarización. Esto se debe a que los índices modales son diferentes, una polarización se retarda con respecto a la otra a lo largo de la propagación de la señal a través de la fibra, por lo tanto se distinguen un eje rápido y un eje lento de propagación de la luz. El valor típico para la birrefringencia en fibras ópticas estándar es del orden de 10^{-5} - 10^{-6} .

En la Figura 4 se muestra el ejemplo cuando se inyecta una señal cuya polarización es lineal y forma 45° con los ejes x e y. Ésta irá cambiando sucesivamente su estado de polarización a circular a derechas, lineal -45°, circular a izquierda y vuelve al estado inicial como consecuencia del retardo.

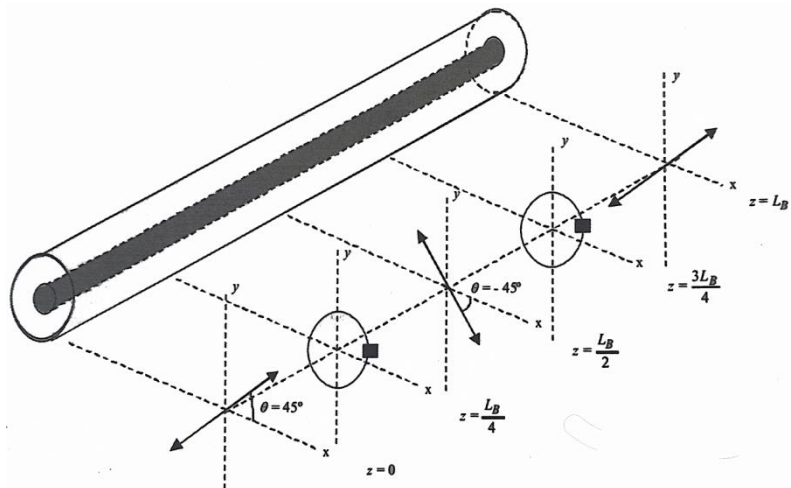


Figura 4 - Evolución del estado de polarización de una señal inyectada a una fibra birrefringente formando un ángulo de entrada de 45° con los ejes x e y.

La longitud que define el periodo de variación del estado de polarización se denomina longitud de batido (*beat length*) y queda determinada por:

$$L_B = \frac{\lambda}{B}$$

Cabe destacar que, si la luz es inyectada a la fibra con polarización lineal según el eje x o y, no variará su estado de polarización a diferencia de lo que ocurre con el resto de los estados de polarización.

Realmente, la birrefringencia de una fibra óptica no se mantiene constante como tampoco lo hacen las direcciones de los ejes x e y, sino que cambian de forma aleatoria debido a las fluctuaciones en la forma del núcleo. Como consecuencia, en la práctica, la luz inyectada alcanza rápidamente un estado de polarización arbitrario. Este efecto, es intrascendente en sistemas de detección directa, en los cuales el receptor detecta toda la intensidad óptica que recae sobre él. Pero para el caso de detección coherente es muy importante debido a que el

estado de polarización del oscilador local que posee el receptor ha de coincidir con el de la luz a la salida de la fibra [1].

Otro de los fenómenos presentes en las fibras ópticas, como se ha comentado con anterioridad es el campo evanescente.

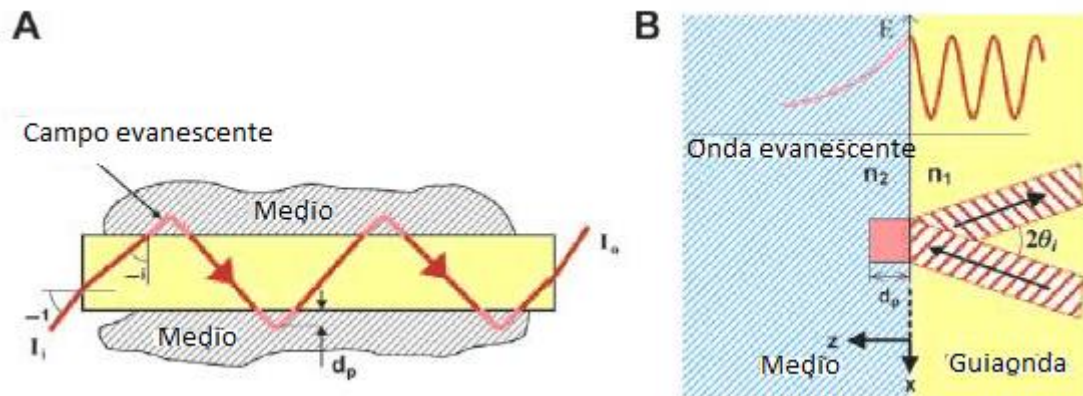


Figura 5. Campo evanescente en una guíaonda plana.

La Figura 5 muestra un ejemplo del campo evanescente en una guíaonda plana desde el punto de vista de la teoría de rayos. Desde ésta aproximación no es posible dar explicación a la reflexión del rayo que se produce en el medio circundante, por lo que es necesario recurrir a la teoría de campos para dar explicación al fenómeno del campo evanescente.

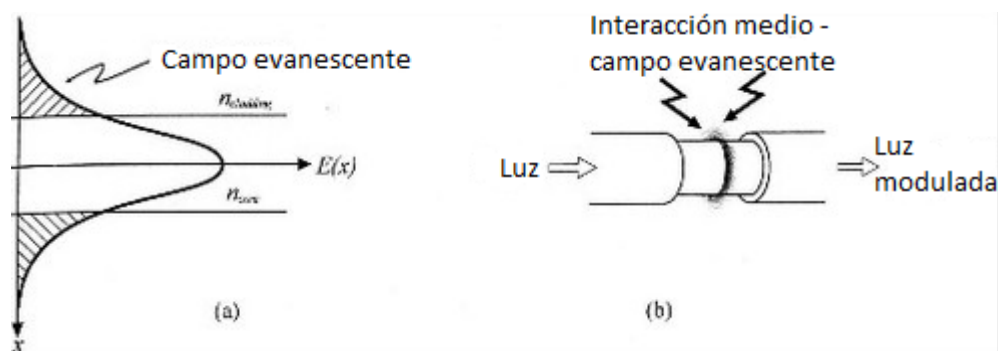


Figura 6: a) campo evanescente en una fibra óptica; b) principio de interacción con el medio.

En la Figura 6 se muestra un esquema del campo evanescente perteneciente al modo fundamental al ser guiado por el núcleo de la fibra óptica. Como se observa en la Figura 6 a), la distribución de potencia del modo fundamental toma forma gaussiana. Las colas laterales de ésta distribución de potencia, que salen del núcleo de la fibra forman el campo evanescente.

En la Figura 6 b) se observa un ejemplo de medida a través de éste campo. La interacción de la luz guiada con el medio actúa de modulador de señal, modificando las propiedades de la señal de luz de entrada del sistema.

El principal problema de los sensores basados en este fenómeno, es la baja interacción entre el campo evanescente y el medio que lo rodea debido al decaimiento exponencial de la potencia del campo a medida que aumenta la distancia al núcleo. Por ello, para su utilización se utilizan materiales de cubierta que permitan la penetración de las moléculas circundantes o bien requiere de la modificación de las dimensiones de la fibra para aumentar la efectividad del campo evanescente [2,3,4,5,6,7].

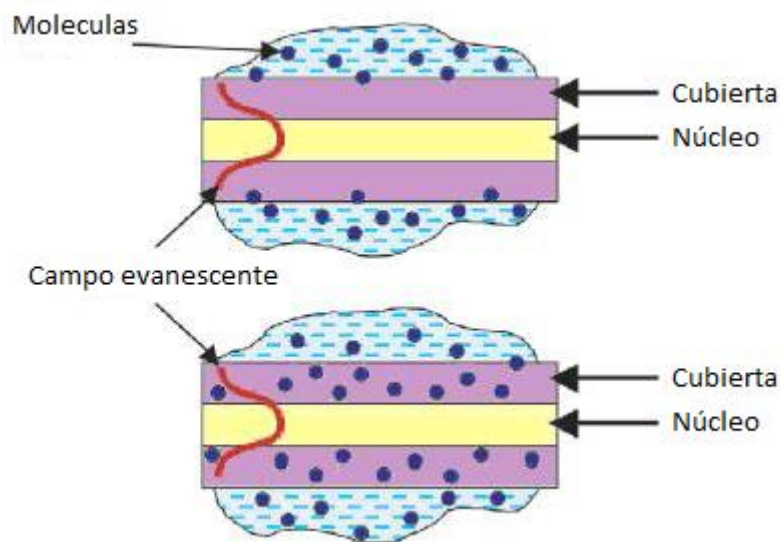


Figura 7. Interacción del campo evanescente con el medio circundante.

1.2.2 Fibras de cristal fotónico (photonic crystal fibers, PCFs).

Aunque las fibras ópticas estándar presentan un comportamiento excelente en el ámbito de las telecomunicaciones, las propiedades intrínsecas de la sílice, selección de los materiales para núcleo y cubierta, geometría, perfil de índice de refracción, dispersión, no linealidades o birrefringencia han supuesto ciertas restricciones en la evolución de ésta tecnología.

La aparición de las fibras de cristal fotónico, por primera vez en 1996, supuso un punto de inflexión en la tecnología basada en fibra óptica.

No solo presentan propiedades sin precedentes si no que superan muchas de las limitaciones existentes en fibras ópticas convencionales.

La geometría de las fibras ópticas convencionales comúnmente comprende un núcleo de sílice dopado rodeado de una cubierta de sílice pura tal y como se observa en la Figura 8 a), haciendo que el índice de refracción del núcleo sea mayor que el de la cubierta. En estas estructuras el único parámetro que se tiene en cuenta en su fabricación es el diámetro del núcleo ρ .

Las fibras de cristal fotónico se caracterizan por una cubierta constituida por una matriz de huecos microestructurados que recorren longitudinalmente toda la fibra y que rodean al núcleo, el cuál puede ser sólido o hueco. Dependiendo de la naturaleza del núcleo se distinguen dos tipos de fibras de cristal fotónico: las fibras de núcleo sólido o las de núcleo hueco.

Las fibras PCF de núcleo sólido presentan un núcleo de sílice rodeado por la matriz de huecos microscópicos tal y como se muestra en la Figura 8 b). Por su parte, las fibras PCF de núcleo hueco presentan un hueco como núcleo, rodeado de la cubierta constituida por la matriz de micro-huecos como se representa en la Figura 8 c).

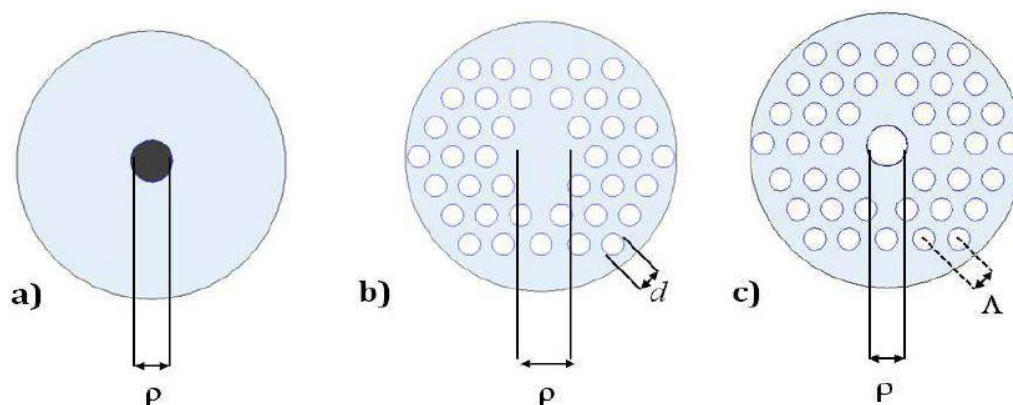


Figura 8. Sección transversal para fibra: a) SMF; b) PCF de núcleo sólido; c) PCF de núcleo hueco.

Durante la fabricación de las fibras PCF existen diferentes parámetros que deben ser controlados:

- El diámetro del núcleo, que viene definido como el diámetro del anillo formado por las cavidades de aire más cercanas al núcleo o, en el caso de las fibras de núcleo hueco, el diámetro de la cavidad central, ρ .
- El diámetro de los huecos de aire de la cubierta, d .
- La distancia entre dos cavidades de aire consecutivas, también llamado *pitch*, Λ .

La elección de estos tres parámetros, junto con la elección del material y el tipo de matriz producen que la fabricación de éstas fibras sea muy flexible, abriendo el abanico de posibilidades de diseño en comparación con las fibras ópticas convencionales.

Guiado en PCFs de núcleo sólido.

Las fibras de cristal fotónico de núcleo sólido presentan la matriz de huecos rodeando a un núcleo sólido. Cuando se utiliza un solo material en la fabricación de la fibra, esta configuración de micro-huecos dota a la cubierta de un índice de refracción efectivo menor que el del núcleo, a pesar de estar constituidos del mismo material.

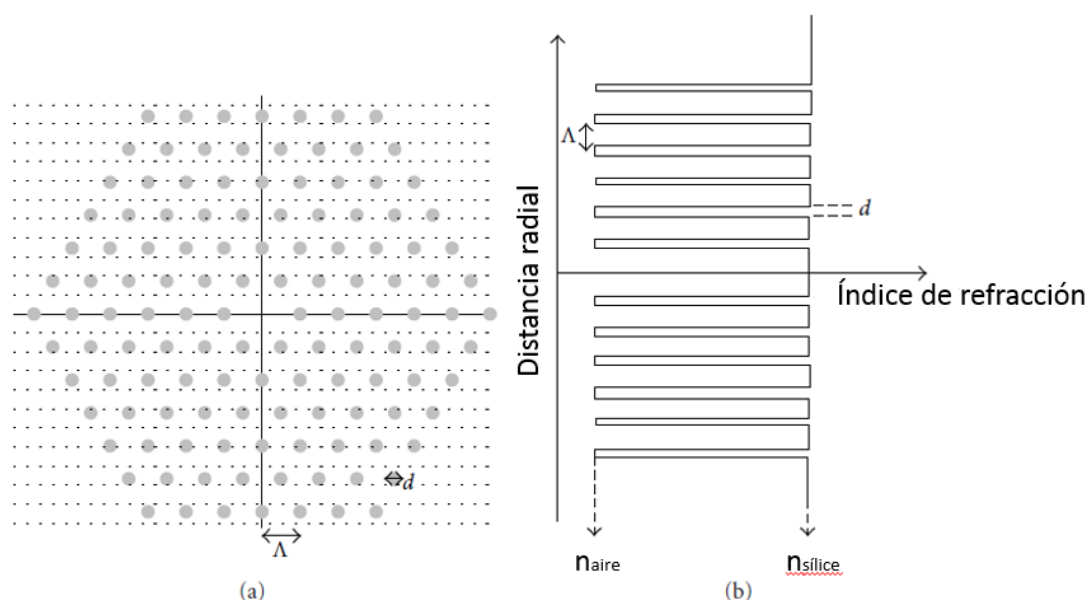


Figura 9. a) Sección de una PCF de núcleo sólido. b) Perfil de índice de refracción.

El índice de refracción de la cubierta varía con la distancia radial, dependiendo de su geometría y material de fabricación. El índice de refracción efectivo de la cubierta disminuye en comparación con el del núcleo, permitiendo el guiado de luz, mecanismo definido como reflexión total interna modificada.

Se aplica éste nombre ya que el fenómeno de reflexión total interna modificado (M-TIR) no se produce por la diferencia de índices de refracción entre núcleo y cubierta debido a la diferencia de materiales utilizados, si no a la distribución de los micro-huecos inscritos en la cubierta. La principal ventaja de éste tipo de fibras radica en la fabricación con un solo material, evitando la utilización de materiales dopantes.

Guiado en PCFs de núcleo hueco.

Las fibras que presentan una diferencia de índices de refracción entre núcleo y cubierta negativos (índice de refracción de la cubierta mayor que la del núcleo) no pueden guiar luz a través del fenómeno TIR. Sin embargo, un diseño apropiado de la matriz de huecos de la cubierta puede evitar la fuga de luz de la fibra. Por tanto, es posible guiar luz en un núcleo hueco rodeado de una matriz de cristal.

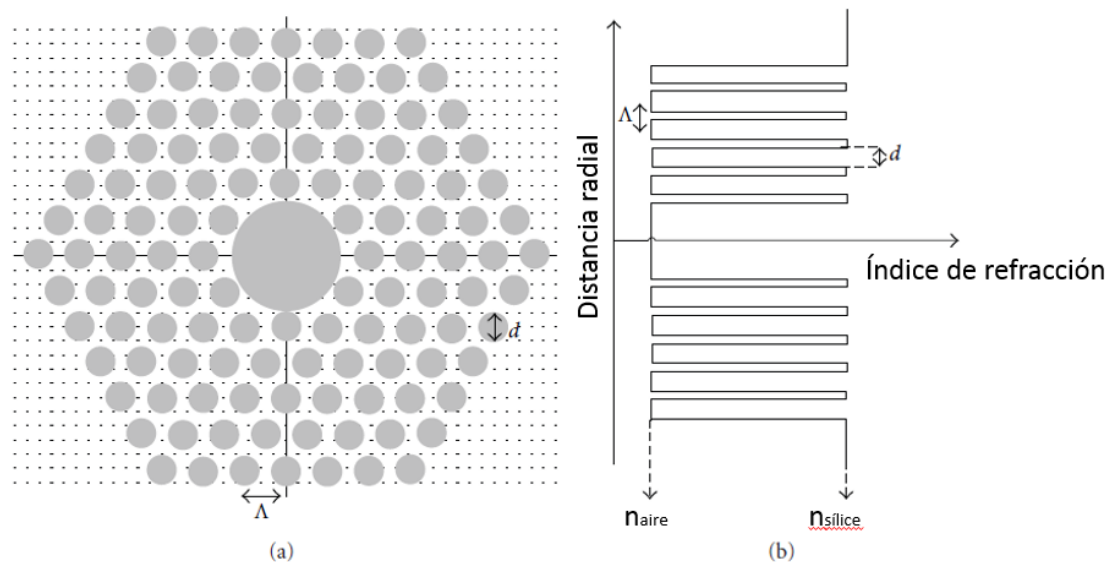


Figura 10. a) Sección de una PCF de núcleo hueco. b) Perfil de índice de refracción.

Bajo estas circunstancias, el guiado es solamente posible si existe un salto de energía o *bandgap*. El guiado de la luz en este caso es análogo a lo que ocurre en el mecanismo conocido

en física de estado sólido como el mecanismo de conducción del electrón en materiales con estructura de bandas de energía. La matriz de huecos distribuidos periódicamente puede formar una estructura de cristal 2D con una matriz constante similar a la longitud de onda de la luz. En cristales 2D, el *bandgap* fotónico evita la propagación de luz en unas longitudes determinadas. Si la periodicidad de la estructura se rompe debido a un defecto, se crea una región especial con diferentes propiedades ópticas. La región defecto puede propagar modos con frecuencias que coincidan con el *bandgap*, pero como alrededor de éste defecto se encuentra el *bandgap* fotónico, la luz dentro del defecto se mantiene confinada en las vecindades del defecto.

Los modos que caen fuera del defecto son refractados, mientras que los modos que caen en el interior del defecto son fuertemente confinados y guiados a lo largo de la fibra. Éste fenómeno puede verse en la Figura 11, suponiendo que la fibra de núcleo hueco trabaja en el rango del espectro electromagnético del rojo visible.

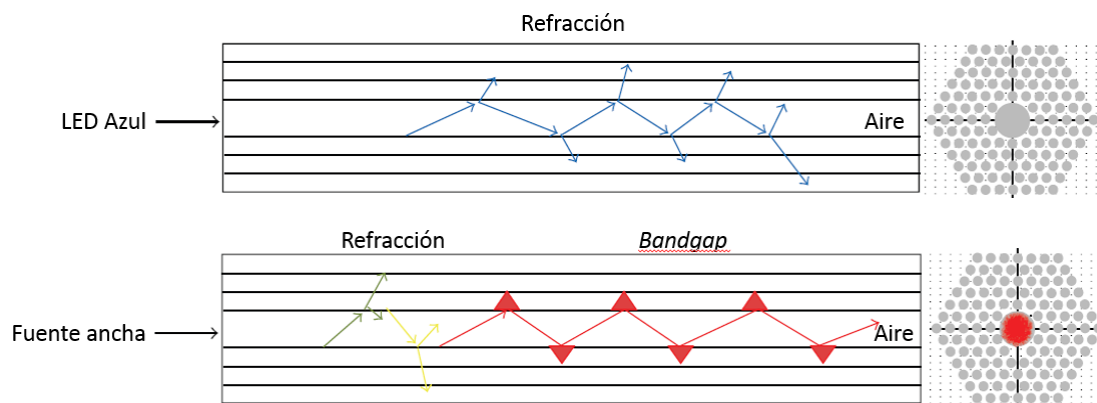


Figura 11. Guiado de una fibra PCF de núcleo hueco.

Cuando se introduce luz de longitud de onda correspondiente al azul visible, toda la luz es refractada y no se guía luz a través de la fibra, por lo que no aparece luz al final de la fibra. En el segundo caso, cuando se introduce luz blanca (comprendiendo multitud de longitudes de onda) en el espectro visible, la componente correspondiente a la luz roja se guía a través de la fibra, apareciendo al final de la fibra, mientras que las demás componentes (como por ejemplo la componente verde o amarilla) son refractadas y no guiadas [8].

Propiedades y aplicaciones.

Las fibras PCF presentan una gran variedad de novedades y mejoras con respecto a las fibras convencionales. Además, las PCF de núcleo sólido presentan características que no tienen las PCF de núcleo hueco como por ejemplo un comportamiento monomodo en cualquier región, una gran área de distribución del modo, alta birrefringencia o alta sensibilidad a la temperatura [8].

I.2.3 Sensores de fibra óptica.

Un sensor de fibra óptica [9] es un dispositivo en el que una señal óptica es modulada en respuesta a un parámetro físico, químico, biológico, etc. De manera que dicho parámetro puede ser recuperado estudiando la señal óptica.

El principio básico consiste en que la luz proveniente de un láser es enviada a través de una fibra óptica donde interactúa con el elemento a medir y experimenta cambios en uno o varios parámetros (intensidad, fase, longitud de onda o polarización), alcanzando el detector que medirá estas variaciones.

La Tabla muestra una clasificación genérica de los sensores de fibra óptica en función de diferentes criterios: el primero en función de la magnitud a medir, el segundo de acuerdo con la distribución espacial de la medición, el tercero en función de la naturaleza de transducción y finalmente conforme al tipo de modulación utilizada.

SENSORES DE FIBRA ÓPTICA			
Magnitud a medir	Distribución espacial de la medición	Mecanismo de transducción	Modulación de la luz

Mecánico	Puntual	Intrínseco	Intensidad (amplitud)
Térmico	Distribuida	Extrínseco	Interferométrico (fase)
Electromagnético	Cuasi-distribuida		Polarimétrico (polarización)
Flujo, turbulencia			Espectroscopía (longitud de onda)
Químico			
Radiación			
Biomédico			
Nivel de líquido			

Tabla 1 - Clasificación general de los sensores de fibra óptica.

El creciente interés en los sensores de fibra óptica radica en el hecho de que presentan numerosas ventajas en comparación con los sensores convencionales [10]. Algunas de ellas se citan a continuación [11]:

- Son inmunes a campos electromagnéticos por lo que pueden operar en ambientes que presenten campos eléctricos elevados y variables.
- Debido a diferentes efectos en la fibra es posible realizar detección distribuida de temperatura y deformación.
- Permiten la interrogación remota. Esto se debe a que la baja atenuación de la fibra óptica permite operar en transmisiones de larga distancia, por lo que el sensor puede estar situado a decenas, incluso cientos de kilómetros de la estación de monitorización.
- Debido al material del que están fabricados, Sílice, son químicamente inertes y, por lo tanto, son resistentes a la mayoría de agentes químicos y biológicos.
- Pueden ser de pequeño tamaño y poco peso, esto puede ser beneficioso en campos como la biomedicina.
- Una de las características más importantes es la capacidad de multiplexación, es una de las claves fundamentales para muchas aplicaciones.

Aunque se ha visto que poseen numerosas ventajas, también presentan algunas desventajas, entre ellas se encuentra [1]:

- Algunos sensores de fibra óptica presentan sensibilidad cruzada.
- Su precio es mayor, en la mayoría de los casos, que los sensores tradicionales.
- La fibra óptica es frágil, por lo tanto hay que protegerla adecuadamente para no estropearla [12].

Sensores interferométricos.

La interferencia, al igual que la difracción, es un fenómeno óptico fundamental que tiene como origen la naturaleza ondulatoria de la luz. Este fenómeno consistente en que dos o más ondas se superponen para componer una nueva onda. La interferencia es uno de los fenómenos más característicos de las ondas, pudiendo ser constructiva o destructiva. Así, dos ondas de idéntica frecuencia y con amplitudes ligeramente distintas pueden combinarse para dar una única onda con la misma frecuencia pero cuya amplitud es la suma de ambas.

Sin embargo, puede darse el caso de que ambas ondas no se encuentren fase. En este caso la onda resultante correspondería a una onda atenuada. Este fenómeno se denomina interferencia destructiva pudiendo llegar a ser completa, anulándose ambas ondas mutuamente y por lo tanto obteniendo una onda resultante nula.

El interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión las longitudes de onda dicha luz. Existen variedad de tipos de interferómetros, en todos ellos se utilizan dos o más haces de luz que recorren dos o más trayectorias ópticas distintas, determinadas por un sistema de acopladores, espejos en fibra y otros elementos que, finalmente, convergen para formar un patrón de interferencia [1]. Los más comunes son el interferómetro Fabry-Perot, Mach-Zender, Michelson, Fox-Smith, Sagnac y SMS (monomodo-multimodo-monomodo). En este proyecto se va a hacer uso, en particular, de la estructura Fabry-Perot por ello se explica más detalladamente en el siguiente apartado.

Interferómetro Fabry-Perot.

Un interferómetro Fabry-Perot (FP) consiste en dos espejos de reflectancia R_1 y R_2 separados por una cavidad de longitud d , como muestra la Figura 12. Fue descrito por primera vez por Charles Fabry y Albert Perot en 1899.

La luz entrante en la cavidad es reflejada múltiples veces entre los espejos. Cada rayo tiene una diferencia de fase fija con respecto al rayo precedente; esta diferencia de fase corresponde al trayecto extra recorrido en la cavidad. Cuando los múltiples rayos paralelos coinciden en un punto (a través de lentes) se produce la interferencia.

Desde su invención, los interferómetros FP han sido utilizados en masa dada su espectroscopía de alta resolución. Hasta los años 1980 no aparecieron las primeras versiones del interferómetro FP. Poco después, los interferómetros FP fueron aplicados en el ámbito de los

sensores, midiendo parámetros físicos como temperatura, tensión y presión ultrasónica en diversos materiales.

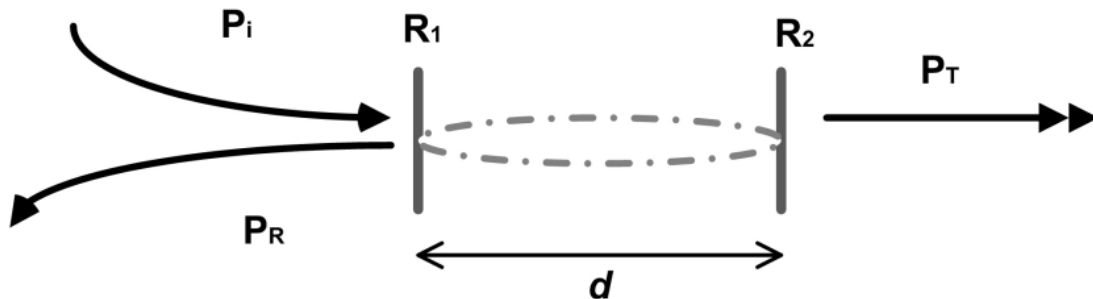


Figura 12. Ilustración esquemática de un interferómetro Fabry-Perot.

Los interferómetros FP son muy sensibles a las perturbaciones inducidas en trayecto óptico entre ambos espejos, de hecho, un corte al final de la fibra puede ser utilizado como espejo ya que se rige por la reflexión de Fresnel (4%) en el interfaz entre la fibra y el aire. Estos sensores pueden ser extremadamente compactos, haciendo de estos tipos de cavidad, dispositivos ideales para multitud de estructuras de dimensiones reducidas, incluyendo aquellas en las que el sensor debe de ser integrado dentro de los materiales. Éstas características hacen de los interferómetros Fabry-Perot versátiles dispositivos para medir temperatura, tensión, índice de refracción e incluso pueden ser utilizados como cavidades láser.

Los espejos que limitan la cavidad Fabry-Perot se pueden caracterizar a través de sus transmitancias T_j y sus reflectancias R_j , donde $j=1,2$ tal que $T_j + R_j = 1$ (sin tener en cuenta la parte de la potencia incidente absorbida o dispersada por el espejo hacia afuera de la cavidad). La transmitancia T_{FP} y reflectancia R_{FP} de la cavidad Fabry-Perot vienen dadas por:

$$R_{FP} = \frac{P_r}{P_i} = \frac{R_1 + R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}$$

$$T_{FP} = \frac{P_t}{P_i} = \frac{T_1 T_2}{1 + R_1 R_2 + 2\sqrt{R_1 R_2} \cos \phi}$$

Donde ϕ es el salto de fase debido al trayecto de ida y vuelta en el interferómetro:

$$\phi = \frac{4\pi nd}{\lambda}$$

Donde n es el índice de refracción de la región entre los espejos y λ la longitud de onda. La transmitancia TFP y la reflectancia RFP del Fabry-Perot son periódicas, dicho periodo se conoce como Free Spectral Range, dado por:

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n \cdot d}$$

Por ejemplo, una cavidad Fabry-Perot con una longitud $d=299\mu\text{m}$ y un índice de refracción de $n=1.46$, trabajando a $\lambda=1540\text{nm}$, presenta un espaciado en longitud de onda de $\Delta\lambda_{FSR} \sim 2.71\text{nm}$; si la longitud de la cavidad es de $d=930\text{nm}$ y el índice de refracción $n=1.46$, trabajando a $\lambda=1540\text{nm}$, el espaciado en longitud de onda es de $\Delta\lambda_{FSR} \sim 0.87\text{nm}$ [8].

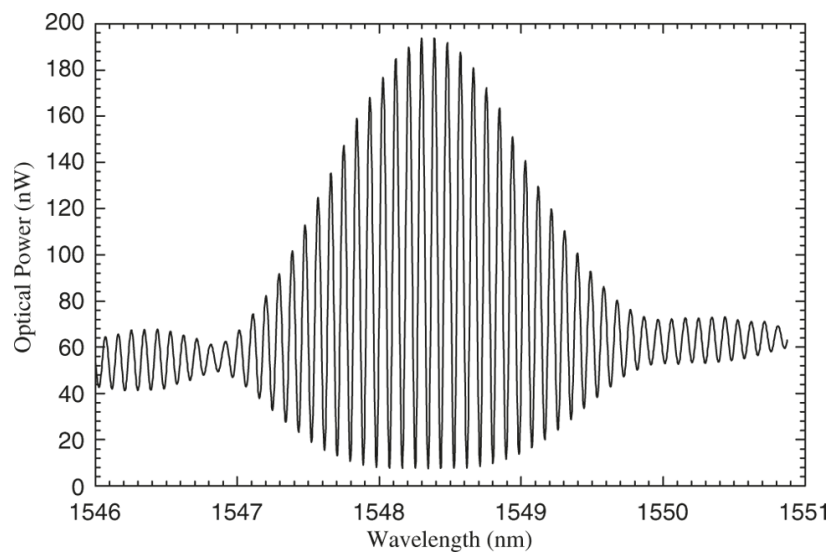


Figura 13. Respuesta típica de un interferómetro Fabry-Perot.

Los resonadores en anillo son un tipo de filtros con características muy similares a éstos filtros Fabry-Perot. Pero, los resonadores en anillo ofrecen la ventaja de que las señales incidente y reflejada son separadas en guías de onda individuales. Las ecuaciones y características de los resonadores en anillo son similares a éstas de los filtros Fabry-Perot pero modificadas por un factor 2 [8].

Los interferómetros Fabry-Perot (FP) son un tipo particular de sensores muy extendidos dada baja sensibilidad cruzada (reacción a fenómenos distintos a los que deseamos medir), tamaño, configuración simple, flexibilidad en rango de sensibilidad y rango dinámico. Un típico

sensor basado en una cavidad Fabry-Perot se construye típicamente fusionando una sección de guíaonda a una fibra óptica estándar, proporcionándole características como bajas pérdidas de inserción y la capacidad de multiplexación. La señal a la salida de la cavidad Fabry-Perot presenta un patrón de interferencia, representado en la Figura 13, que es función de la longitud de la guíaonda y del índice de refracción de la cavidad (tal y como se ha descrito en el apartado anterior) o más precisamente, de los índices de refracción de los diferentes modos presentes en la fibra. Éste tipo de sensor es altamente repetible (capacidad de crear el mismo sensor en laboratorio), alta resolución y gran estabilidad.

Hasta la actualidad se han propuesto multitud de sensores basados en cavidades Fabry-Perot para medidas de temperatura aprovechando el interfaz generado entre una fibra multimodo (MMF) y una fibra monomodo (SMF): fusionando una fibra multimodo de pequeña longitud a una fibra monomodo [13]; fusionando una fibra multimodo de longitud menor a un milímetro entre dos fibras monomodo [14] o incluso utilizando dos cavidades Fabry-Perot en cascada formadas por una fibra multimodo de pequeña longitud y un micro-hueco de aire hecho con fibra *Hollow Core* [15]. Pero aunque estos sensores presentan buenas sensibilidades, dadas entre 15pm/°C hasta 0.8nm/°C, presentan baja reflectividad debido a la pequeña diferencia de índices de refracción en la cavidad. Ésta baja reflectividad produce bajas amplitudes en la interferencia, lo que limita la capacidad del sensor para medir temperatura en situaciones en las cuales el sensor se encuentra lejos de la fuente (monitorización remota).

Para solucionar éstos problemas en la medición de temperatura, se insertan micro-cavidades en las fibras ópticas: con una micro-cavidad ($\sim 4.4\mu\text{m}$) realizada directamente en una fibra estrechada produce un núcleo menor de $10\mu\text{m}$ [16]; mecanizando una micro-cavidad en una SMF y en una MOF (microstructured optical fiber) utilizando el mecanismo de micro-explosiones de un femtosecond laser trabajando en el infrarrojo con pulsos a 1kHz [17]; o mecanizando una micro-cavidad en la interfaz de fusión entre una SMF y una pequeña porción de fibra de Zafiro para obtener una mejor sensibilidad a la temperatura [18]. De todos modos, la fabricación de este tipo de cavidades de alta tecnología requiere procesos económicamente costosos basados en mecanizados láser.

Otra técnica para crear sensores de temperatura, utilizando procesos menos costosos es el desarrollo de estructuras híbridas basadas en fibras microestructuradas (MOFs). Las cavidades híbridas Fabry-Perot compuestas por MOFs son estructuras cada vez más comunes: se ha demostrado una estructura híbrida que utiliza una MOF como fibra de guiado y encadenándola con una fibra *Hollow Core* (de núcleo hueco) y una SMF [19]; al mismo tiempo, se han desarrollado diferentes estructuras que utilizan una fibra SMF fusionada con una pequeña

fibra MOF [20,21,22]; y fusionando una pequeña longitud de fibra de núcleo suspendido (*Suspended Core Fiber*) MOF al final de una SMF se ha creado un sensor de temperatura [23].

I.3 Gases y sus propiedades. Medida de gases con fibra óptica.

Uno de los objetivos del proyecto es la detección de presencia y monitorización de la concentración de determinados gases a través de sensores basados en fibras de cristal fotónico. Los gases a estudiar son amoníaco, dióxido de carbono y metano, y sus propiedades se explican brevemente a continuación.

Amoniaco NH₃:

El amoníaco es un compuesto químico cuya molécula consiste en un átomo de nitrógeno (N) y tres átomos de hidrógeno (H) de acuerdo con la fórmula NH₃.

El amoníaco, a temperatura ambiente, es un gas incoloro de olor muy penetrante y nauseabundo. Se produce naturalmente por descomposición de la materia orgánica y también se fabrica industrialmente. Es fácilmente soluble y se evapora rápidamente. Generalmente se vende en forma líquida.

Entre los principales efectos nocivos para el organismo se encuentran:

- En concentraciones elevadas irrita la garganta, inflama los pulmones, daña las vías respiratorias y los ojos. Según aumenta la concentración puede llegar a producir edema pulmonar.
- El amoníaco puede producir irritación de la piel, sobre todo si la piel se encuentra húmeda. Además, puede llegar a quemar y ampollar la piel al cabo de unos pocos segundos de exposición con concentraciones atmosféricas superiores a 300 ppm.
- Este compuesto es gaseoso en condiciones atmosféricas normales siendo poco probable su ingestión. Sin embargo, en caso de producirse, puede destruir la mucosa gástrica, provocando severas patologías e incluso la muerte.

Las principales propiedades físicas del amoníaco se presentan en la Tabla 2:

Estado de agregación	Gas	Punto de ebullición	239,81 K (-33 °C)
Apariencia	Incoloro. Olor	Punto de	773 K (500 °C)

	penetrante y desagradable.	descomposición	
Densidad	0.73 kg/m^3 ; 0,00073 g/cm^3	Temperatura crítica	405,5 K (132 °C)
Masa molar	17,03 g/mol	Presión crítica	111,52 atm
Punto de fusión	195,42 K (-78 °C)	Índice de refracción	1,355

Tabla 2. Propiedades físicas del amoniaco.

En el espectro electromagnético, el amoniaco presenta multitud de longitudes de onda de absorción en la región de los 1500nm [7].

Los principales problemas en la medición de presencia y porcentaje de amoníaco en aire son el bajo límite de detección (1ppb), su tiempo de respuesta (5 minutos) [24] y la interferencia con bandas de absorción de otros gases también presentes en el aire como son el agua (H_2O) y el dióxido de carbono CO_2 [25,26].

Dióxido de carbono CO_2 :

El dióxido de carbono, también denominado óxido de carbono, gas carbónico y anhídrido carbónico, es un gas cuyas moléculas están compuestas por dos átomos de oxígeno y uno de carbono.

Los efectos ambientales del dióxido de carbono atmosférico generan un creciente interés. Actualmente existe una fuerte controversia sobre el calentamiento global y la relación que el CO_2 tiene con éste. El dióxido de carbono es un importante gas que regula el calentamiento global de la superficie de la Tierra, además de ser la primera fuente de carbono para la vida en la Tierra.

Presenta riesgos contra la salud entre los que destacan:

- En caso de ingestión: puede causar irritación, náuseas, vómitos y hemorragias en el tracto digestivo.
- En caso de inhalación: produce asfixia, causa hiperventilación. La exposición a largo plazo es peligrosa. Asfixiante a grandes concentraciones.
- En contacto con la piel y ojos: en estado líquido puede producir congelación.

Las principales propiedades físicas del dióxido de carbono se presentan en la Tabla 3:

Estado de agregación	Gas	Punto de ebullición	216 K (-57 °C)
Apariencia	Incoloro	Estructura cristalina	Similar al cuarzo
Densidad	1.842 kg/m ³ ; 0,001842 g/cm ³	Viscosidad	0,07 cP a -78 °C
Masa molar	44,01 g/mol	Índice de refracción	1,00045
Punto de fusión	194,7 K (-78 °C)		

Tabla 3. Propiedades físicas del dióxido de carbono.

Presenta líneas de absorción en el espectro electromagnético en torno a los 1570nm, con una línea situada en 1572,3nm de potencia $4.22 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^{-2}/\text{atm}$ [27].

Diversos estudios demuestran la posibilidad de medición de la concentración de gas a través de la interacción directa entre la luz y el medio. En este caso utilizando una célula de gas se estudia la línea de absorción a 1567,3nm detectando concentraciones de como mínimo 50ppm [28] y utilizando una fibra PCF Hollow Core como célula de gas se obtuvieron concentraciones de 300ppm [29].

Metano CH₄:

El metano es el hidrocarburo alcano más sencillo, cuya fórmula química es CH₄.

Cada uno de los átomos de hidrógeno está unido al carbono por medio de un enlace covalente. Es una sustancia no polar que se presenta en forma de gas a temperaturas y presiones ordinarias. Es incoloro, inodoro e insoluble en agua.

En la naturaleza se produce como producto final de la putrefacción anaeróbica de las plantas. Este proceso natural se puede aprovechar para producir biogás. Muchos microorganismos anaeróbicos lo generan utilizando el CO₂ como aceptor final de electrones.

El metano no es tóxico. Su principal peligro para la salud son las quemaduras que puede provocar si entra en ignición. Es altamente inflamable y puede formar mezclas explosivas con el aire. El metano reacciona violentamente con oxidantes, halógenos y algunos compuestos halogenados. El metano también es asfixiante y puede desplazar al oxígeno en un espacio cerrado.

Entre los riesgos directos para la salud cabe destacar:

- En caso de inhalación: asfixia; en algunos casos inconsciencia, ataque cardíaco o lesiones cerebrales.

- En contacto con la piel: el compuesto se transporta como líquido criogénico. Su exposición causará obviamente la congelación.

Las principales propiedades físicas del dióxido de carbono se presentan en la Tabla 4:

Estado de agregación	Gas	Punto de ebullición	111,55 K (-162 °C)
Apariencia	Incoloro	Punto de inflamabilidad	85,15 K (-188 °C)
Densidad	0.717 kg/m^3 ; 0,000717 g/cm^3	Temperatura de autoignición	810,15 K (537 °C)
Masa molar	16,04 g/mol	Límites de explosividad	5-15 %
Punto de fusión	90,6 K (-183 °C)	Índice de refracción	1,00

Tabla 4. Propiedades físicas del metano.

Presenta líneas de absorción en diferentes rangos del espectro electromagnético resultando de especial interés las localizadas en torno a los 1330nm [30] y en torno a los 1650-1670nm [31].

Técnicas de detección de gases con fibra óptica:

El estado del arte de las técnicas de detección de gases a través de la interacción de la luz guiada con el medio comprende diferentes métodos, que se han estudiado a lo largo del proyecto, como los sensores basados en trayecto libre (en inglés *open path*), sensores basados en el campo evanescente o sensores basados en fibras de cristal fotónico del tipo hollow core. También existen otras técnicas más complejas como la espectroscopía fotoacústica con fibras ópticas (los cuales no se han desarrollado en el estudio).

Los sensores basados en trayecto libre se basan en la interacción directa de la luz (generalmente un haz colimado entre dos extremos de fibras) y el medio en el cual se encuentra el gas tal y como se representa en la Figura 14.

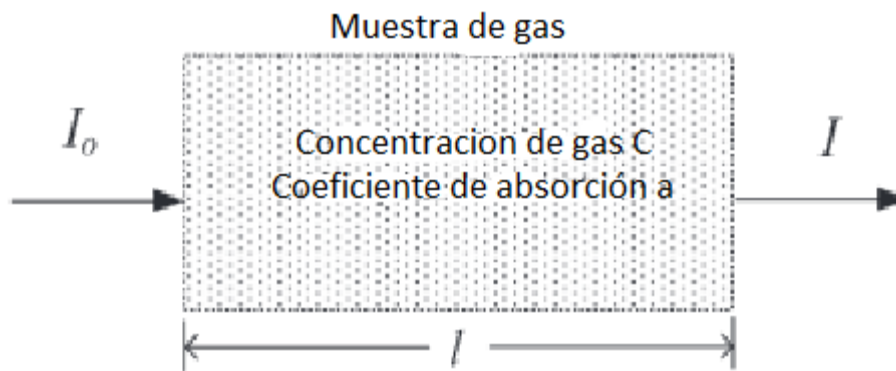


Figura 14. Principio de espectroscopía por absorción.

Con éste método se han demostrado sensibilidades al acetileno de 75ppm con una longitud de trayecto en espacio libre de 25mm [32]. Estos dispositivos presentan problemas de reflexiones indeseadas en las lentes producidas por el efecto Fabry-Perot. Para evitar estas interferencias se utiliza espectroscopía en longitud de onda con modulaciones en amplitud apropiadas combinadas con escaneos en longitud de onda para evitar estas señales de interferencia [33, 34, 35, 36].

Para mejorar la sensibilidad de los sensores se aumenta la distancia de espacio libre recorrida por el haz. Un ejemplo es el caso demostrado de conectar en cascada 60 pares de fibras colimadas a una matriz metálica circular de 10cm de diámetro interno [37] como se muestra en la Figura 15.

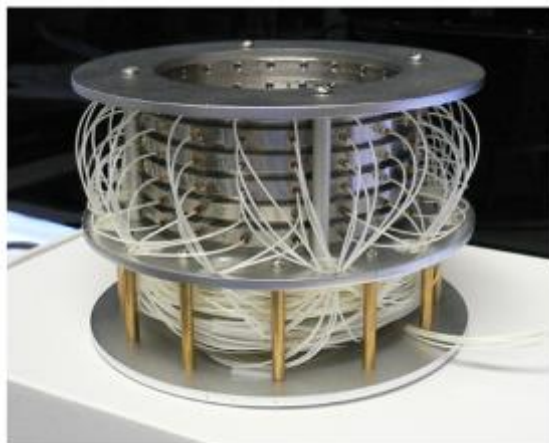


Figura 15. Célula de gas de 6 metros a través de 60 pares de fibras colimadas en cascada.

Otro de los métodos de detección de gases es a través del campo evanescente. Este tipo de sensores se basan en la interacción luz-gas producida en la zona de la fibra óptica en la cual se

encuentra presente el campo evanescente. A esta zona se puede acceder de diferentes formas, ya sea puliendo parte de la cubierta hasta acceder a la zona del núcleo, Figura 16 a), a través de fabricar un *taper* con la fibra, Figura 16 b) o a través de la fabricación de fibras con núcleo expuesto al exterior, Figura 16 c).

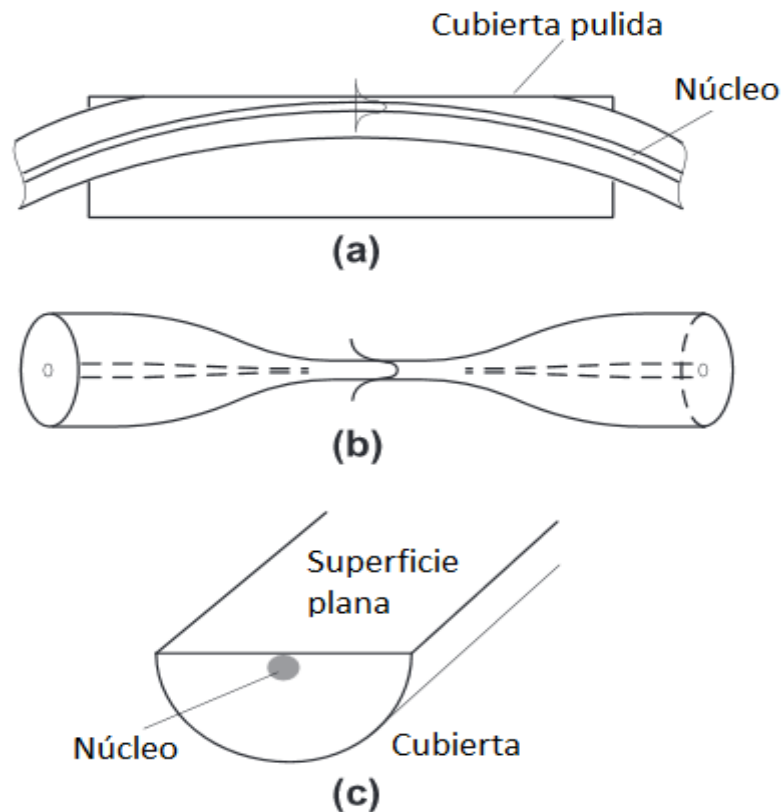


Figura 16: a) fibra con cubierta pulida; b) *taper* en fibra; c) fibra de núcleo expuesto.

Se ha demostrado la funcionalidad de fibras con cubiertas pulidas o de núcleo expuesto pero con sensibilidades muy bajas, del orden del 0,001% en comparación con las sensibilidades obtenidas con sensores de trayecto en espacio libre de la misma longitud [38,39].

Por último, se han demostrado resultados utilizando fibras de cristal fotónico de núcleo hueco (Hollow Core). Uno de los problemas de estas fibras es el rango de la ventana de transmisión, el cual es mucho más estrecho (del orden de las centenas de nanómetros) que las ventanas de transmisión en fibras convencionales debido a su funcionamiento (recordar su funcionamiento a través del *bandgap* fotónico), así como el tiempo de llenado y vaciado de la fibra.

Se ha demostrado su comportamiento como sensor de gas en las ventanas centradas en 1300 y 1500nm para detección de C₂H₂, HCN, CH₄ y NH₃ [7]. Un análisis de las dinámicas de fluidos en el interior de la fibra se llevaron a cabo en 2008 [40].

I.4 Técnicas de fusión de fibras.

Desde el año 1970 en que se fabricaron las primeras fibras ópticas con una atenuación de 20dB/km, los sistemas de comunicaciones ópticas se han convertido en una realidad gracias a las continuas mejoras tecnológicas que han permitido alcanzar atenuaciones de 0,2dB/km. Ahora bien, para aprovechar las bajas pérdidas de transmisión de las fibras ópticas resulta crucial el diseño óptimo de las tecnologías de conexionado de las mismas.

Los requisitos fundamentales que deben cumplir los distintos métodos de conexionado de fibras se pueden resumir en:

- Reducida degradación de las propiedades de transmisión de la fibra: bajas pérdidas de conexión y/o reflexiones.
- Alta fiabilidad de la conexión.
- Manejo sencillo incluso para su realización en campo por parte de operarios e instaladores.
- Bajo coste.

Dependiendo del tipo de fuente de calor utilizada existen tres tipos de métodos de fusión directa:

- Descarga eléctrica.
- Láser gaseoso.
- Llama.

El más ampliamente utilizado en fibras de sílice, y el utilizado en éste proyecto, es el primero de ellos. Dentro de éste método, existen varias técnicas para realizar los empalmes:

- Método de prefusión.
- Método de descarga de alta frecuencia con elevado voltaje de trigger (HHT).
- Método de calentamiento uniforme para realizar empalmes de múltiples fibras.

La calidad obtenida en el extremo de la fibra tras el corte afecta a las pérdidas el empalme posterior. Entre las diferentes técnicas para realizar el corte a la fibra destacan:

- Filo de cuchilla.
- Descarga eléctrica.
- Alambre caliente.

- Láser de CO₂.

El más ampliamente utilizado, y el empleado durante el desarrollo del proyecto es el primero de ellos, que se basa en realizar una muesca sobre la fibra con una cuchilla y posteriormente doblar la fibra con un movimiento seco.

A parte de factores como el desplazamiento lateral o inclinación (lo cual se resume comúnmente como desalineamientos), el factor más importante de pérdidas en el caso de empalme por fusión es la formación de burbujas confinadas entre ambos extremos de las fibras.

El mecanismo de prefusión consiste en situar los extremos de ambas fibras con una separación de unas micras y posteriormente prefusionarlos con una descarga eléctrica, lo que produce unas superficies más lisas. Posteriormente las fibras se desplazan y presionan bajo la descarga. Tras tocarse los extremos, ambas fibras permanecen presionadas debido al movimiento. Con éste método se obtienen bajas pérdidas en la región de empalme incluso para superficies imperfectas.

Normalmente, existen dos tipos de descargas eléctricas, de corriente continua (DC) o de corriente alterna (AC). En el caso de descargas DC tan sólo se gasta un electrodo mientras que en las descargas AC se descargan ambos de forma simétrica. El método HHT pertenece al grupo de las descargas AC en el que se aplica una descarga de alta frecuencia.

En éste método, una señal continua de entrada de 12V se convierte a una señal pulsante de frecuencia de 20-40kHz. Estas descargas de alta frecuencia producen una distribución espacial de la energía más plana, lo cual se traduce en una distribución de calor más uniforme y estable que en la descarga de baja frecuencia.

El requerimiento común a ambos tipos de fusionado es el alineado de las fibras. Las distintas técnicas de alineado se dividen en fijas y móviles.

En la técnica fija, las fibras no se desplazan lateralmente si no que se mantienen en posiciones predeterminadas. Este método es conocido y utilizado debido a su simplicidad, pero resulta inútil para alinear fibras que presentan excentricidad de núcleo.

Por el contrario, en la técnica móvil la fibra se desplaza lateralmente hasta obtener la posición precisa antes de la descarga. Es la técnica adecuada para fusionar fibras que presentan excentricidad de núcleo y es la técnica utilizada a lo largo del desarrollo del proyecto.

Tras efectuar el arco de fusionado, el último paso es la protección de la zona del empalme ya que generalmente para efectuar el empalme se retira la cubierta protectora exterior de la

fibra. Durante el proceso consistente en retirar las cubiertas, cortar las fibras, situarlas en la máquina empalmadora e incluso en el proceso de calentamiento, se producen grietas en las fibras que reducen la resistencia de las fibras en un 10% aproximadamente.

Si el método de protección y su diseño son los adecuados, las pérdidas pueden llegar a aumentar un 0,02dB para rangos de temperatura desde -30°C hasta +60°C. El método utilizado durante el proyecto es el de utilización de un tubo que se contrae con el calor (termorretráctil) junto con una varilla de acero o un molde de plástico.

En el proceso de fusionado de fibras, la herramienta clave es la máquina fusionadora. Existen multitud de dispositivos disponibles en el mercado. Durante el proyecto se utiliza una fusionadora *Fitel S175 Version 2000 SINGLE-FIBER FUSION SPLICER*.

Ésta fusionadora utiliza la técnica de fusión directa por descarga eléctrica a través del mecanismo de prefusión. Para el alineado se basa en la técnica móvil que permite el desplazamiento lateral de las fibras.

La fusionadora Fitel S175 incluye programas de fusionado predefinidos para realizar empalmes entre fibras SMF o entre fibras MMF obteniendo resultados experimentales de hasta 0,01dB de pérdidas. Dispone de posiciones de memoria disponible para guardar programas modificados o creados a partir de otros.

Su utilización se basa en dos modos de funcionamiento. En el modo de funcionamiento automático, es el propio programa el que se encarga de aproximar, alinear, aplicar el arco establecido y mantener sujetas las fibras durante el proceso. En el modo de funcionamiento manual, es el operador de la fusionadora el que controla y modifica éstos parámetros.



Figura 17. Fusionadora Fitel S175 con fibras SMF posicionadas para fusionado.

1.5 Teoría de concentración de tensiones.

Un objeto es más resistente cuando la fuerza se distribuye uniformemente sobre su área, de tal manera que una reducción del área efectiva, por ejemplo causada por una fisura, conduce un aumento de las tensiones cerca del límite de dicho defecto (respecto a la situación en que dicho defecto no existiera). Un material puede fallar por propagación de grieta cuando una concentración de tensiones excede el límite del material a pesar de que la tensión media esté por debajo de límite resistente.

En el caso de soldaduras (extrapolable al caso de las fusiones) de secciones circulares en guías cilíndricas (como es el caso de la fusión de las fibras ópticas) aparecen las llamadas tensiones residuales en la zona de la soldadura, que son las causantes de las fisuras que a la postre conducen a la rotura de la soldadura.

Las tensiones residuales en las uniones soldadas se originan como consecuencia del aporte de calor que se realiza durante la ejecución de la soldadura y aparecen una vez solidificado la unión y enfriada la pieza.

Estas tensiones son autoequilibradas, esto es, aparecen a la vez tensiones residuales de tracción y de compresión (generalmente, cerca de la soldadura son de tracción y conforme se aleja del cordón aparecen tensiones residuales de compresión).

Las tensiones residuales pueden mermar de forma considerable la capacidad resistente de la unión soldada. De hecho, las tensiones residuales que sean de tracción favorecen una posible rotura frágil del cordón de soldadura, reduciendo su resistencia a fatiga. Por otro lado, las zonas sometidas a tensiones residuales que sean de compresión tienen más tendencia a que aparezcan fenómenos de inestabilidad, reduciendo de esta forma su capacidad portante.

Por último, generalmente las tensiones residuales llevan aparejadas también la aparición de deformaciones residuales que alteran significativamente la geometría inicial del conjunto soldado.

Una de las principales recomendaciones en el proceso de soldado de dos piezas cilíndricas de diferente diámetro es mantener una transición entre secciones gradual y suave, limitándose la pendiente en la unión a no más del 25% tal y como muestran los ejemplos de la Figura 18.

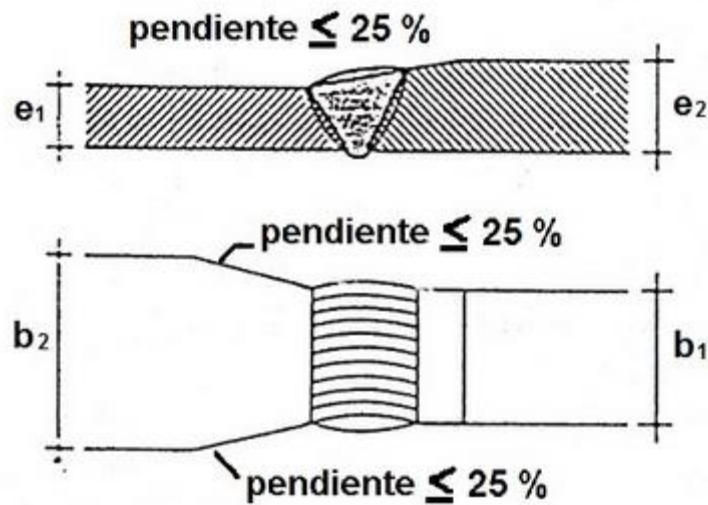


Figura 18. Ejemplos de pendientes de unión soldadas.

En el caso de las fibras ópticas y con las herramientas y técnicas de fusión existentes, no es posible realizar soldaduras que cumplan ésta recomendación, lo que produce fragilidad en las soldaduras de fibras de diferentes secciones.

La solución en estos tipos de soldaduras consiste en rebajar el diámetro en la zona de la unión para producir éstas pendientes.

En el caso de la fibra óptica convencional, el rebajado de la sección de la fibra modifica las propiedades de la misma. Al variar el diámetro de la cubierta cambia el índice de refracción efectivo de la cubierta y por tanto sus propiedades de propagación de la luz.

En el caso de las fibras de cristal fotónico, este efecto es aún mayor debido a la modificación de la matriz de huecos que rodean al núcleo.

I.6 Proyecto ECOAL-MGT



El proyecto ECOAL-MGT, oficialmente definido como *ECOAL - MGT Gestión ecológica de pilas de residuos de carbón en combustión. Programa de Cooperación Territorial. Espacio Sudoeste Europeo 2007-2013*, es un proyecto que implica entidades de Portugal (INESC Porto (Oporto),



Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (Oporto)), España (Universidad de Alcalá (Madrid), UPNA (Navarra) y Francia (XLIM –

Institut de Recherche (Limoges)).

El objetivo de éste proyecto es desarrollar y probar en campo una herramienta tecnológica que permita la monitorización continua de las pilas de desecho de carbón, reuniendo datos distribuidos espaciales y temporales de los que sea posible determinar la dinámica y establecer escenarios probables de evolución (descripción completa del proyecto en: <http://www.ecoal-mgt.eu/es/the-project>).



INESC PORTO®
INSTITUTO DE ENGENHARIA DE SISTEMAS
E COMPUTADORES DO PORTO



Universidad
de Alcalá



Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa



institut de recherche

En éste contexto, el objetivo específico de la UPNA es el diseño e implementación del sistema de multiplexación y amplificación óptica de la red de sensores puntuales de gas y

temperatura (éstos últimos no aparecen definidos en el proyecto ya que la monitorización de temperatura de toda la zona se realiza con técnicas de monitorización distribuida, aunque se consideran de gran interés). Para ello, es necesario caracterizar los sensores empleados en la red y conocer sus requisitos de potencia (pérdidas de los sensores, sensibilidad de los receptores...).

Estos sensores se basan en PCF de núcleo sólido construidos por parte del XLIM – Institut de Recherche. Por ello, antes de comenzar a diseñar la red de multiplexación y amplificación óptica, es necesario tener los sensores construidos, optimizados y caracterizados.

Los sensores de temperatura empleados en la red de multiplexación deben presentar sensibilidad en el rango de temperaturas comprendidas entre 50 y 250°C.

Los sensores de gas deben presentar sensibilidad a la presencia y capacidad de medición de diferentes concentraciones de gas para amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4).

Referencias

- [1] Ortigosa Cayetano, Amaia 2014. *Desarrollo en Matlab de un software para el interrogador sm125 de redes de difracción bragg en fibra y su aplicación en redes de sensores de fibra óptica*. Proyecto final de carrera. Universidad pública de navarra. Pamplona
- [2] A. S. Webb, F. Poletti, D. J. Richardson, and J. K. Sahu, *Suspended-core holey fiber for evanescent-field sensing*. OE LETTERS, 2006: p. 060627LR.
- [3] Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Ho, D. N. Wang, and R. S. Windeler, "Evanescent-wave gas sensing using microstructure fiber," *Optical Engineering* 41, pp. 8-9, 2002.
- [4] G. Pickrell, W. Peng, and A. Wang, "Random-hole optical fiber evanescent-wave gas sensing," *Optics Letters* 29, pp. 1476-1478, 2004.
- [5] G. F. Yan, A. P. Zhang, G. Y. Ma, B. H. Wang, B. Kim, J. Im, S. L. He, and Y. Chung, "Fiber-Optic Acetylene Gas Sensor Based on Microstructured Optical Fiber Bragg Gratings," *IEEE Photonics Technology Letters* 23, pp. 1588-1590, 2011.
- [6] Y. L. Hoo, W. Jin, H. L. Ho, and D. N. Wang, "Measurement of gas diffusion coefficient using photonic crystal fiber," *Ieee Photonics Technology Letters* 15, pp. 1434-1436, 2003.
- [7] T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, J. C. Petersen, T. Sorensen, T. P. Hansen, and H. R. Simonsen, "Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers," *Optics Express* 12, pp. 4080-4087, 2004.
- [8] Pinto, Ana M.R. 2012. *Photonic cristal fiber for sensing applicacions*. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- [9] B. Lee, "Review of the present status of optical fiber sensors," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57-79, Apr. 2003.
- [10] H.-N. Li, D.-S. Li, and G.-B. Song, "Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering," *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 11, pp. 1647-1657, Sep. 2004.
- [11] B. Culshaw, "Optical Fiber Sensor Technologies: Opportunities and - Perhaps - Pitfalls," *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 1, p. 39, Jan. 2004.
- [12] Férnanded Vallejo, Monserrat. 2012. *Contribution to the developmentr of optical networks for fiber optic sensors using fiber lasers*. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- [13] O. Frazao, S. H. Aref, J. M. Baptista, J. L. Santos, H. Latifi, F. Farahi, J. Kobelke, and K. Schuster, "Fabry-Perot Cavity Based on a Suspended-Core Fiber for Strain and Temperature Measurement," *Ieee Photonic Tech L* 21, 1229-1231 (2009).

- [14] 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," *J Lightwave Technol* 30, 1168-1172 (2012).
- [15] M. S. Ferreira, J. Bierlich, H. Lehmann, K. Schuster, J. Kobelke, J. L. Santos, and O. Frazao, "Fabry-Perot Cavity Based on Hollow-Core Ring Photonic Crystal Fiber for Pressure Sensing," *Ieee Photonic Tech L* 24, 2122-2124 (2012).
- [16] J. Kou, J. Feng, L. Ye, F. Xu, and Y. Lu, "Miniaturized fiber taper reflective interferometer for high temperature measurement," *Optics Express*, pp. 14245-14250, JUN 21 2010 2010.
- [17] Y. Rao, M. Deng, D. Duan, X. Yang, T. Zhu, and G. Cheng, "Micro Fabry-Perot interferometers in silica fibers machined by femtosecond laser," *Optics Express* pp. 14123-14128, 2007.
- [18] Y. C. Z. Ran, Y. Rao, D. Sun, E. Lu and Z. Liu, "1100C Fiber-optics high-temperature Fabry-Perot sensors fabricated by laser-micromachining," in *21st International Conference on Optical Fiber Sensors*, Ottawa (Canada), 2011, pp. 775317-1 - 775317-3.
- [19] H. Choi, K. Park, S. Park, U. Paek, B. Lee, and E. Choi, "Miniature fiber-optic high temperature sensor based on a hybrid structured Fabry-Perot interferometer," *Optics Letters*, pp. 2455-2457, NOV 1 2008 2008.
- [20] T. Zhu, T. Ke, Y. Rao, and K. Chiang, "Fabry-Perot optical fiber tip sensor for high temperature measurement," *Optics Communications*, pp. 3683-3685, OCT 1 2010 2010.
- [21] W. H. Ding and Y. Jiang, "Miniature Photonic Crystal Fiber Sensor for High-Temperature Measurement," *Ieee Sensors Journal*, vol. 14, pp. 786-789, Mar 2014.
- [22] W. Peng, X. Zhang, Y. Liu, X. Zhou, and Q. Yu, "Temperature characteristics of a core-mode interferometer based on a dual-core photonic crystal fiber," *Applied Physics B*, pp. 1-6, 2013/09/20 2013.
- [23] 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," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, pp. 1168-1172, Apr 15 2012.
- [24] Timmer, B., et al., *Ammonia sensors and their applications - a review*. *Sensors and Actuators B-Chemical*, 2005. 107(2): p. 666-677.
- [25] Modugno, G. and C. Corsi, *Water vapour and carbon dioxide interference in the high sensitivity detection of NH₃ with semiconductor diode lasers at 1.5 μ m*. *Infrared Physics & Technology*, 1999. 40(2): p. 93-99.
- [26] Webber, M.E., D.S. Baer, and R.K. Hanson, *Ammonia monitoring near 1.5 μ m with diode-laser absorption sensors*. *Applied Optics*, 2001. 40(12): p. 2031-2042.

- [27] R. M. Mihalcea, D. S. Baer, and R. K. Hanson, "Diode laser sensor for measurements of CO, CO₂, and CH₄ in combustion flows," *Appl Optics* 36, 8745-8752 (1997).
- [28] S. Y. Zhu, Y. P. Chen, G. Zhang, and J. M. Sa, "A near-Infrared Optical Fiber Sensor for Carbon Monoxide Concentration Monitoring," *Microw Opt Techn Let* 52, 2192-2195 (2010).
- [29] H. Ding, X. L. Li, J. H. Cui, S. F. Dong, and L. Yang, "An All-Fiber Gas Sensing System Using Hollow-Core Photonic Bandgap Fiber as Gas Cell," *Instrum Sci Technol* 39, 78-87 (2011).
- [30] Cubillas et al., *Methane sensing at 1300 nm band with hollow-core photonic bandgap fibre as gas cell*, *Electron Lett* 2008, 44, 403-405.
- [31] Cubillas et al., "Methane detection at 1670-nm band using a hollow-core photonic bandgap fiber and a multiline algorithm", *Opt Express* 15, 17570-17576 (2007).
- [32] H.L. Ho, W. Jin, M.S. Demokan, *Quantitative measurement of acetylene by using external cavity tunable diode laser*, in: Proc. SPIE 3852, Harsh Environment Sensors II, Boston, US, 1999, pp. 124–133.
- [33] G. Stewart, A. Mencaglia, W. Philp, W. Jin, *Interferometric signals in fiber optic methane sensors with wavelength modulation of the DFB laser source*, *J. Lightwave Technol.* 16 (1998) 43–53.
- [34] W. Jin, G. Stewart, W. Philp, B. Culshaw, M.S. Demokan, *Limitation of absorption-based fiber optic gas sensors by coherent reflections*, *Appl. Opt.* 36 (1997) 6251–6255.
- [35] W. Jin, Y.Z. Xu, M.S. Demokan, G. Stewart, *Investigation of interferometric noise in fiber-optic gas sensors with use of wavelength modulation spectroscopy*, *Appl. Opt.* 36 (1997) 7239–7246.
- [36] M.A. Morante, G. Stewart, B. Culshaw, J.M. LopezHiguera, *New micro-optic cell for optical fibre gas sensors with interferometric noise reduction*, *Electron. Lett.* 33 (1997) 1407–1409.
- [37] H.L. Ho, J. Ju, W. Jin, *Fiber optic gas detection system for health monitoring of oil-filled transformer*, in: Proc. SPIE 7503, 20th International Conference on Optical Fibre Sensors, Edinburgh, United Kingdom, 2009, Article No. 75030T.
- [38] G. Stewart, W. Jin, B. Culshaw, *Prospects for fibre-optic evanescent-field gas sensors using absorption in the near-infrared*, *Sensor Actuat. B – Chem.* 38 (1997) 42–47.
- [39] W. Jin, G. Stewart, B. Culshaw, S. Murray, M. Wilkinson, J.O.W. Norris, *Performance limitation of fiber optic methane sensors due to interference effects*, *J. Lightwave Technol.* 14 (1996) 760–769.
- [40] J. Henningsen, J. Hald, *Dynamics of gas flow in hollow core photonic bandgap fibers*, *Appl. Opt.* 47 (2008) 2790–2797.

II. SENSOR DE TEMPERATURA. CAVIDAD FABRY-PEROT BASADO EN FIBRA MICROESTRUCTURADA DE NÚCLEO SUSPENDIDO.

Basándonos en las fibras fabricadas por el XLIM para el proyecto ECOAL-MGT, el primer paso consistió en el desarrollo y su posterior optimización del programa de fusionado (fusionadora FITEL S175) para conseguir los sensores. El programa óptimo de fusionado debía conseguir una fusión completa y permanente de las fibras, pero sin colapsar los huecos interiores de la fibra, es decir, sin llegar a romper los puentes (lo cual implicaría una caída del núcleo suspendido).

En la Figura 1 se muestran las fibras que fueron sometidas a estudio, así como sus correspondientes parámetros físicos:




SW-MOF 4 bridge		
Fiber 1		Outer diameter: 252μm Cavity diameter: 176μm Core length: 10,7μm Core thickness: 2,4μm Bridge thickness: 0,7μm
Fiber 2		Outer diameter: 248μm Cavity diameter: 150μm Core length: 12,3μm Core thickness: 3μm Bridge thickness: 0,8μm
Fiber 3		Outer diameter: 127,6μm Cavity diameter: 65μm Core length: 6,5μm Core thickness: 1,5μm Bridge thickness: 0,8μm

Figura 1. Características físicas de las fibras MOF disponibles.

Dadas las dimensiones físicas de las 3 fibras, el estudio se centró en la fibra numerada como “fibra 3” ya que las fibras 1 y 2 presentaban un diámetro de la cavidad (huecos) de $176\mu\text{m}$ y $150\mu\text{m}$ respectivamente, lo que suponía mayor diámetro que el diámetro exterior de las fibras monomodo y multimodo estándar (SMF y MMF) que se sitúan en los $125\mu\text{m}$. Por tanto, dadas las características de las fibras 1 y 2, la fusión se realizó únicamente a través del contacto de núcleo y puentes con la fibra adyacente (fibras SMF y MMF) y dadas las pequeñas dimensiones de éstos elementos, se comprobó en el laboratorio que la fijación de las fibras era insuficiente e imposibilitaba su manipulación sin romper la fusión, ya que para obtener una fusión bien alineada (núcleos de la SMF y la SCF enfrentados) los puntos de unión de la SCF van a ser solo los puentes y el propio núcleo, sin existir contacto entre la cubierta exterior de la SCF y las fibras SMF/MMF. El estudio de la fusión de la fibra 3 se presenta en el apartado de Fusión de las fibras en éste mismo capítulo.

II.1 Caracterización numérica de la fibra

La fibra MOF utilizada fue fabricada y suministrada por XLIM (Institut de recherche, Limoges, France). La fibra cuenta con un núcleo en forma de doble Y, que se encuentra suspendido de 4 puentes creando una cavidad de 4 huecos grandes que lo envuelven, tal y como puede apreciarse en las fotos de la Figura 2.

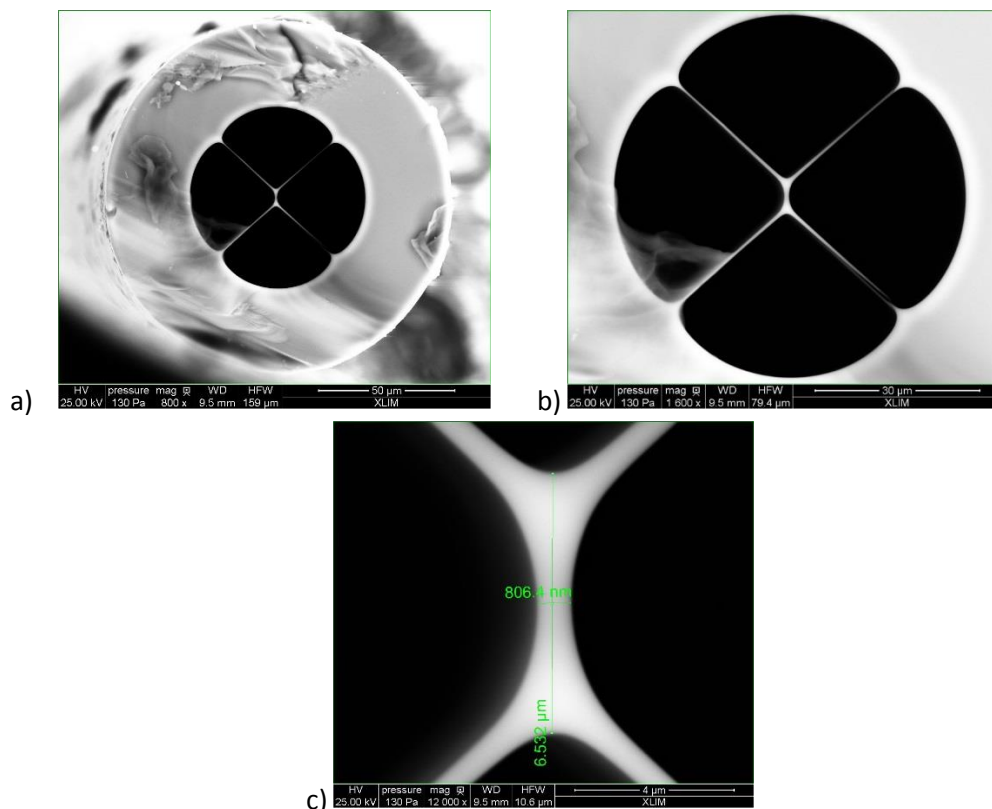


Figura 2. Fotografía al microscopio de la sección de la fibra MOF: a) con 800x; b) con 1600x; c) detalle del núcleo con 12000x aumentos

Ésta forma tan característica del núcleo de la fibra puede ser interpretada como dos núcleos monomodo acoplados.

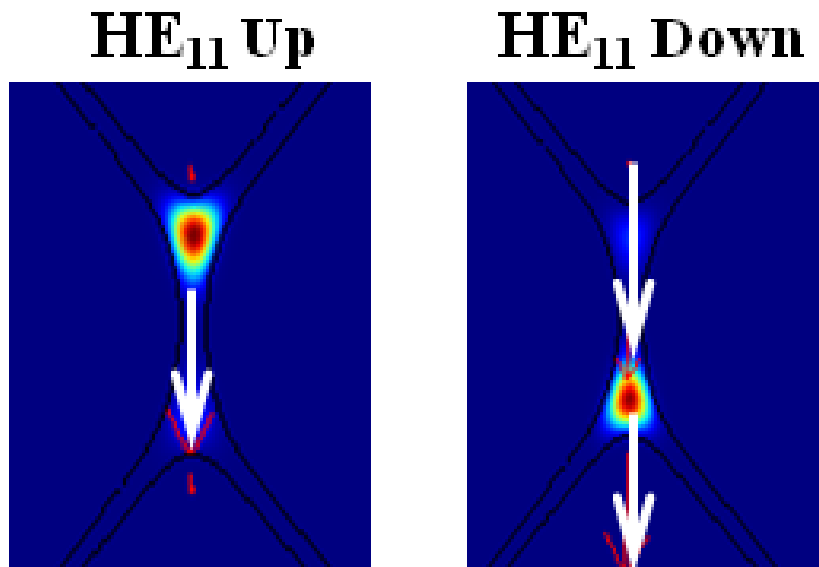
Los resultados de la simulación (realizada con COMSOL Multiphysics (de COMSOL Inc., USA) utilizando el Método vectorial de Elementos Finitos (en sus siglas en inglés, FEM)) se representan en la Figura 3. La distribución de intensidad de las 4 componentes electromagnéticas calculadas del supermodo LP_{01} se muestran en la Figura 3 a), donde las flechas blancas indican la dirección de polarización de cada modo.

La estructura es capaz de propagar supermodos LP_{01} , que se han descompuesto en 4 componentes electromagnéticas que llamaremos HE_{11x-up} , HE_{11y-up} , $HE_{11x-down}$ y $HE_{11y-down}$. No se calcularon modos de orden superior para ésta estructura (datos proporcionados por el XLIM).

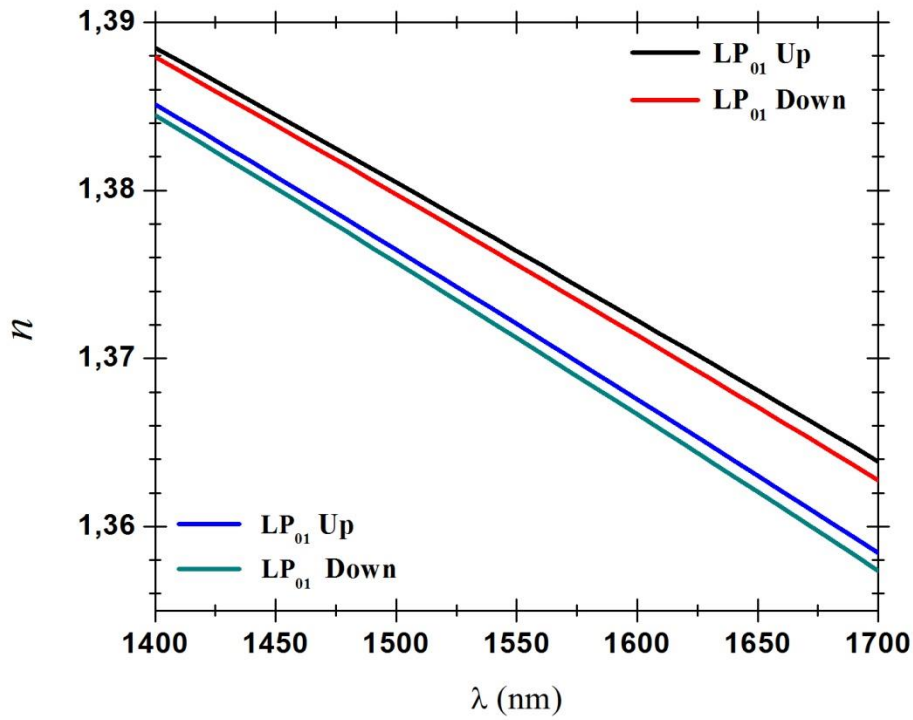
La Figura 3 b) presenta las variaciones de índice de refracción en función de la longitud de onda para todos los modos HE_{11} calculados. Cabe destacar que para una polarización, dada la simetría de la estructura, los índices de refracción efectivos están muy próximos los unos a los otros.

La Figura 3 c) representa la birrefringencia del grupo (B_g), calculada utilizando los modos electromagnéticos “up” (los resultados utilizando los modos electromagnéticos “down” son similares). Los valores de birrefringencia B_g calculados son similares a los presentados en [2], lo que nos lleva a considerar la estructura como una Hi-Bi MOF.

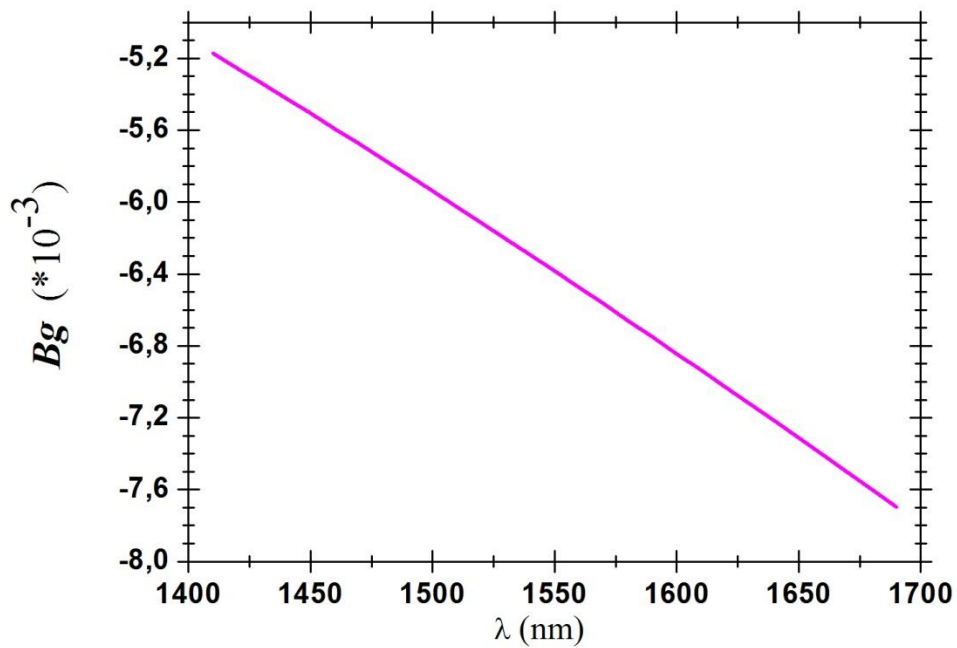
Por todas estas razones, se prestó una especial atención a la polarización y a las condiciones de medición durante los trabajos experimentales.



a)



b)



c)

Figura 3. a) Distribución de campo de las componentes HE_{11} up y HE_{11} down del supermodo LP_{01} ; b) índice de refracción frente a longitud de onda; c) birrefringencia de grupo frente a longitud de onda. Cálculos realizados en el XLIM de Limoges (Francia).

II.2 Fusión de las fibras

Tal y como se ha comentado en la introducción de éste capítulo, debido a las características físicas de las fibras, el estudio se reduce a la fibra 3, cuyo diámetro de la cavidad es de $65\mu\text{m}$ y su diámetro exterior $127,6\mu\text{m}$, lo cual presentaba una superficie de contacto entre la SMF y la SCF que formaba una corona circular de $30\mu\text{m}$ de radio tal y como se representa en la Figura 4.

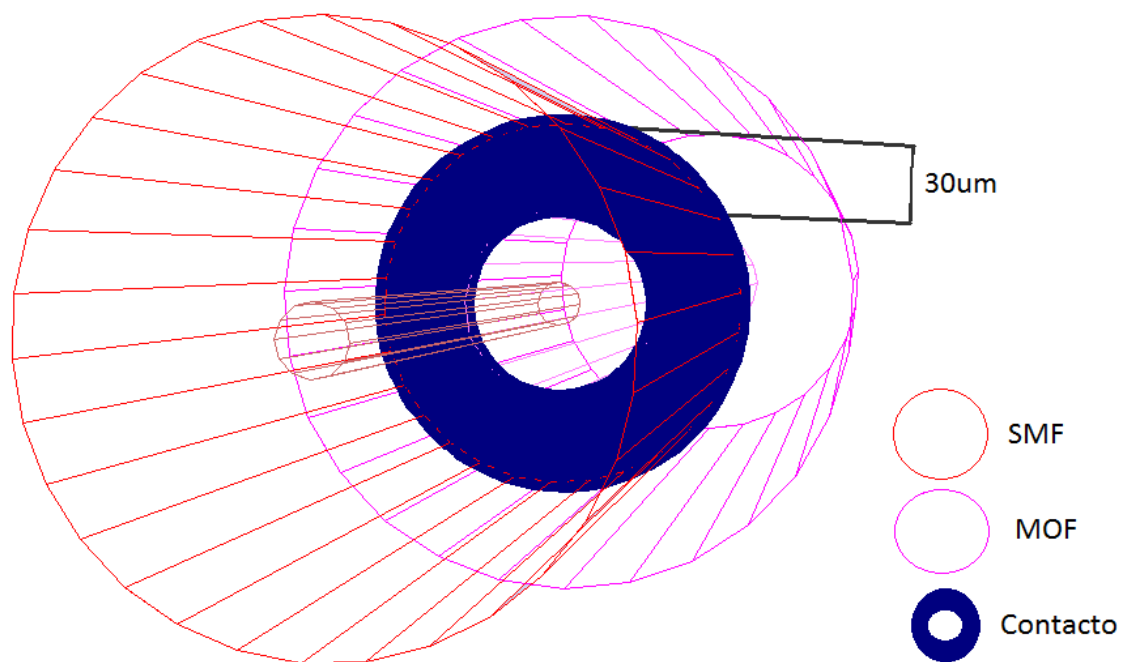


Figura 4. Representación de la sección de dos fibras fusionadas

Dadas las características de la fibra fue necesario trabajar en modo manual y elaborar un programa específico de fusión para ella. El programa de fusión se obtuvo mediante la optimización de cada parámetro de la fusionadora, teniendo como objetivo una fusión duradera, estable y sin colapso de las cavidades internas de la SCF. Los parámetros óptimos se muestran en la tabla 1.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Arc Power	70	Repeat Arc Times	0 times
Pre-Fuse Time	10 ms	Repeat Arc Duration	500 ms
Arc Duration	100 ms	Repeat Arc Interval	500 ms
Z Push Distance	1 μm	Repeat Arc Power Offset	0
Arc Power Compensation	0	Cleave Angle	2.0 deg
Cleanning A-Power Offset	0	Loss Limit	0.2 dB
Cleanning Time	0 ms	Aligning Type	CLAD
Z Pull Start Time	0 ms	Mode Field Radiums L	5.00 μm
Z Pull Distance	0 μm	Mode Field Radiums R	5.07 μm
Auto Additional Arc	0		

Tabla 1. Parámetros del programa de fusión.

Los principales parámetros que se estudiaron para optimizar el programa son los tres primeros: *Arc Power*, *Pre-Fuse Time* y *Arc Duration*.

- *Arc Power* actúa sobre la potencia del arco aplicado. Medido en valores de 0 a 255.
- *Pre-Fuse Time* indica el tiempo que transcurre entre que se inicia el arco y se juntan las fibras.
- *Arc Duration* indica el tiempo de aplicación del arco sobre las fibras

Tal y como se buscaba, éste programa permite una fusión que permite su manipulación sin riesgo de rotura y mantiene la estructura de la SCF intacta.

Otro de los parámetros a estudiar es el número de arcos aplicados a la fusión. Se comprobó experimentalmente que no es lo mismo aplicar dos arcos independientes y consecutivos de potencia X por arco, que aplicar un solo arco de potencia 2X. Ésta conclusión demostró un compromiso entre fijación de la fusión y conservación de la estructura interna de la fibra MOF.

El estudio realizado demostró que los arcos de mayor potencia (aunque aplicados un menor número de veces) produjeron peores resultados que aquellos que fueron aplicados a menor potencia pero con un número mayor de repeticiones. Éste resultado no se refiere a la fijación de fibras (en ambos casos la fusión se mantiene estable y permite su manipulación), si no a la

conservación de la estructura interna de la fibra MOF. Arcos largos tienden a destruir los puentes que mantienen al núcleo suspendido en su posición. Por tanto, el compromiso implica que a mayor potencia del arco, mayor fijación de la fusión, pero por contrario, pero conservación de la estructura interna de la fibra.

A la luz de éstos resultados, el programa anteriormente desarrollado, permitió obtener una fusión estable (siempre referido a la fibra 3) y que a su vez nos permitiese aplicar 3 arcos sin que se viese afectada la estructura interna.

La última fase de la optimización del programa consistió en el estudio del impacto real de los sucesivos arcos con el programa final sobre la fibra, es decir, qué aportaban realmente los segundos y terceros arcos sobre la fusión.

La conclusión final es que el primer arco es el que realmente fija las fibras, y los siguientes arcos eran arcos de refuerzo, sin que ello aumentara significativamente la resistencia de la fusión y aumentando la probabilidad de desestabilizar la estructura de la fibra.

Por tanto, y como resultado final del estudio, se decidió realizar las fusiones aplicando un solo arco, si bien en casos puntuales, dependiendo del estado de la fusión tras la aplicación del primer arco (valoración visual sobre la pantalla de la fusionadora) la aplicación de un arco de refuerzo puede contribuir al proceso de fusionado (a expensas de aumentar las probabilidades de desestabilizar la estructura).

Un parámetro que caracteriza el estado de una fusión son las pérdidas introducidas en el sistema. En el caso de fusiones realizadas de forma MANUAL, éste parámetro no se ve afectado únicamente por los parámetros de fusión, sino que depende de la posición y alineado de las fibras en el interior de la fusionadora.

Distinguir el núcleo de las fibras de núcleo suspendido (SCF) en la fusionadora no resulta tarea fácil. La fusionadora muestra una imagen del alineamiento de las fibras basado en la iluminación externa de las fibras, por lo tanto debido a las múltiples reflexiones de luz que se producen en la SCF, se proyecta una imagen en la pantalla muy distorsionada, que dificulta distinguir núcleo, puentes y huecos. En la Figura 5 se muestran ejemplos de la dificultad para localizar los núcleos cuando las fibras se encuentran en la fusionadora.



Figura 5. Ejemplos de imágenes de la fibra 3 en la pantalla de la fusionadora

Por tanto y teniendo éste fenómeno en cuenta, no es posible indicar las pérdidas inducidas por la fusión directamente, ya que no es posible conseguir un alineado perfecto. Las pérdidas de cada fusión varían en función del alineamiento de la fibra.

En la figura 6 se muestra el esquema utilizado para la caracterización del alineamiento y fusión de la fibra. Esta configuración permitió a su vez la caracterización del sensor una vez optimizado:

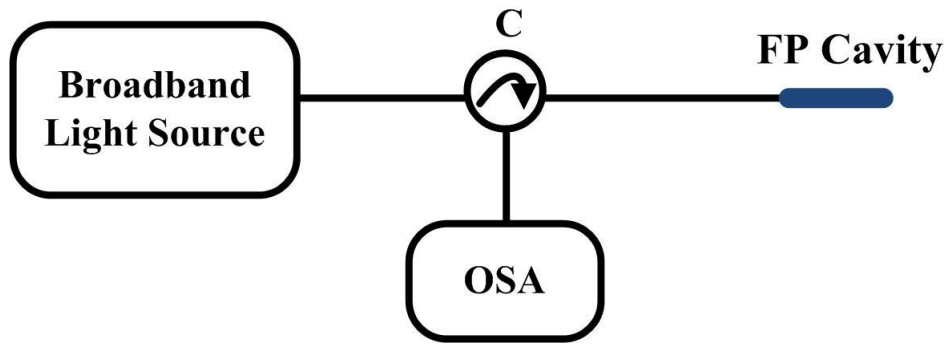
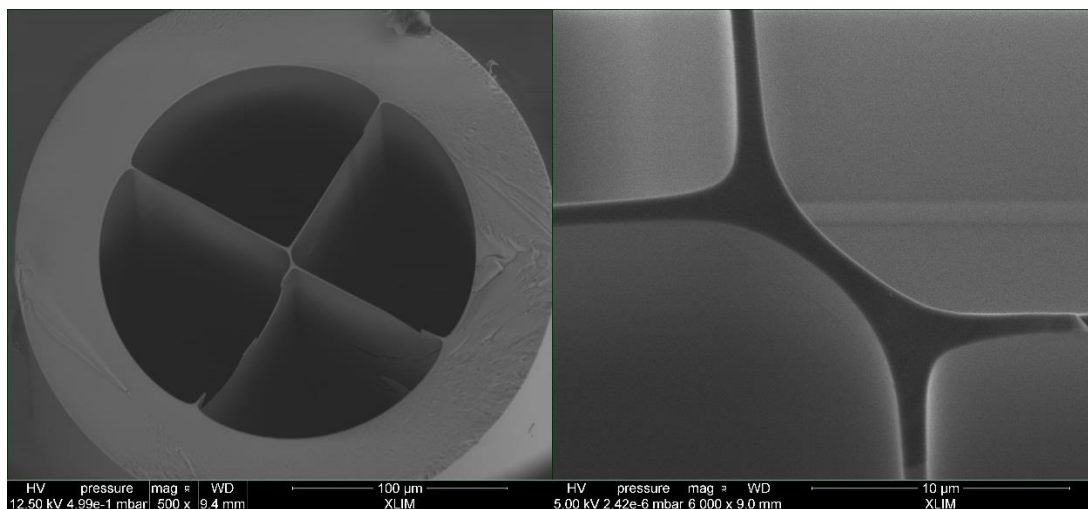


Figura 6. Esquema del montaje

Se estudió un sensor basado en una cavidad Fabry-Perot realizada con la fibra 3. De éste modo sabemos que la potencia reflejada en el extremo de la cavidad que forma la interfaz con el aire, se refleja un 4% de la potencia incidente debido a la reflexión de Fresnel (presentada en el capítulo de introducción).

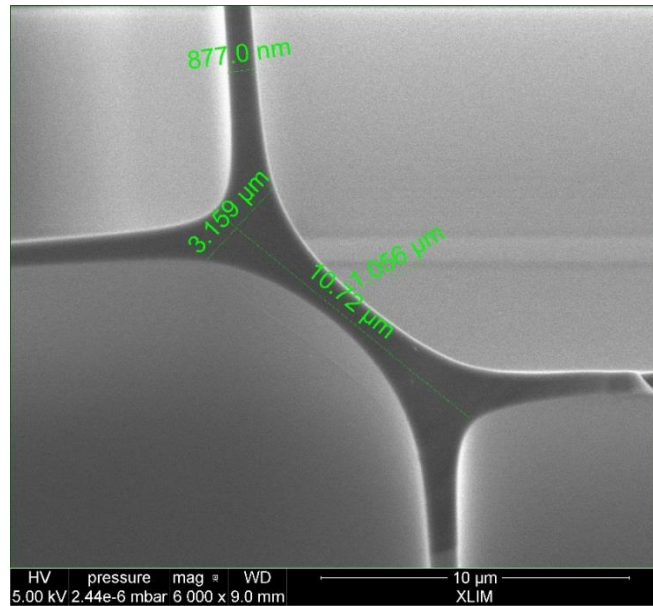
Para calcular las pérdidas de la fusión, se tuvo en cuenta en primer lugar, las pérdidas de inserción del circulator del puerto 1 al 2 más las del puerto 2 al 3, con un total 1.6dB medidos con un medidor de potencia óptica del puerto 1 al 2 más las del puerto 2 al 3. En segundo lugar las pérdidas generadas en la reflexión del 4% al final de la fibra que aportaron 13dB mas. Por lo tanto, conociendo la potencia emitida por la fuente se determinó que la fusión del sensor presentaba un total de pérdidas de 13dB

Para comprender correctamente este resultado es importante entender la geometría de la fibra SCF utilizada:



(a) Sección de la fibra

(b) Detalle del núcleo



(b) Detalle del núcleo acotado

Figura 7. Imágenes de la sección de la fibra y del núcleo (facilitadas por el XLIM).

Como podemos ver en la última figura 7 c, las dimensiones del núcleo de la SCF son $10,72\mu\text{m}$ en su eje más largo y $3,19\mu\text{m}$ en el más corto. Superponiendo el núcleo de una fibra SMF cuyo diámetro de núcleo es de $\sim 10\mu\text{m}$ y suponiendo una alineación prácticamente perfecta, que permite el máximo acoplo de luz de la SMF a la SCF, tenemos el siguiente resultado representativo:

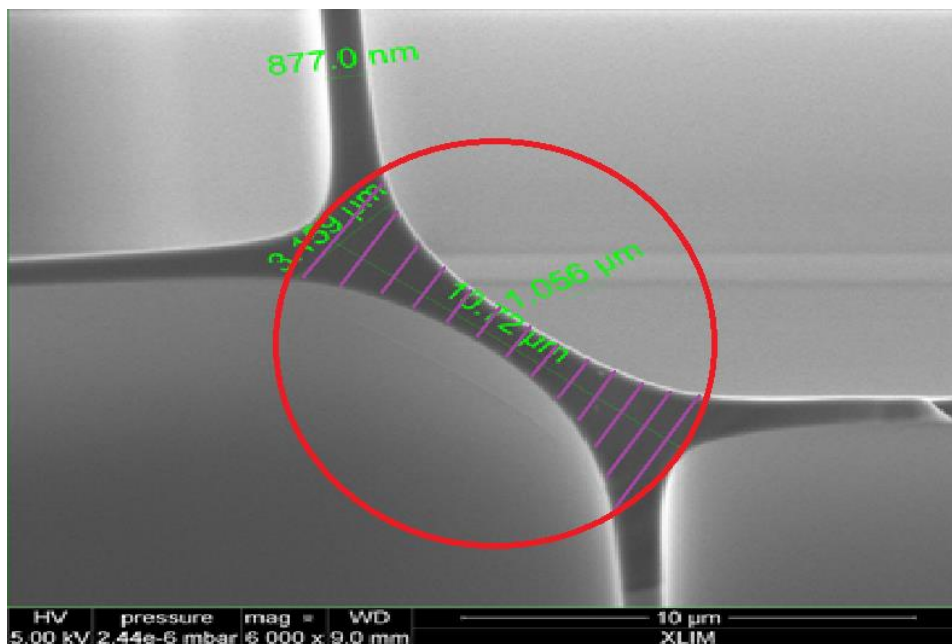


Figura 8. Detalle del núcleo y superposición del núcleo de una SMF perfectamente alineada

En la representación de la Figura 8 es fácil observar que tan solo la parte de la energía incidente que esté situada sobre la zona rayada se acoplará a la SCF y del resto, el 4% se verá reflejada de nuevo hacia la SMF y el 96% restante pasará al aire que conforma el hueco, resultando en luz perdida para nuestro objetivo. Por tanto, tan solo esa parte de la luz comprendida en la zona rayada es la que realmente se acopla a la SCF. Cuando la luz se refleja al final de la PCF y se propaga en dirección opuesta, el 100% de la luz que viaja por la SCF se acopla en la SMF.

II.3 Construcción del dispositivo sensor

El objetivo fue la construcción de un sensor que nos permitiera medir temperatura en el rango especificado por el proyecto ECOAL-MGT para su posible implantación en estudios de campo de medida de temperatura puntual.

Dadas las características de la fibra y su comportamiento multimodo, la estructura utilizada para la medida de temperatura fue una cavidad Fabry-Perot. Dadas las características de la fibra, esta se puede considerar como una única estructura que guía súper-modos, o como dos núcleos acoplados. Éste hecho confiere a la fibra buenas posibilidades en el ámbito de la realización de sensores.

A través del programa de fusión descrito en el apartado anterior, se fusionó un fragmento de aproximadamente 500µm de fibra de cristal fotónico a una fibra monomodo estándar. La manipulación de un fragmento de dimensiones tan reducidas presentó diversos problemas:

- Dificultad para su manipulación a mano (cortar la medida deseada, y trabajar con ella).
- La fusionadora no permite introducir en ella longitudes tan cortas de fibra (los anclajes necesitan al menos de 2cm de fibra para poder fijarla).

Por tanto, el proceso consistió en fusionar la fibra SMF con una longitud aleatoria de fibra de cristal fotónico (entre 5 y 10cm aproximadamente para permitir una manipulación cómoda de la fibra y de la fusión) y una vez se realizó la fusión y se comprobó su resistencia (resistencia a curvatura directa sobre la fusión, fijando la SMF y ejerciendo fuerza sobre la PCF induciendo curvatura en la fusión)), se introdujo el dispositivo en la cortadora y se realizó el corte dejando la longitud de fibra de cristal fotónico que deseamos.

De este modo se consiguió una longitud reducida de fibra para configurar nuestra cavidad y por otro lado un corte recto al final de la fibra de cristal fotónico para la optimización de la reflexión de Fresnel.

El resultado de dicho proceso se muestra en la Figura 9 tomada con el microscopio de alta resolución:

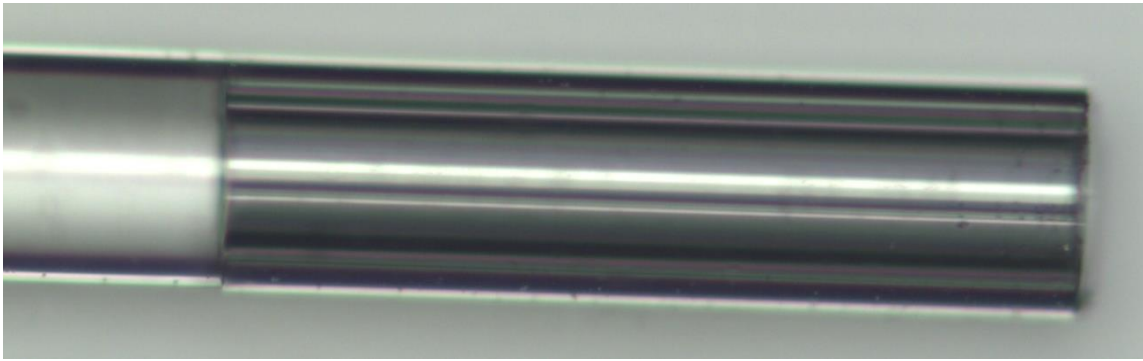


Figura 9. Fotografía al microscopio de la cavidad Fabry-Perot.

El correcto alineamiento de los núcleos de ambas fibras se realizó de forma empírica a través del mismo montaje utilizado para la medición de las pérdidas por fusión. De éste modo, lo que se buscó fue el guiado máximo de luz a través de la fusión. Por tanto, variando la posición en ambos ejes de la fibra de cristal fotónico con respecto a la SMF (en posición estática) se buscó la máxima potencia a la salida del montaje, medida en el analizador de espectros ópticos.

El resultado obtenido, con una longitud de fibra SCF de aproximadamente $500\mu\text{m}$, se muestra en la Figura 10 (descrito en el apartado de resultados):

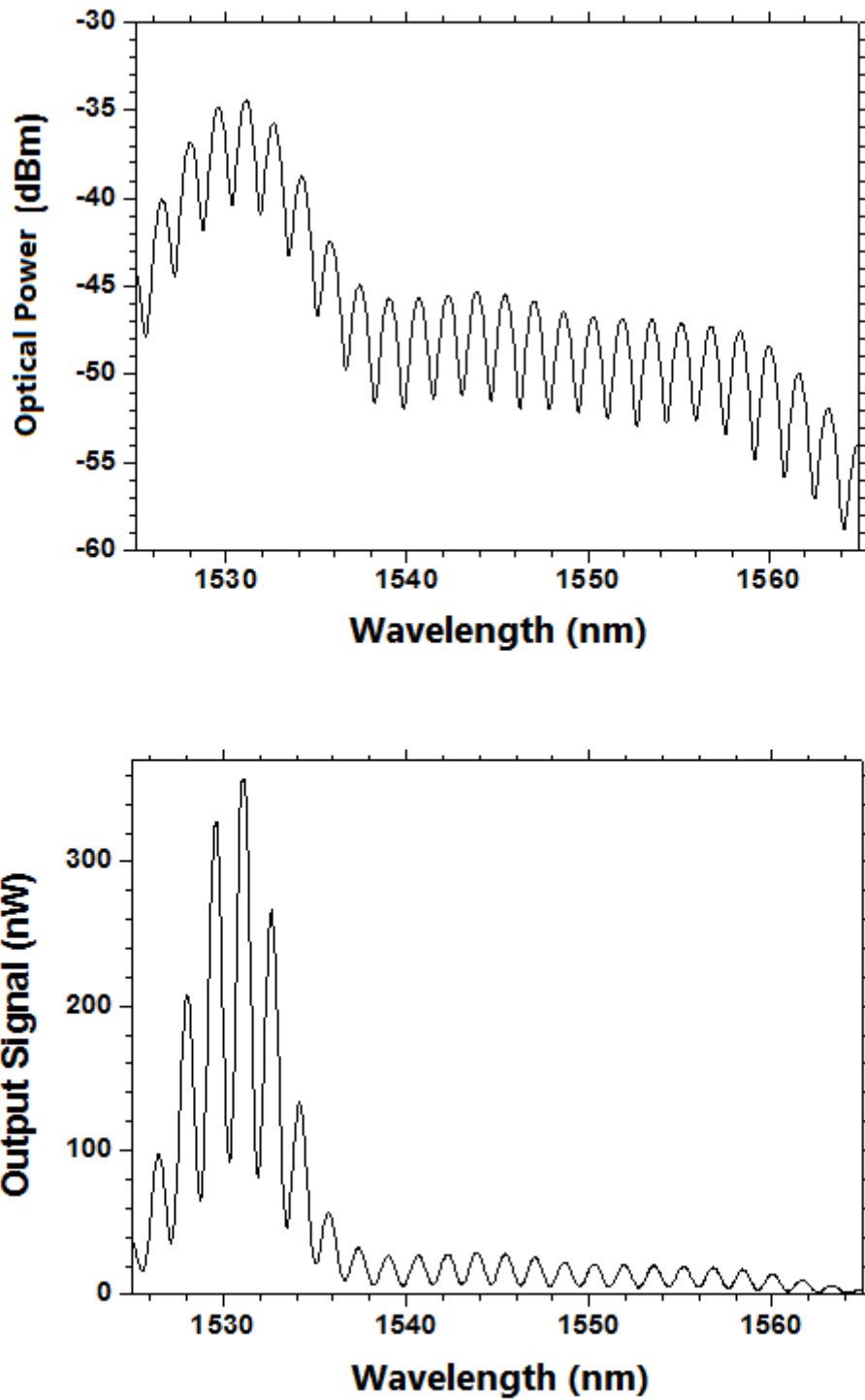


Figura 10. Espectros de salida del sensor en escala logarítmica (arriba) y lineal (abajo)

II.4 Configuración y estructuras de medida

Como se ha señalado en capítulos anteriores, para éste tipo de cavidades Fabry-Perot, se utiliza un montaje en reflexión. Para reforzar los resultados, en nuestro caso utilizamos dos estructuras diferentes en reflexión basadas en dos dispositivos de medida:

- Estructura basada en el analizador de espectros ópticos (OSA):

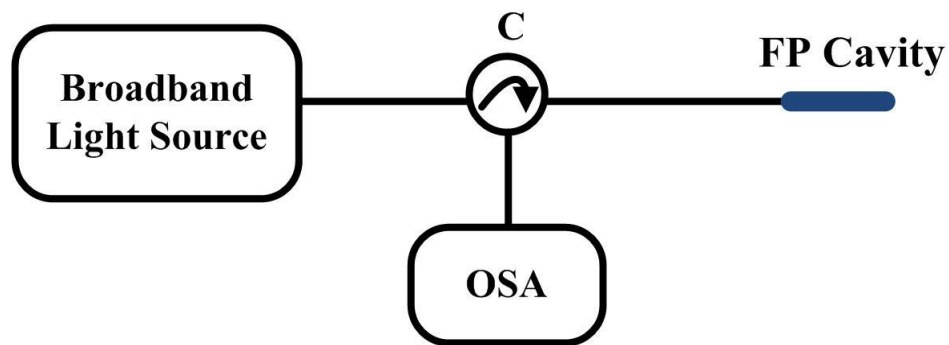


Figura 11 a) montaje integrando OSA

- Estructura basada en OBR (Luna Technologies):

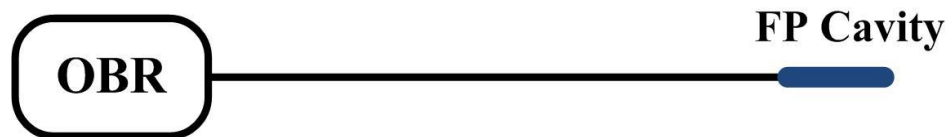


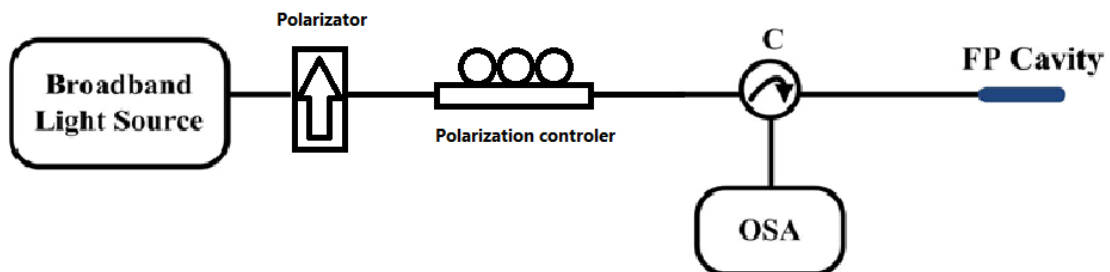
Figura 11 b) montaje integrando OBR

Ambos montajes se basan en el mismo fenómeno de reflexión al final de la cavidad Fabry-Perot, pero se diferencian en el dispositivo de medida. En éste estudio el OBR se utiliza como herramienta de refuerzo y comprobación de los resultados obtenidos. Tal y como se explica en el capítulo dedicado a los dispositivos de medida empelados a lo largo de todo el proyecto, el OBR nos permite medidas más precisas y de mayor sensibilidad que el OSA, pero su coste es mucho mayor que el sistema basado en la combinación de una fuente de luz blanca, circulador y OSA, lo cual impide su utilización de manera extensa para dispositivos cuyo fin es su implantación real para medidas de campo.

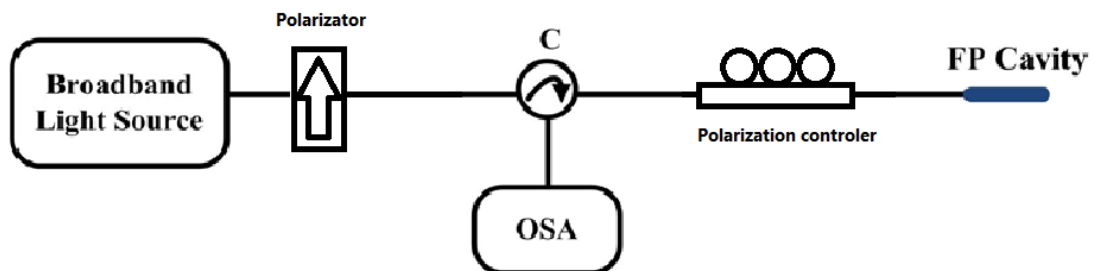
En el caso de la fibra de cristal fotónico utilizada, dada la asimetría de su núcleo, es fácil de suponer un comportamiento altamente birrefringente.

Se pretende estudiar la sensibilidad del dispositivo sensor a la polarización de la luz incidente. Dada la escasez de datos y simulaciones teóricas para verificar éste comportamiento, también se realizó un montaje para medir ésta característica de la fibra. En éste caso a través de un polarizador y su correspondiente controlador de polarización (variando las posiciones de éstos dispositivos en el montaje). Para ello se realizaron dos montajes:

- Polarizador y controlador de polarización situados delante del circulador:



- Polarizador situado delante del circulador y controlador de polarización inmediatamente después:



De éste modo, mediante la variación de los controles del controlador de polarización, se estudió la influencia del carácter birrefringente de la fibra en los resultados obtenidos.

II.5 Resultados

Tal y como se ha comentado anteriormente el sensor obtenido presentó el espectro de salida, mostrado en las Figuras 12 y 13, cuando es iluminado por una fuente blanca:

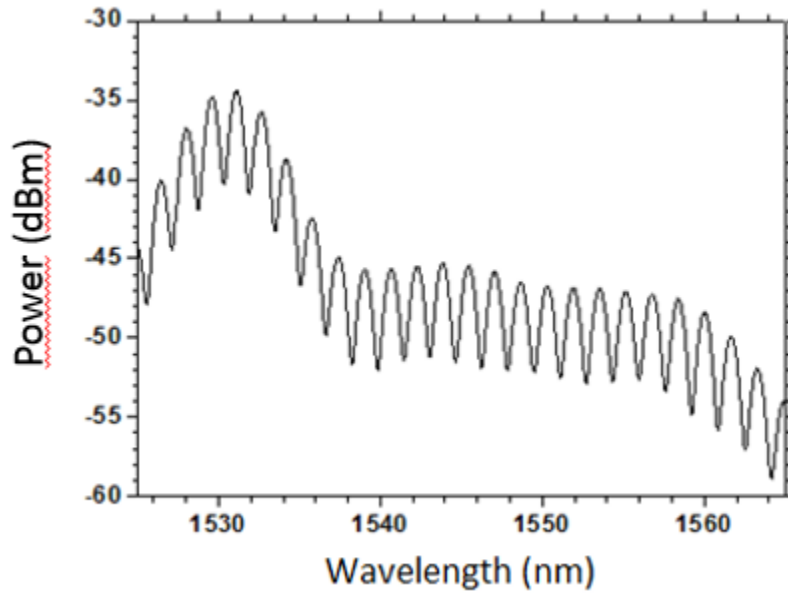


Figura 12. Potencia del sensor frente a longitud de onda.

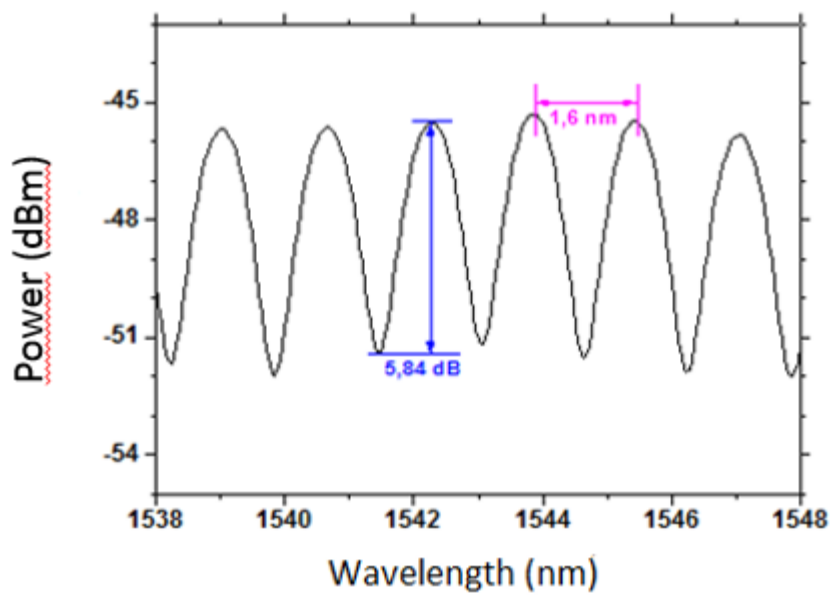


Figura 13. Detalle del patrón de interferencia.

Se puede apreciar claramente en la Figura 13 un patrón de interferencia con 5.84dB de rango dinámico y periodo de repetición de la interferencia de 1.6nm. Éste resultado coincide con el esperado teóricamente (capítulo de introducción) dado por:

$$\Delta\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2 \cdot n \cdot d}$$

En la cual $\Delta\lambda_{FSR}$ es el patrón de interferencia, y cogiendo como datos $\lambda = 1545\text{nm}$, $n = 1.46$ (constante para la simulación) y $d=500\mu\text{m}$, tenemos como resultado teórico $\Delta\lambda_{FSR} = 1.635\text{nm}$, resultado que obtuvimos en el sensor creado.

La señal final obtenida de la cavidad Fabry-Perot, utilizando como fuente una fuente blanca normalizada, medida en dos configuraciones diferentes puede verse en la Figura 14:

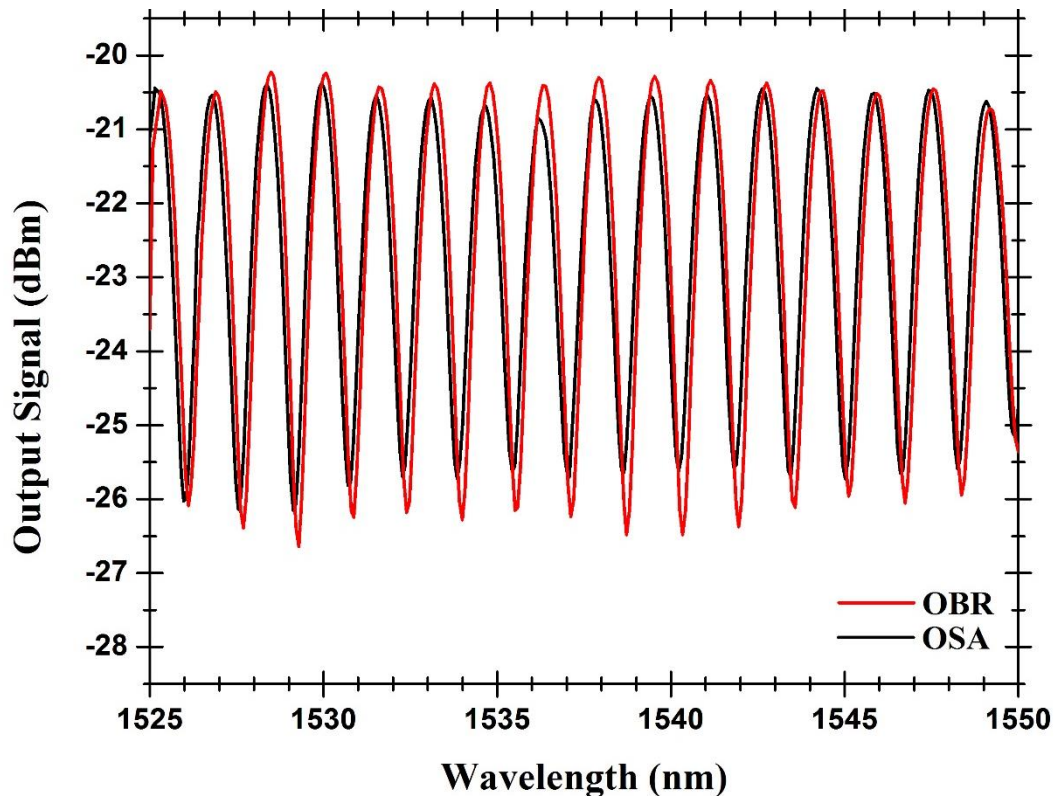


Figura 14. Señal obtenida en ambas configuraciones

a) Respuesta a la temperatura:

Cuando se fuerzan variaciones de temperatura en la cavidad Fabry-Perot, la señal interferométrica sufre un desplazamiento en longitud de onda. Para caracterizar este desplazamiento en longitud de onda, la cavidad Fabry-Perot se introdujo en un horno con un rango de trabajo entre 25 y 250°C. El desplazamiento en longitud de onda observado se presenta en la Figura 14. Con una separación entre picos de 1.6nm, el sensor permitió medir de forma precisa 180°C. La cavidad Fabry-Perot presenta una respuesta lineal con la temperatura, como se puede comprobar en la Figura 14 ya presentada. Además, la sensibilidad del sensor depende del montaje de análisis con el que se trabaje: utilizando el montaje de la Figura 11 a), utilizando un OSA, se obtiene una sensibilidad de 9.8pm/°C; mientras que utilizando el montaje de la Figura 11 b), utilizando un OBR, se obtiene una sensibilidad de 11.93pm/°C. La diferencia de sensibilidad entre ambas mediciones puede ser debida al error relativo de las mediciones de temperatura. Las mediciones realizadas con el OSA se realizaron con variaciones de temperatura ascendentes, mientras que las variaciones de temperatura medias con el OBR fueron descendentes. Éste hecho añade una diferencia difícil de cuantificar, la cual, unida al propio error de la sonda de temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$) pueden ser la causa de la diferencia de los resultados.

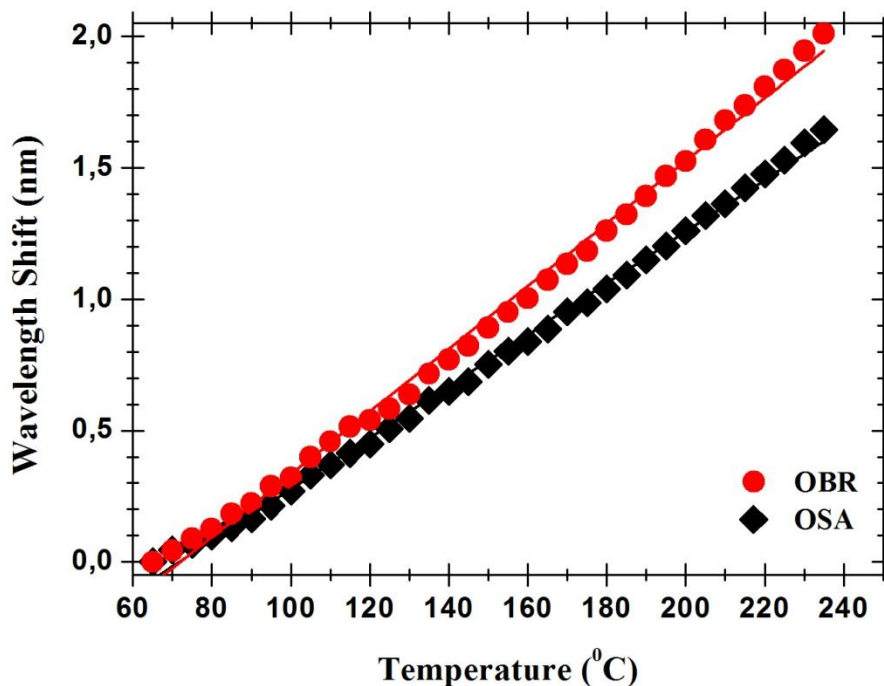


Figura 14. Desplazamiento en longitud de onda frente a temperatura

La sensibilidad de ésta cavidad Fabry-Perot se encuentra dentro del rango actual de la tecnología basada en sensores Bragg, que presenta una sensibilidad típica comprendida entre 8.4-10.6pm/°C [3], y por encima del resto de sensores basados en estructuras MOF [1].

Ésta sensibilidad a la temperatura, sumada a su habilidad para monitorizar compuestos volátiles [4], abre la posibilidad de nuevas líneas de investigación cuyo fin es la monitorización de presencia de gases.

b) Respuesta con la polarización:

Otra característica importante de ésta cavidad Fabry-Perot es la sensibilidad a los cambios de polarización. Cuando iluminamos la cavidad Fabry-Perot con luz polarizada y cambiando los estados del controlador de polarización, se obtuvieron diferentes rangos dinámicos a la salida del montaje, tal y como se puede comprobar en la Figura 15. También se observó ésta característica utilizando el OBR. La estructura MOF estudiada es birrefringente, tal y como se puede comprobar con los resultados simulados presentados en la Figura 3, donde se explica ésta sensibilidad a la polarización.

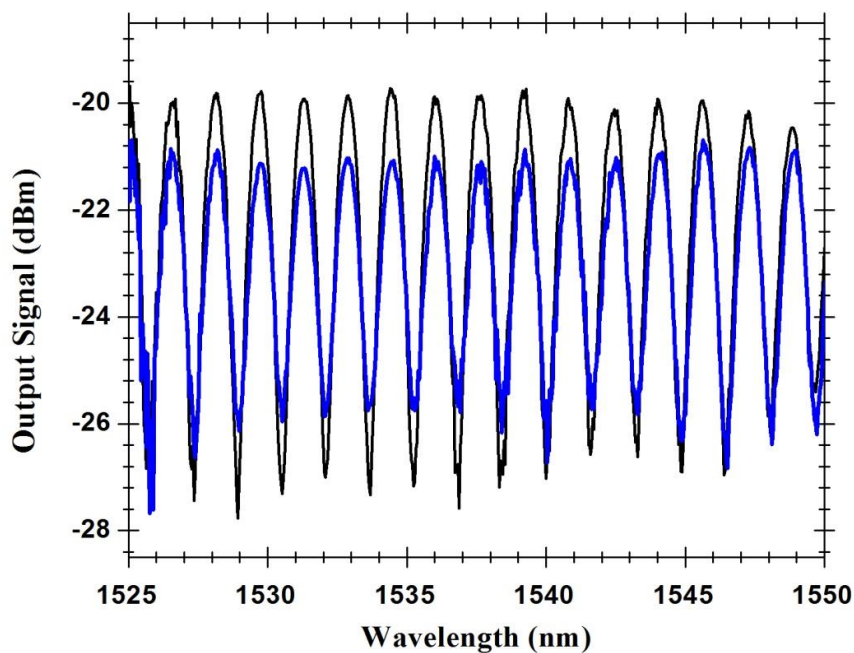


Figura 15. Rango dinámico dependiente de polarización.

c) Respuesta en el tiempo:

Con la intención de determinar la estabilidad de la señal de salida de la cavidad Fabry-Perot, se midieron las fluctuaciones de potencia y longitud de onda de la cavidad durante una hora, a intervalos de 2 minutos. La Figura 16 representa las variaciones de potencia del sensor Fabry-Perot, utilizando cada uno de los montajes presentados en la Figura 11. En un espacio de tiempo de una hora, el sensor basado en la cavidad Fabry-Perot presentó variaciones máximas de potencia de 0.297dB y 0.498dB cuando se miden con los montajes de la Figura 11 a) y b) respectivamente.

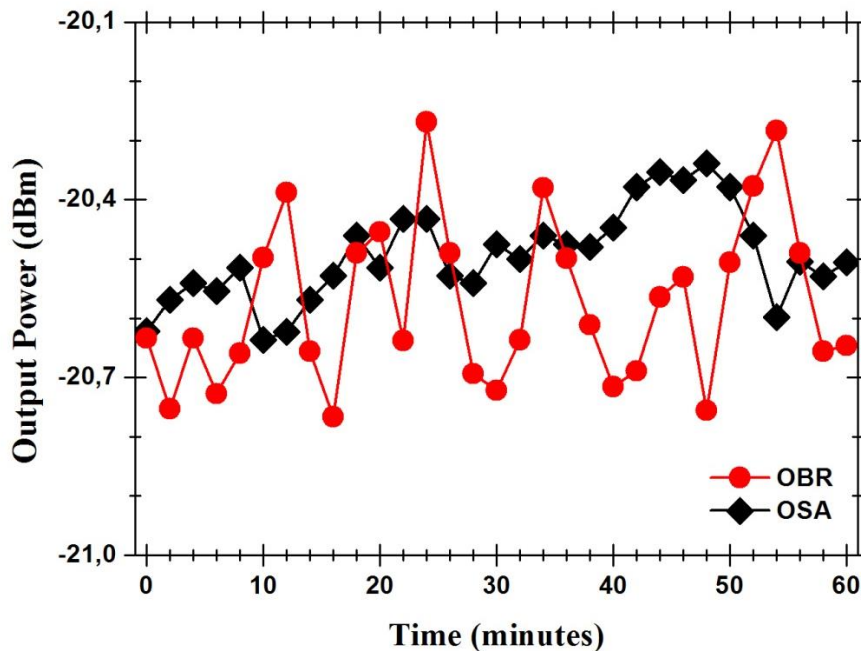


Figura 16. Fluctuaciones de potencia en el tiempo

Análogamente, la Figura 17 representa la estabilidad en longitud de onda del sensor Fabry-Perot, utilizando cada uno de los montajes presentados en la Figura 11. En un espacio de tiempo de una hora, el sensor basado en la cavidad Fabry-Perot presentó variaciones máximas en longitud de onda de 27pm y 20pm cuando se miden con los montajes de la Figura 11 a) y b) respectivamente.

La principal diferencia entre éstos resultados se debe a la resolución de los dispositivos de medida (10pm para el OSA y 0,02pm para el OBR). La diferencia en la precisión en la detección de la longitud de onda es de 180pm (en media), siendo la proporcionada por el OBR la más

exacta de las dos medidas (resultados cotejados con la herramienta de detección de longitud de onda del láser sintonizable).

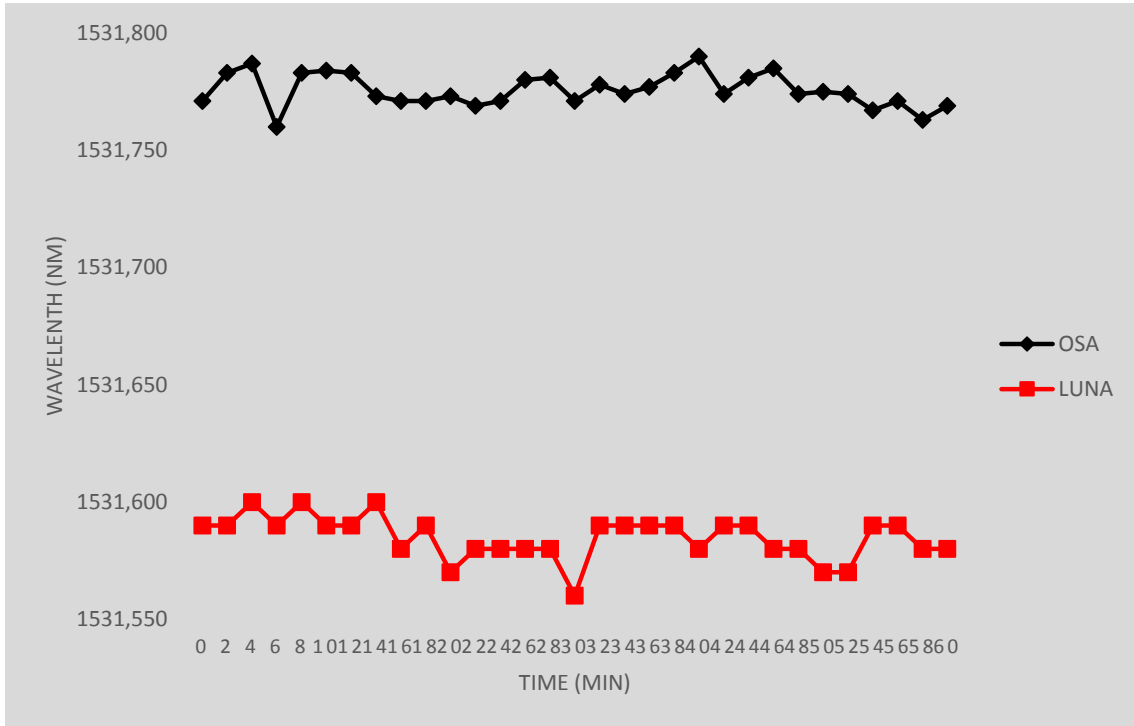


Figura 17. Fluctuaciones de longitud de onda en el tiempo.

II.6 Conclusiones

Se ha realizado un sensor de temperatura basado en una cavidad Fabry-Perot utilizando una fibra microestructurada (MOF) de cuatro puentes y forma de doble Y.

Se ha configurado y optimizado un programa de fusión para ésta fibra que produce una fusión estable sin dañar la estructura interna de las fibras.

La cavidad Fabry-Perot se ha hecho fusionando una pequeña longitud de fibra MOF de 500µm con uno de sus extremos perfectamente cortado a una fibra SMF.

La caracterización de la cavidad se llevó a cabo utilizando dos montajes diferentes, uno basado en un analizador de espectros ópticos (OSA) y el otro basado en un OBR.

El patrón de interferencia de la cavidad presenta un espaciamiento entre máximos en longitud de onda de 1.6nm, que se desplaza linealmente con los cambios de temperatura inducidos en ella.

Con este sensor se consiguieron medidas precisas de temperatura en un rango de 180°C, con una sensibilidad de:

- 9.8pm/°C con el montaje que integra el OSA.
- 11.93pm/°C con el montaje que integra el OBR.

Con unas fluctuaciones de potencia máximas de:

- 0.297dB con el montaje que integra el OSA.
- 0.498dB con el montaje que integra el OBR.

Con unas fluctuaciones en longitud de onda máximas de:

- 27pm con el montaje que integra el OSA.
- 20pm con el montaje que integra el OBR.

También se demostró el comportamiento de la cavidad Fabry-Perot, ante los cambios de polarización.

Además de sus aplicaciones como sensor de temperatura, ésta cavidad Fabry-Perot puede ser utilizada también para otras aplicaciones como monitorización de presencia de gases, láseres de fibra óptica y sistemas de multiplexación.

Éste sensor de temperatura propició una publicación en la 23ª Conferencia Internacional de Sensores de Fibra Óptica (OFS23) que tuvo lugar a principio de Junio de 2014 en Santander, España:

A. M. R. Pinto, A. Lopez-Aldaba, M. Lopez-Amo, O. Frazao, J. L. Santos, J. M. Baptista, H. Baierl, J. -L. Auguste, R. Jamier, and P. Roy. [2014, June]. *Characterization of a hybrid Fabry-Pérot Cavity based on a four-bridge double-Y-shape-core microstructured fiber*. Proc. SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 915770 (2 June 2014); doi: 10.1117/12.2059072.

Characterization of a Hybrid Fabry-Perot Cavity based on a Four-Bridge Double-Y-shape-core Microstructured Fiber

OFS 23

A.M.R. Pinto¹, A. Lopez-Aldaba², M. Lopez-Amo³, O. Frazao⁴, J.L. Santos⁵, J.M. Baptista⁶,
H. Baierl⁷, J.L. Auguste⁸, R. Jamier⁹ and P. Roy¹⁰

¹ Dept. Ingeniería Electrónica, Universidad Pública de Navarra, Campus Arrosadura s/n E-31008 Pamplona - Navarra, Spain + 34938 2976, ² Inst. de Ciencia de Materia de Aragón, ³ Centro de Caracterización de Materiales y de Experimentación, ⁴ Universidade de Minho, ⁵ Centro de Física, ⁶ 3000-350 Coruja, Portugal, ⁷ IREB, ⁸ Fís. Química, ⁹ Department, UNIV. CHR. University of Limoges, ¹⁰ 223 Avenue Albert Thomas, F-87000 Limoges Cedex, France, ¹¹ Santa Catalina State University, Dept. of Electrical Engineering, January, Santa Catarina, Brazil

Abstract

In this work, a hybrid Fabry-Perot interferometer based on a novel four-bridge microstructured fiber is presented and characterized. The characterization of this cavity is performed in the L-band using two different instruments: an optical spectrum analyzer and an optical backscatter reflectometer. The Fabry-Perot output signal presents a linear variation with temperature changes (sensitivity 9,8-11,9 pm/°C), sensitivity to the polarization states of light and high stability.

Experimental set-up

a) Broadband Light Source → C → OSA → FP Cavity

b) OBR → FP Cavity

Four-Bridge Double-Y-shape-core MOF

- Thin silica bridges (900nm thick).
- Elongated core of 3,2µm by 1,07µm.

The core shape can be seen as:

- single structure that propagates super-modes
- or
- Two coupled-cores

Fabry-Perot Cavity

INSTRUMENTATION

- Broadband Light Source working @ 1530-1610 nm
- Q6384 Optical Spectrum Analyzer (10 pm resolution)
- Optical Backscatter Reflectometer 4600 (Luna Technologies).

Experimental results

Output Signal

Variation with Temperature

Polarization States

Stability in Time

Conclusions

- A Fabry-Perot cavity based in a new four-bridge double-Y-shape-core MOF has been fabricated and characterized.
- Two different set-ups were used based in two different optical analyzers: OSA and OBR.
- Interference pattern with a wavelength spacing of 1,6 nm.
- Linear sensitivity to Temperature of 9,8-11,9 pm/°C in a range of 180°C.
- Maximum power instability of 0,5 dB in a hour span.
- Suitable for applications such as laser cavities and WDM multiplexing due to its multi-channel output signal.

ACKNOWLEDGMENTS: The authors are grateful to the Spanish Government projects TEC2010-20224-C02-01, to the INTERREG SUDOE Project "ECOAL-MGT - Ecological Management of Coal Waste Piles", SOE3/P2/P714, to Innocampus and to CAPES BJT-CSF A60/2013 .

Referencias

- [1] Y. K. Dong, X. Y. Bao, and L. Chen, "Distributed temperature sensing based on birefringence effect on transient Brillouin grating in a polarization-maintaining photonic crystal fiber," *Opt Lett*, vol. 34, no. 17, pp. 2590-2592, Sept 2009.
- [2] L. Labonté, D. Pagnoux, P. Roy, Faouzi, Bahloul, M. Zghal, "Numerical and experimental analysis of the birefringence of large air-fraction slightly unsymmetrical holey fibres", *Opt Comm*, vol. 262, pp. 180-187, Dic 2005.
- [3] M. Fernandez-Vallejo, S. Diaz, R. A. Perez-Herrera, D. Passaro, S. Selleri, M. A. Quintela, J. M. L. Higuera, and M. Lopez-Amo, "Resilient long-distance sensor system using a multiwavelength Raman laser," *Measur Scienc Tech*, vol. 21, no. 9, pp. 094017 (9), Jul 2010.
- [4] J. P. Moura, H. Baierl, J.-L. Auguste, R. Jamier, P. Roy, J.L. Santos, and O. Frazão, "Opt Lett, vol. 39, no. 13, pp. 3868-3871, Jul 2014.

III. SENSOR DE TENSION BASADO EN FIBRA MICROESTRUCTURADA DE NÚCLEO SUSPENDIDO.

Con la misma fibra utilizada para la construcción y caracterización del sensor de temperatura, presentado en el apartado XX1 y 2 del capítulo II, se fabricó un sensor para medidas de tensión.

La descripción de la fibra, sus características y caracterización numérica son similares a las presentadas en el apartado II.1.

A su vez, la técnica de fusión y el programa utilizados son los mismos que los presentados en el apartado II.2.

III.1 Micro-posicionador Ealing 61-0329

Se trata de un dispositivo que permite el estirado de las fibras de forma controlada, con precisión micrométrica y que puede ser controlado bien de forma manual o remotamente a través del programa desarrollado en la UPNA [1].

El micro-posicionador empleado se muestra en la Figura 1:



Figura 1. Micro-posicionadores Ealing 61-0329

Estos micro-posicionadores permiten controlar su posición de forma micrométrica en un rango de 6,5mm de dos formas:

- De forma manual a través del tornillo regulador presentando una precisión de 1µm.
- De forma remota a través del software específico con precisión de 0,1µm.

Permite una precisión de lectura sobre el propio micro-posicionador de 10µm (una división = 10µm). Y las características de carga se presentan en la Tabla 1.

Capacidad de carga	
Vertical (kg)	Horizontal(kg)
3	0,5

Tabla 1. Capacidad de carga del micro-posicionador.

Para un control preciso del dispositivo, se utilizó el software propietario desarrollado en el laboratorio [1]. La Figura 2 muestra el interfaz gráfico de dicho software.

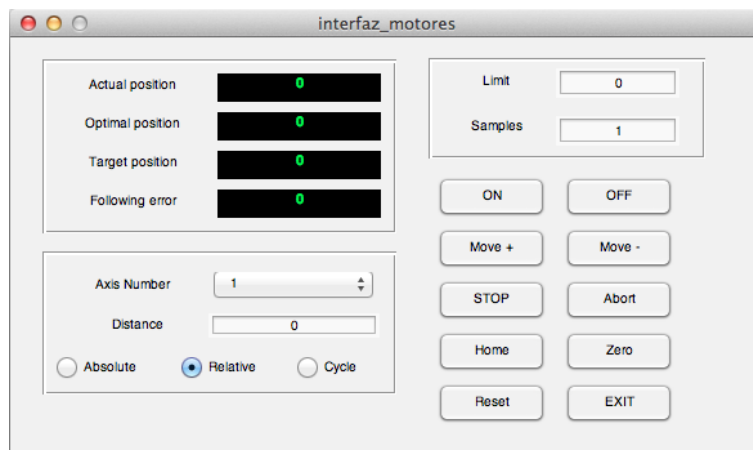


Figura 2. Interfaz gráfico del programa de control del micro-posicionador.

Las opciones de movimiento, *Absolute* y *Relative*, controlan la posición del dispositivo. Introduciendo la distancia a mover y haciendo uso de los botones “Move +” y “Move -” se realiza el movimiento, positivo o negativo. Después de ejecutar el movimiento se actualizan las posiciones y se muestran por pantalla.

La opción restante *Cycle*, permite realizar barridos de movimiento tanto de subida como de bajada. Se introducen como parámetros de entrada el paso a mover, el límite de posición y el número de muestras que se desean por cada paso realizado. Además se debe seleccionar uno de los ejes disponibles y habilitarlo pulsando el botón “ON”. Esto hace que en la interfaz aparezca un botón de *Start* donde antes se encontraban los botones *Move +* y *Move -*.

Al pulsar dicho botón se activa un temporizador que da inicio a un bucle de movimiento.

Adicionalmente, como se observa en la Figura 2, existen una serie de botones cuyas funcionalidades son las siguientes:

- *Abort*: aborta cualquier tipo de movimiento para uno o varios ejes.
- *Stop*: Se encarga de parar uno o varios ejes en uso.
- *Zero*: Se utiliza para poner a cero la posición actual en el eje activo.
- *Home*: Al pulsarlo se vuelve a la posición inicial.
- *Reset*: Realiza un reset completo del controlador o de los ejes que no estén activos en ese momento.
- *Exit*: Cierra la tanto la conexión con los motores, como la interfaz del interrogador y deshabilitará todos los ejes.

III.2 Construcción del dispositivo sensor

El objetivo fue caracterizar la fibra microestructurada de núcleo suspendido (MOF) como sensor de temperatura.

En este caso, dados los requisitos necesarios para caracterizar la fibra en tensión, no era posible utilizar una estructura tipo Fabry-Perot como en el caso del sensor de temperatura. Dados los requisitos de los motores que se encargan del estirado automático de las fibras, se utilizó una longitud de fibra para el sensor de 10cm.

Debido a que en este caso no existieron las dificultades de manipulación que sí presentó la construcción del dispositivo sensor de temperatura, no fue necesario llevar a cabo el proceso de fusión tal y como se plantea en el capítulo II.

En este caso seleccionando la fibra de 10cm (tras aplicar los cortes a ambos extremos) se fusionó directamente con una fibra SMF.

Los resultados en cuanto a pérdidas obtenidos coinciden con los del capítulo II, dando 13dB de pérdidas.

El proceso de alineado fue, nuevamente, similar al realizado en el capítulo II, utilizando un montaje en reflexión a través de un circulador, como muestra la Figura 3, utilizando una fuente de luz blanca y el OSA.

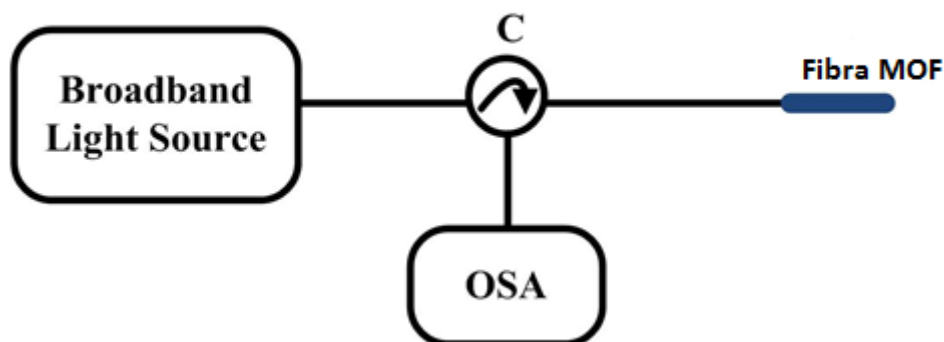


Figura 3. Esquema de montaje para el alineado.

III.3 Resultados

En la caracterización del sensor se utilizó un montaje, basado en el OBR, tal y como se muestra en la Figura 4.

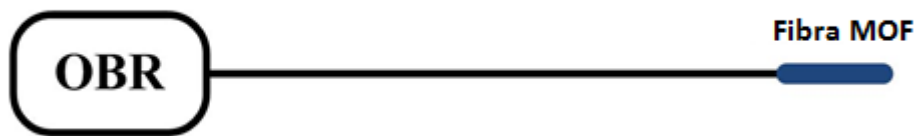
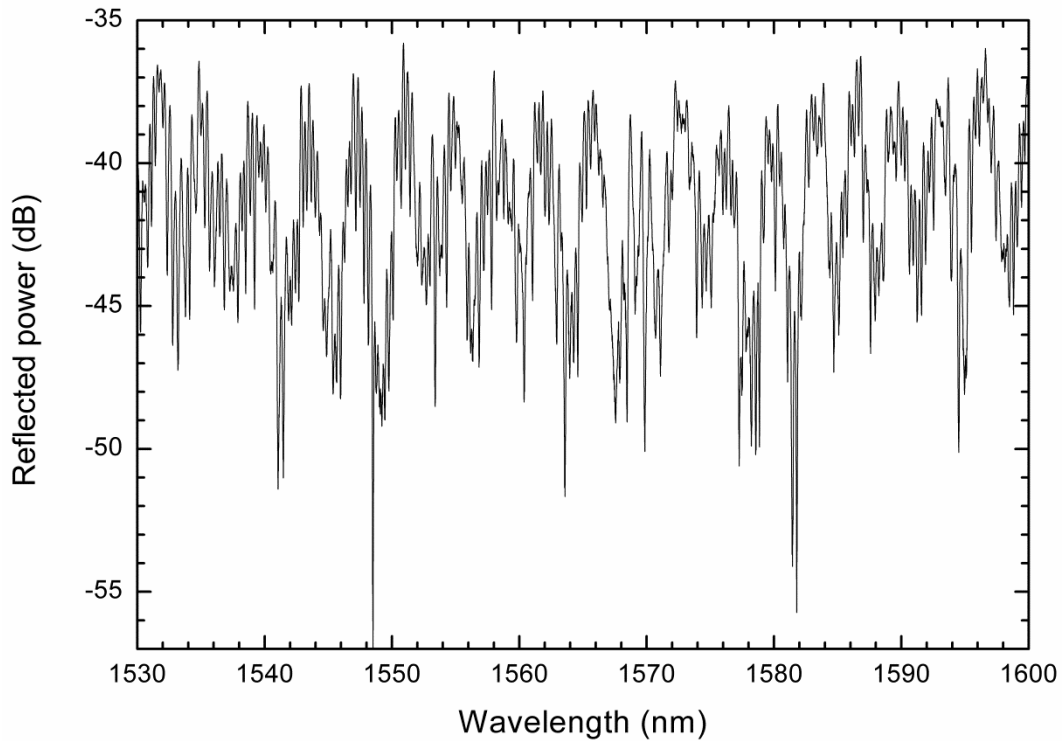
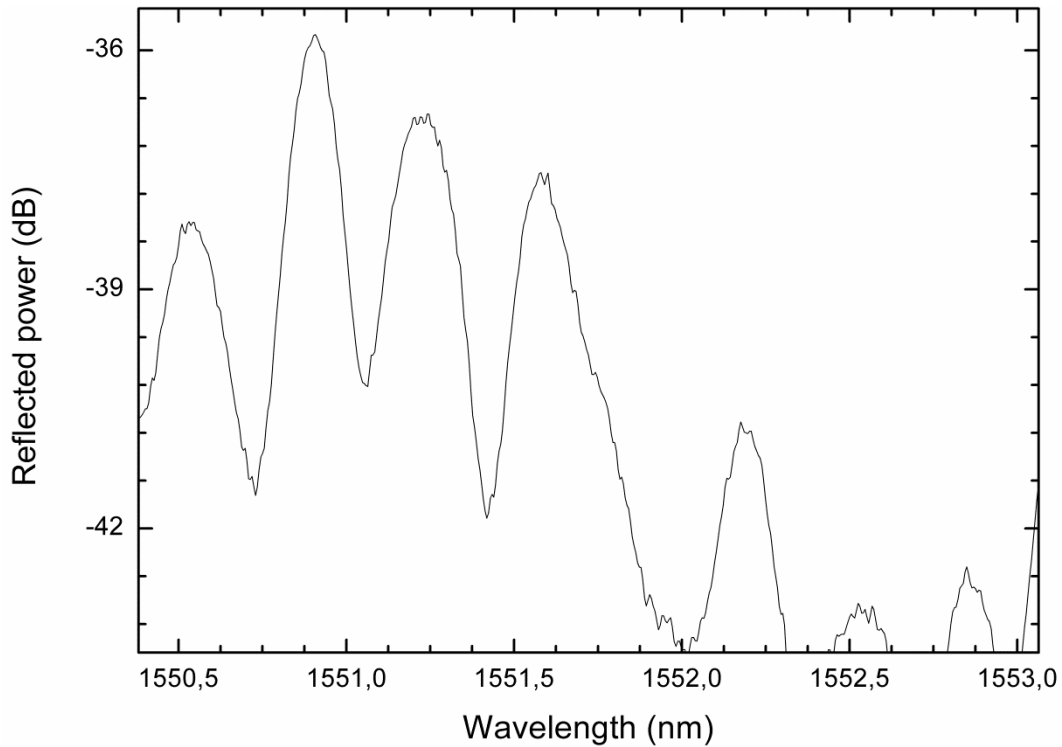


Figura 4. Montaje en reflexión con OBR.

El espectro obtenido del sensor se muestra en la Figura 5.



a)



b)

Figura 5: a) espectro del sensor; b) detalle de la interferencia.

Como se observa en la Figura 5 b) el espectro muestra un patrón de interferencia de periodo $\approx 0,8\text{nm}$. La apreciación de ésta interferencia con la resolución del OSA resultó inviable.

Como se observa en la Figura 5 a), la señal obtenida consta de dos componentes. Una de alta frecuencia que produce la interferencia mostrada en la Figura 5 b) y otra de menor frecuencia que es la causante de la modulación de la señal como se observa en la Figura 5 a).

La Figura 6 muestra la magnitud de la Transformada rápida de Fourier de la señal.

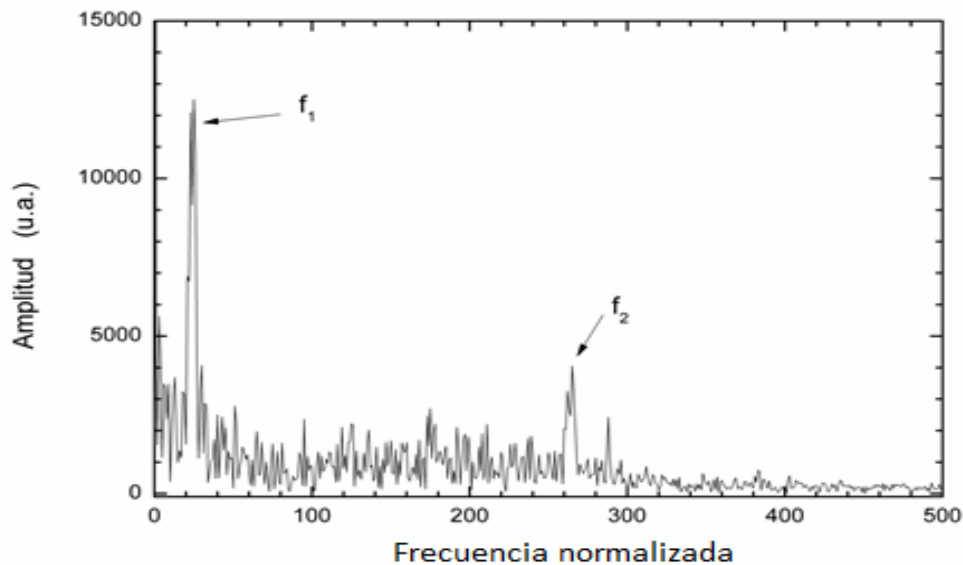


Figura 6. Transformada de Fourier de la señal.

En la Figura 6 se aprecian con claridad los dos picos correspondientes a las dos componentes presentes en la señal. La componente f_1 corresponde a la señal moduladora apreciable en la Figura 5 a) mientras que la componente f_2 corresponde a la interferencia mostrada en la Figura 5 b).

El origen de estas dos señales proviene de la naturaleza de la fibra. Tal y como se he explicado en el capítulo II, la fibra es multimodo y altamente birrefringente y cada una de las componentes espectrales corresponde a una de estas dos características.

La componente de alta frecuencia f_2 es causada por la interferencia de los distintos modos guiados en la fibra, mientras que la componente de baja frecuencia f_1 es causada por la diferencia de velocidades de propagación de las dos componentes polarizadas de la luz y se asemeja a una modulación en amplitud de la señal resultante.

La caracterización numérica de la fibra, aportada por sus fabricantes del XLIM, tan sólo tiene información acerca del modo fundamental guiado en la fibra. Dadas las características físicas del núcleo cabía esperar su comportamiento multimodal. La Figura 7 muestra imágenes del laboratorio de la distribución real de potencia de los modos guiados en el interior de la fibra cuando es iluminada con luz roja (620-750nm).

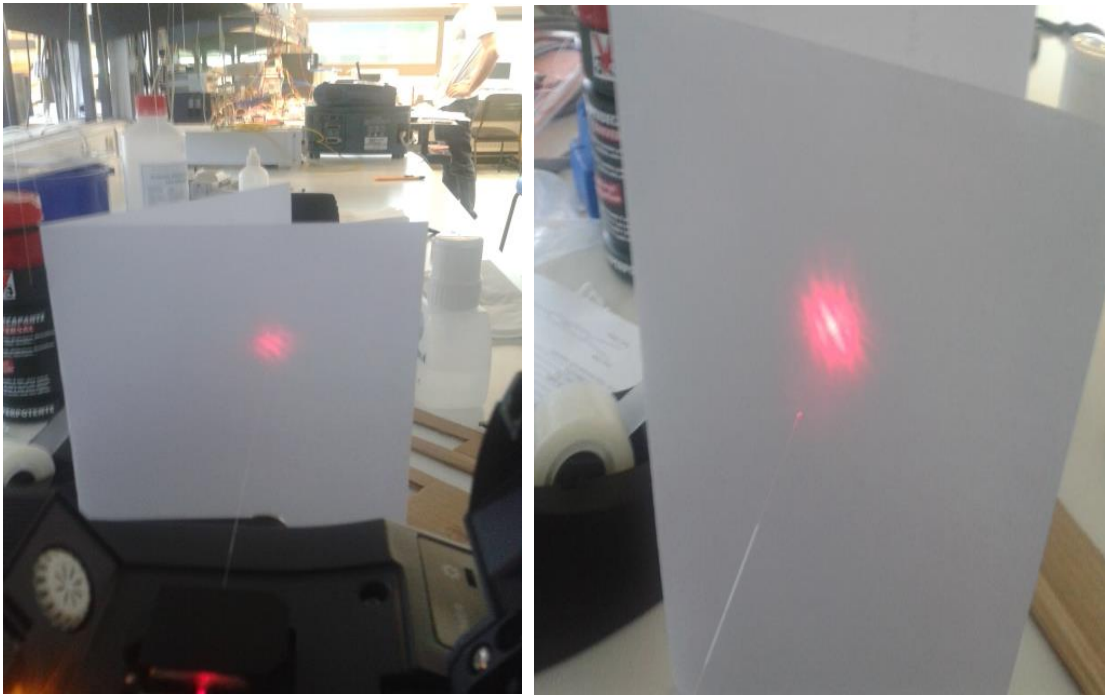


Figura 7. Imagen de los modos guiados en la fibra.

En la imagen detallada de la derecha se puede observar con claridad la superposición de al menos dos modos. Uno de ellos el modo fundamental con la distribución de potencia centrada y el otro de ellos el modo transversal electromagnético TEM_{02} . La Figura 8 muestra los esquemas de éstos dos modos de polarización.

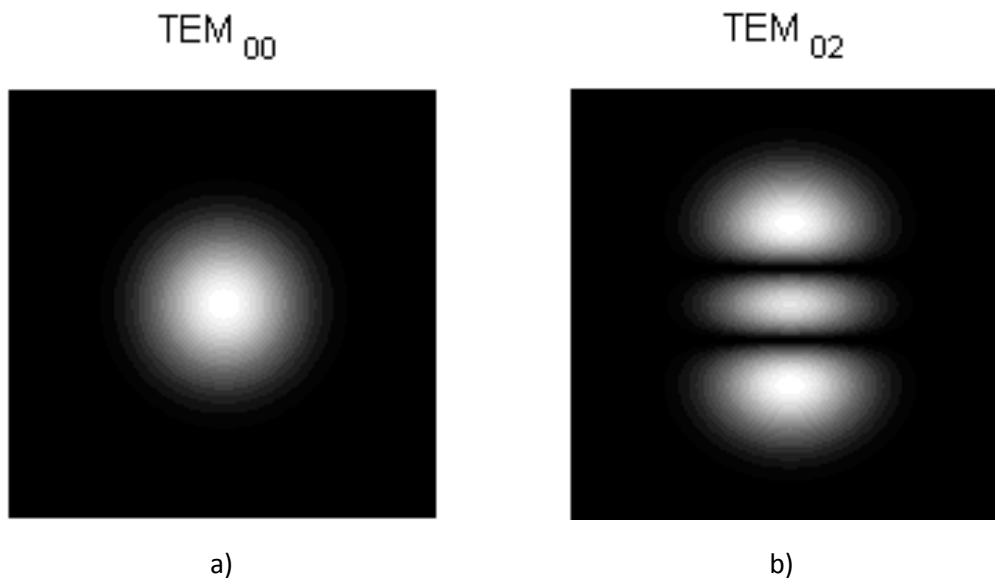


Figura 8: a) distribución de potencia del modo fundamental TEM_{00} ; b) distribución de potencia del modo TEM_{02} .

Para la caracterización de la fibra como sensor de posición, se posicionó la fibra MOF mediante epoxi a una posición fija mientras el extremo del sensor se colocó (también mediante epoxi) en el micro-posicionador tal y como se representa en la Figura 9.

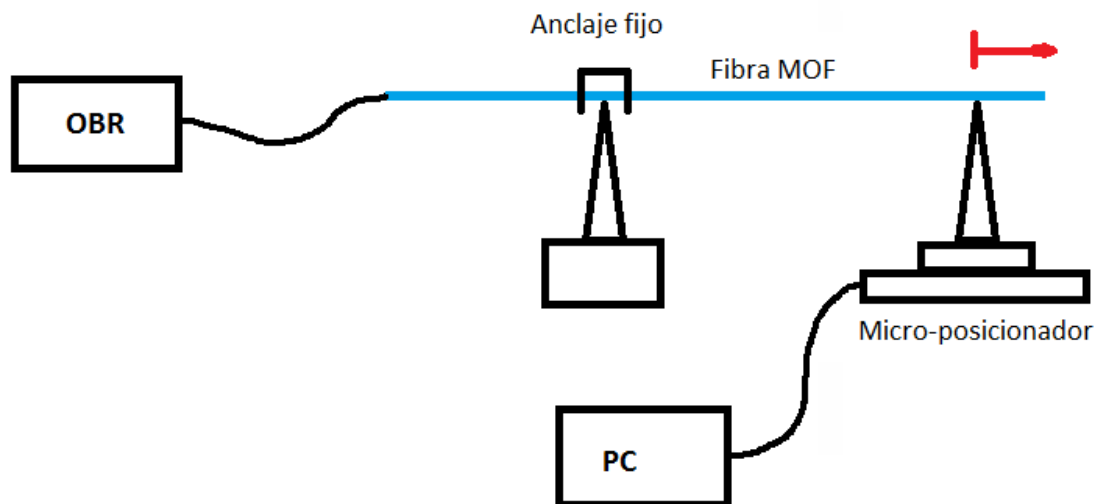


Figura 9. Esquema del montaje de medición.

Los resultados del estiramiento controlado de la fibra produjeron un desplazamiento en longitud de onda de la señal recogida en el OSA, pero debido al corto período de la interferencia de alta frecuencia, no fue posible determinar correctamente la sensibilidad del sensor al solaparse los períodos entre sí.

Para determinar la sensibilidad del sensor se utilizó la Transformada de Fourier de la señal resultante. El desplazamiento de la señal en longitud de onda inducido se traduce en cambios de fase en la Transformada de Fourier.

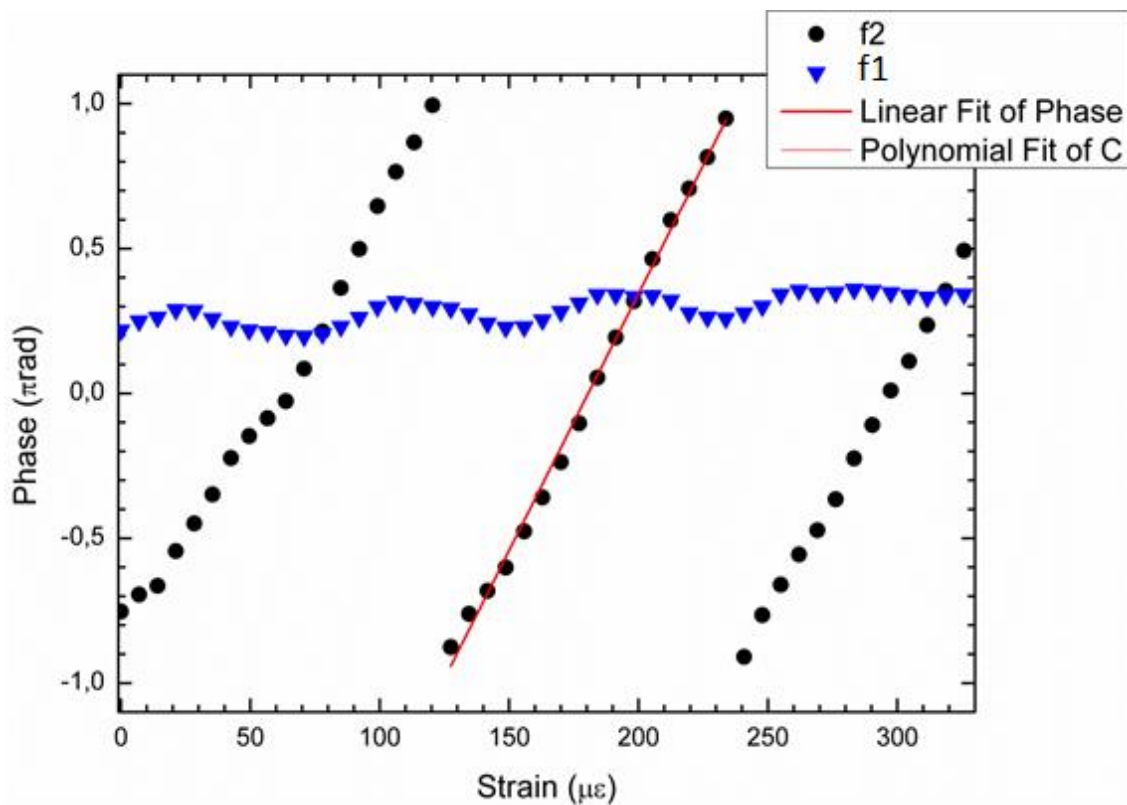


Figura 10. Respuesta en fase de la Transformada de Fourier del sensor.

En la Figura 10 se representa la evolución fase de la Transformada de Fourier de las dos componentes espectrales anteriormente comentadas, f1 y f2.

Como se observa en la figura, el estiramiento de la fibra produjo una respuesta senoidal para la componente de baja frecuencia f1 (debida a la birrefringencia de la fibra) y una respuesta lineal para la componente f2 (debida a la interferencia de los diferentes modos propagados por la fibra).

A la luz de los resultados, queda patente el interés del comportamiento de la componente de alta frecuencia f2 en la caracterización del sensor, presentando una sensibilidad de $0,018\pi$ rad/ $\mu\epsilon$.

III.4 Conclusiones

Se ha realizado un sensor de tensión utilizando una fibra microestructurada (MOF) de cuatro puentes y forma de doble Y.

Caracterización numérica de la fibra, técnicas de fusión y programa de optimizado de fusión similares a los presentados en el capítulo II.

El sensor se ha creado fusionando una pequeña longitud de fibra MOF de 10cm con uno de sus extremos perfectamente cortado a una fibra SMF.

La caracterización de la cavidad se llevó a cabo utilizando un montaje en reflexión basado en el OBR y en el mirco-posicionador con su software de control [1].

El sensor presenta una respuesta interferométrica con dos componentes espectrales predominantes, una de baja frecuencia producida por la naturaleza birrefringente de la fibra y una de alta frecuencia producida por la interferencia de los distintos modos guiados.

El estudio de la sensibilidad del sensor se ha llevado a cabo a través del estudio de la Transformada de Fourier de la señal y observando la evolución de la fase con el estiramiento.

La interferencia de alta frecuencia presenta una respuesta lineal en fase con el estiramiento de la fibra dando una sensibilidad de $0,018\pi \text{ rad}/\mu\epsilon$.

IV. DESARROLLO DE UN SENSOR DE GAS BASADO EN FIBRAS DE CRISTAL FOTÓNICO.

El objetivo final de ésta línea de investigación constaba de dos requisitos independientes:

- Conseguir sensores para los diferentes gases definidos por el proyecto ECOAL-MGT:
 - o Amoníaco (NH₃)
 - o Dióxido de carbono (CO₂)
 - o Metano (CH₄)
- Realizar los sensores con las fibras de cristal fotónico proporcionadas por el proyecto (concretamente por el XLIM).

Para ello, se contó con las mismas fibras que se presentaron en el capítulo del sensor de temperatura y adicionalmente nuevas fibras con novedosas estructuras diseñadas explícitamente para la detección y monitorización de gases ya que permiten la interacción directa del campo evanescente con el medio que rodea al núcleo.

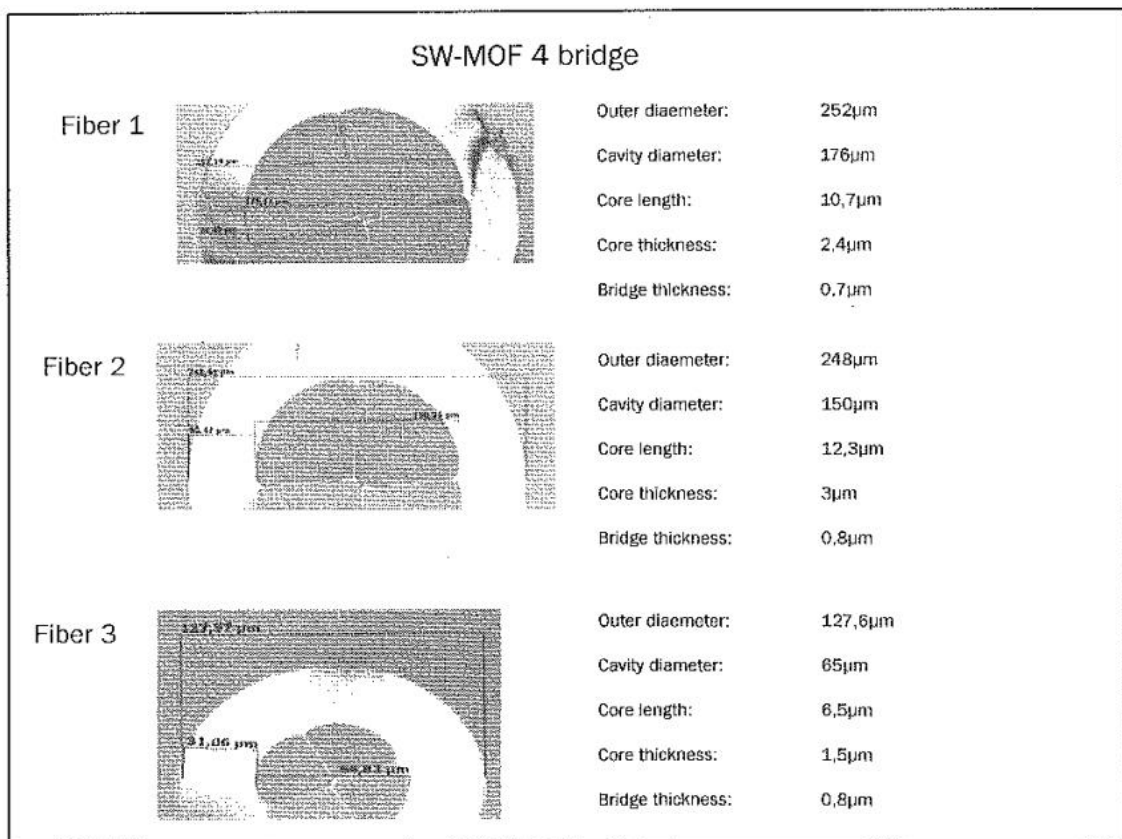


Figura 1 a) Fibras MOF

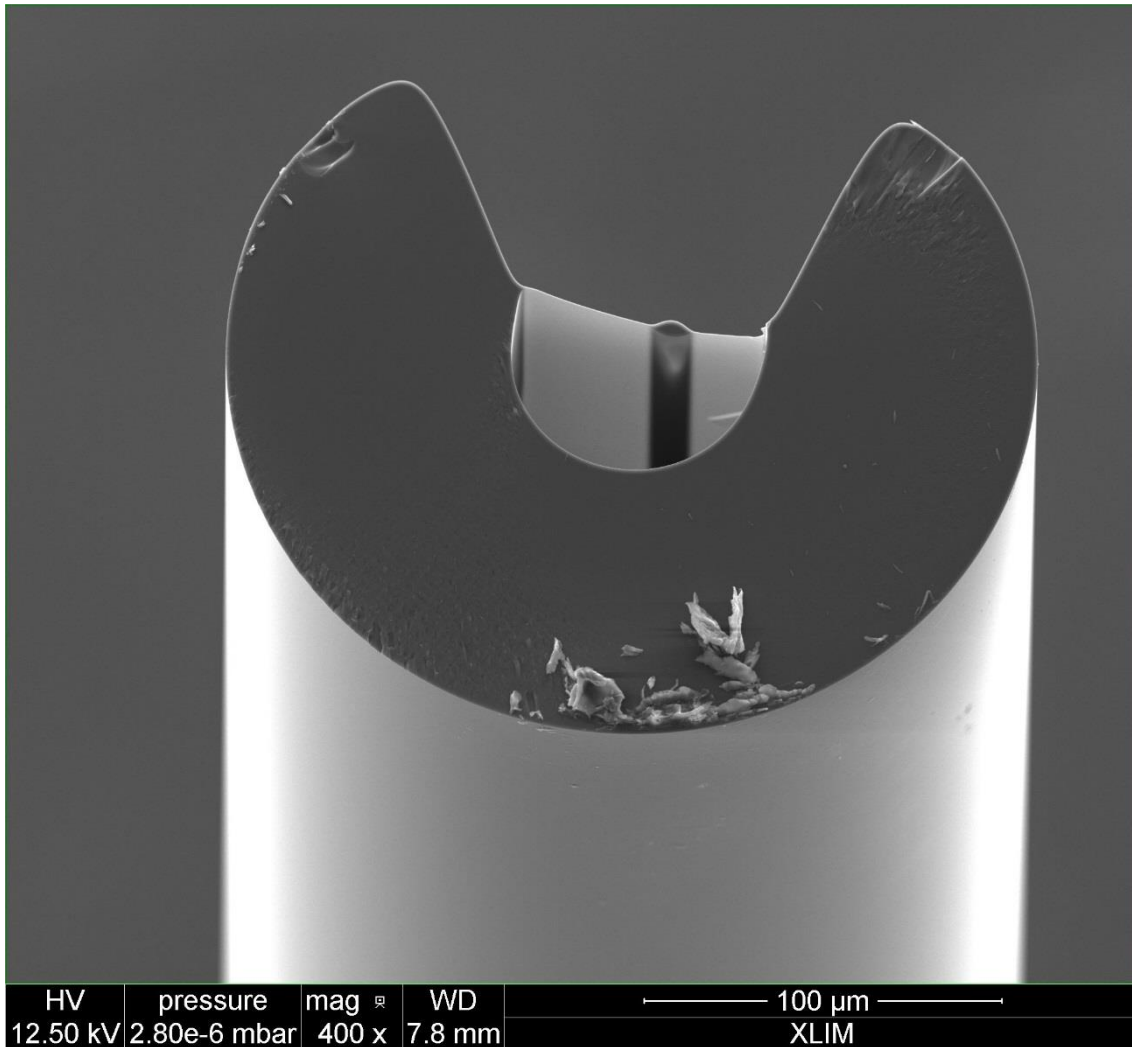


Figura 1 b) Fibras especiales para detección de gases OSF

En la Figura 1 a) se presentan las fibras microestructuradas MOF con las cuales se trabajó para la construcción del sensor de temperatura (descritas en el capítulo II).

En la Figura 1 b) se presentan las nuevas fibras. Para su distinción se decidió catalogarlas como Fibras OSF (*Open Side Fiber*).

Dado que las Fibras OSF suponen una nueva línea de investigación, en éste capítulo se tratará con detalle todo el proceso seguido para la manipulación de las fibras y la construcción

de los sensores intentados, así como los resultados obtenidos, a través de los cuales queda totalmente caracterizada la fibra.

IV.1 Características de las fibras OSF

Para el desarrollo de los sensores de gas, se proporcionó por parte del XLIM, dos fibras inicialmente a las cuales finalmente se añadió un tercer tipo de fibra. Todas ellas tienen la misma distribución física, diferenciándose únicamente en las dimensiones de sus elementos. La estructura común de estas fibras se muestra en la Figura 1 b).

Estas fibras son catalogadas dentro de las fibras de cristal fotónico de núcleo sólido y más concretamente se pueden catalogar dentro de las llamadas SCF (*Suspended Core Fibers*) o fibras de núcleo suspendido ya que su núcleo se encuentra “suspendido” entre huecos de aire sujetado a la cubierta a través de finos puentes (2 puentes en el caso de éstas fibras).

Las Figuras 2 a) y b) muestran las dimensiones de dos ejemplos de la fibra más grande de las tres proporcionadas:

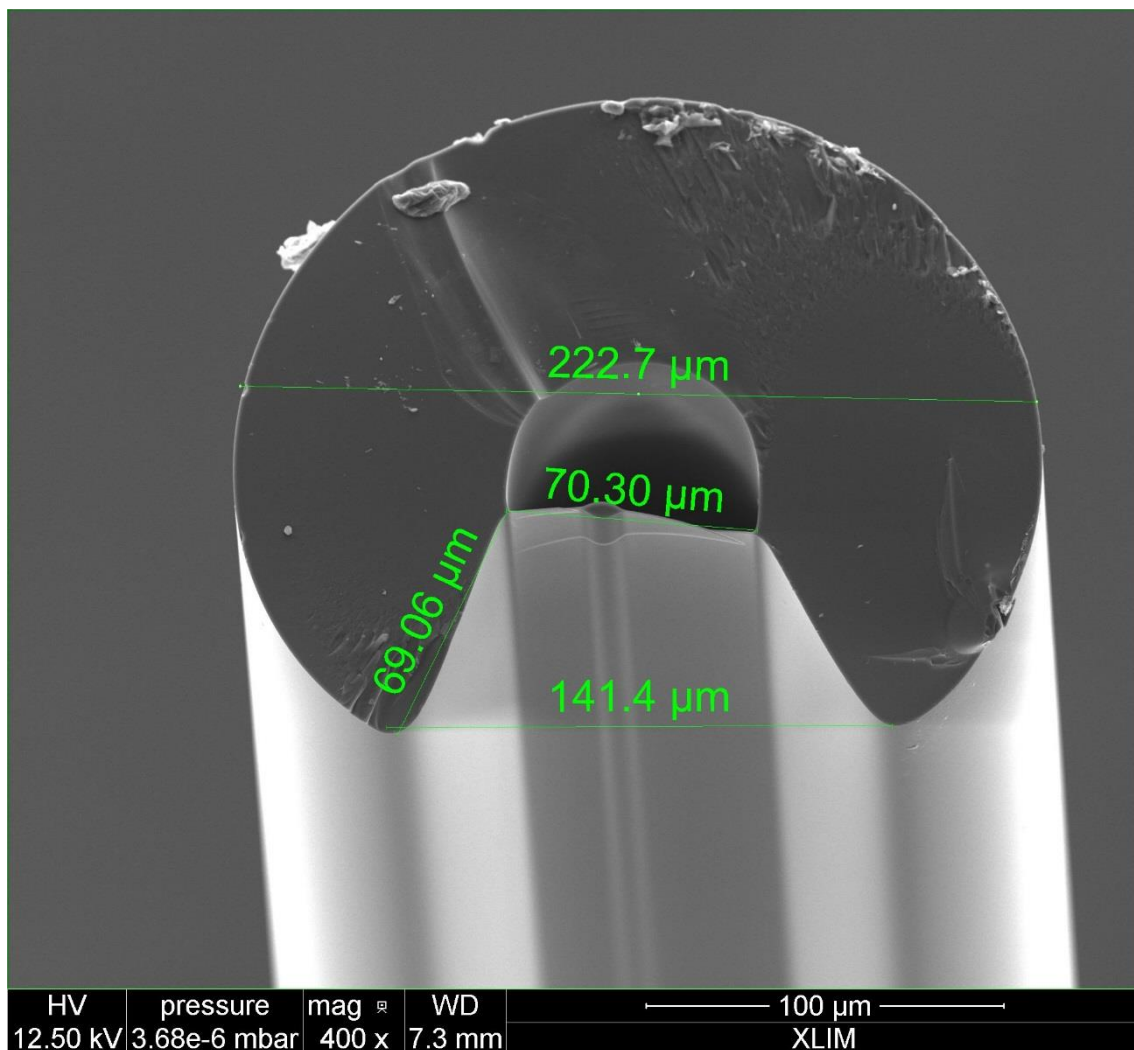


Figura 2 a). Dimensiones de la fibra (ejemplo 1)

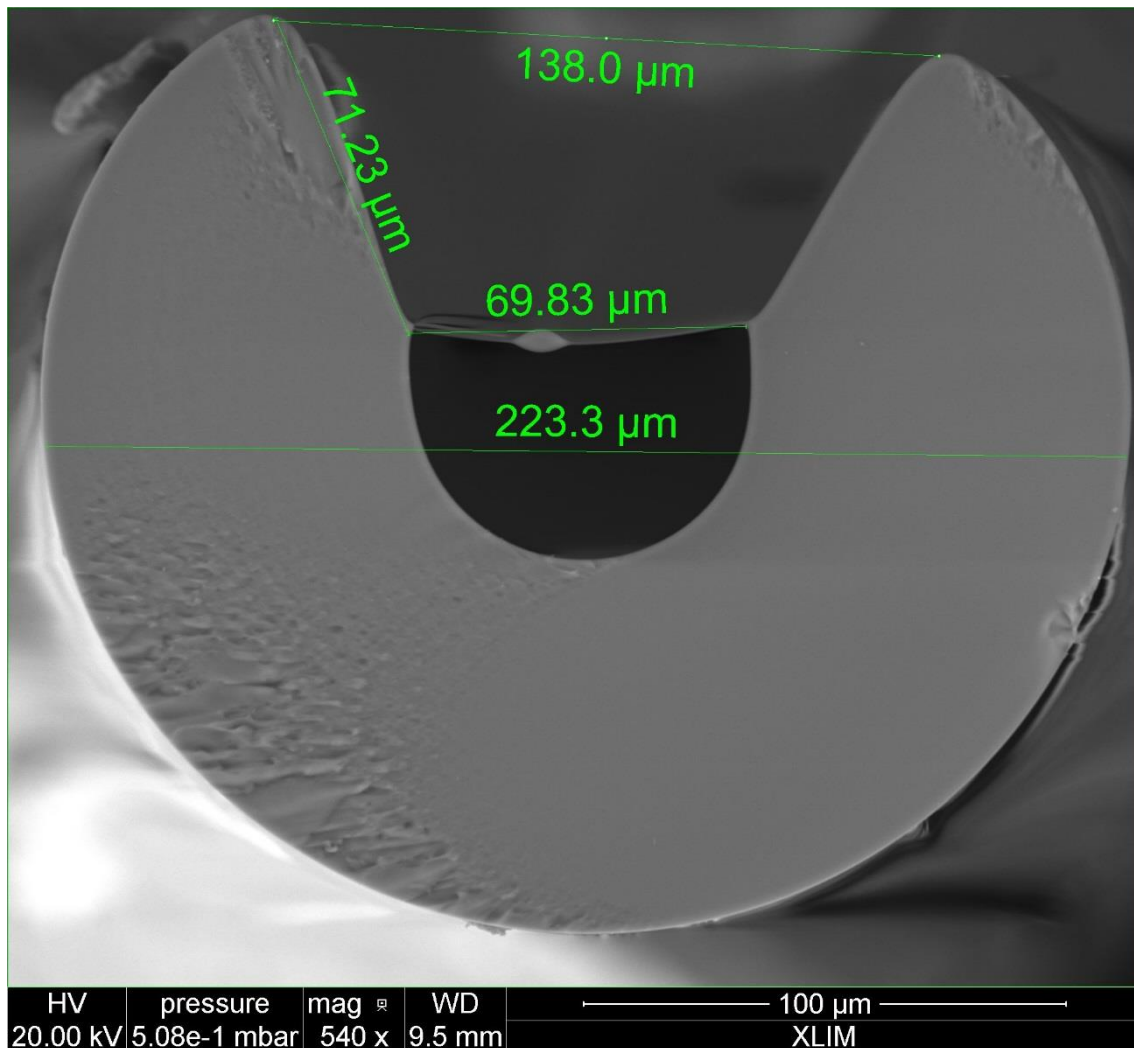


Figura 2 b). Dimensiones de la fibra (ejemplo 2)

El diámetro externo de la fibra es de $225\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$. En el interior de la fibra existen dos grande huecos, separados entre sí por el núcleo, suspendido entre ellos a través de dos puentes. Uno de éstos huecos queda expuesto al exterior de la fibra. El hueco no expuesto al exterior presenta forma de semicírculo con diámetro de $70\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$. El hueco que forma la abertura hacia el exterior de la fibra tiene forma de trapecio con dimensiones en su base ancha de $140\mu\text{m} \pm 4\mu\text{m}$ y $70\mu\text{m} \pm 2\mu\text{m}$ (coincidiendo con el diámetro del hueco) en su base estrecha.

La zona del núcleo está compuesta por un núcleo de forma de óvalo de dimensiones $5\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ por $11\mu\text{m} \pm 1\mu\text{m}$ suspendido entre ambos huecos por dos puentes (el expuesto al exterior y el interior, recordemos, no expuesto) de anchura de $550\text{nm} \pm 100\text{nm}$. En las Figuras 3 a) y b) se muestran unan imágenes al microscopio de dichas zona:

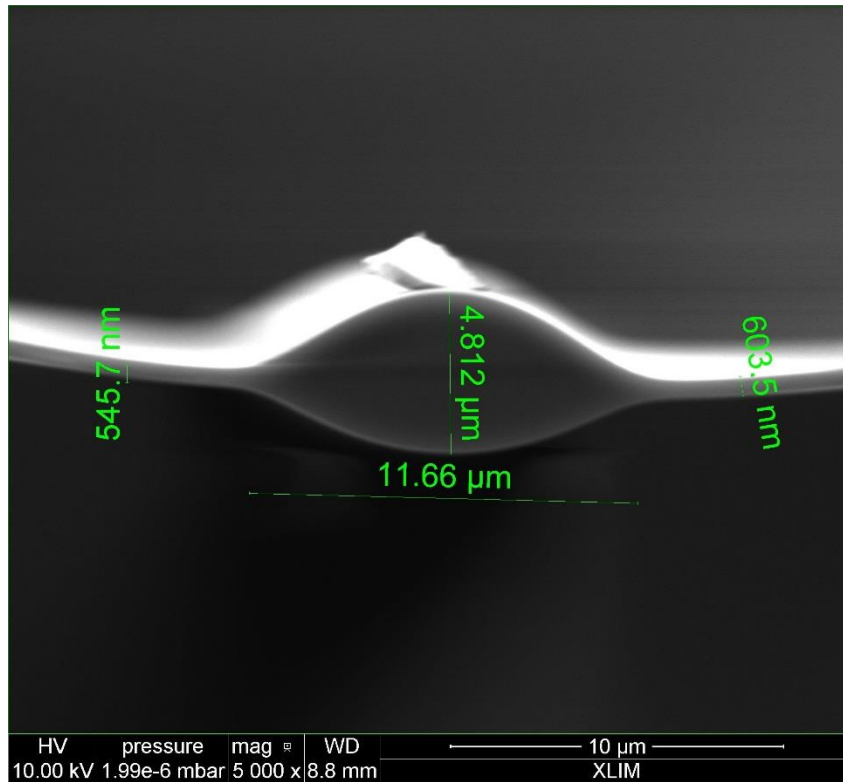


Figura 3 a). Dimensiones del núcleo de la fibra (ejemplo 1)

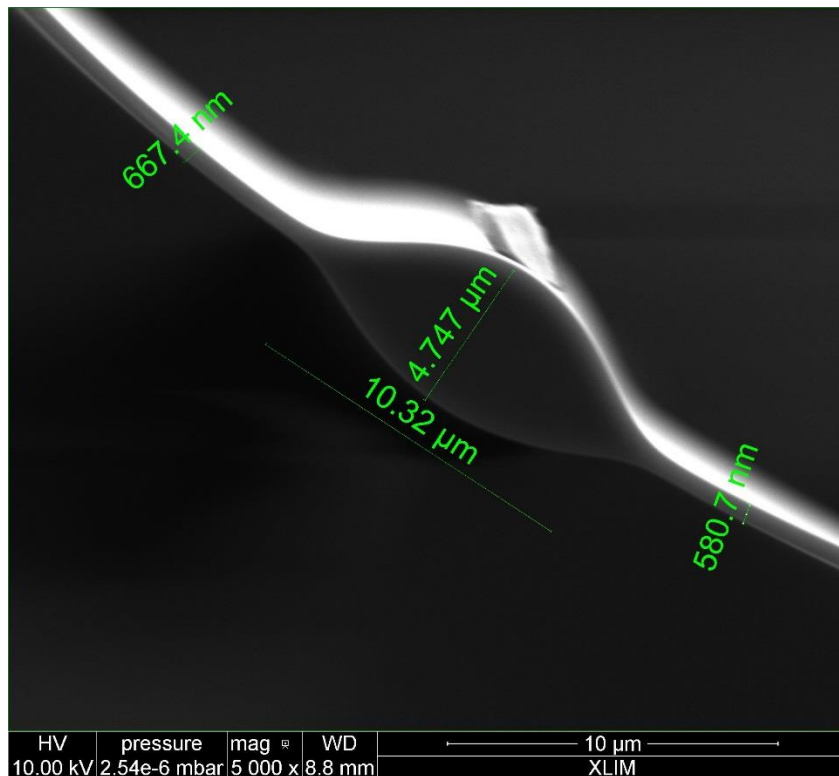


Figura 3 b). Dimensiones del núcleo de la fibra (ejemplo 2)

A ésta fibra se decidió nombrarla como Fibra 4 OSF para distinguirla del resto.

Otra de las fibras proporcionadas y estudiadas, la más pequeña de las tres, nombrada como Fibra 2 OSF, mantiene la misma estructura y dimensiones del núcleo, pero se diferencia de la presentada en las dimensiones externas de la fibra, concretamente en el diámetro de la cubierta siendo ésta de $125\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$, coincidiendo éstas dimensiones a las de las fibras estándar, tanto monomodo como multimodo. Ésta nueva fibra lo que nos proporciona son unas mejores características en cuanto a la resistencia de la fusión con fibras estándar (detallado en el capítulo I.5) manteniendo las características del núcleo y su interacción con el entorno.

Por último la tercera fibra difiere de las ya descritas tanto en sus características externas como en las internas, y se nombró como Fibra 3 OFS.

Ésta nueva fibra supone un paso intermedio entre las Fibras 2 y 4 en cuanto a diámetro externo, con $200\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$, pero dimensiones diferentes en cuanto a núcleo. Las dimensiones de los puentes se mantienen, y el núcleo pasa a reducir su tamaño, manteniendo su forma ovalada (o de lenteja), siendo éste de $3,5\mu\text{m} \pm 0,5\mu\text{m}$ por $6\mu\text{m} \pm 0,5\mu\text{m}$.

La principal ventaja que ofrecen estas nuevas fibras es la exposición de parte del núcleo al medio que rodea la fibra. De éste modo, ésta estructura permite la interacción del campo evanescente con los agentes presentes en el medio (recordar que tan solo una parte del núcleo está expuesta al exterior).

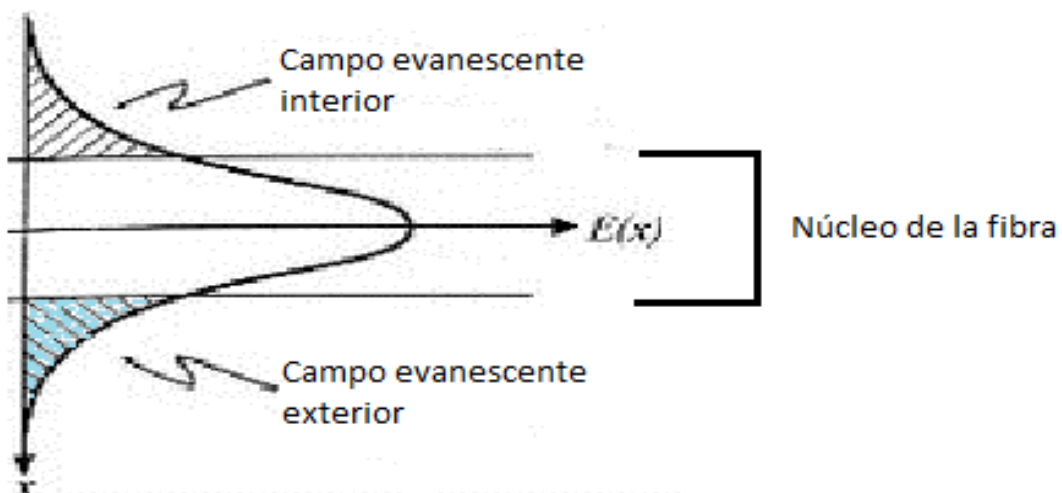


Figura 4. Esquema de la distribución de campo en una fibra

Tal y como se observa en la Figura 4 (detallado en el capítulo de I.2.1) la zona del campo evanescente sombreada entra en contacto directo con el medio que rodea a la fibra. Éste hecho proporciona la capacidad de discernir diferentes situaciones en función del agente que se encuentre en el medio que rodea a la fibra, y la influencia que tiene éste en la propagación de la luz.

Asimismo, dadas las características y dimensiones del núcleo de la fibra, con sus dos dimensiones diferenciadas en los ejes X e Y, la fibra se presenta como birrefringente.

Un resumen de las dimensiones de las fibras se presenta en la Tabla 1:

Fibra	Diámetro cubierta (μm)	Eje X núcleo (μm)	Eje Y núcleo (μm)	Anchura puentes (nm)	Diámetro hueco (μm)
Fibra 4 OSF	225	11	5	550	70
Fibra 3 OSF	200	6	3,5	550	70
Fibra 2 OSF	125	11	5	550	70

Tabla 1. Dimensiones de las fibras

Otras fibras

En éste capítulo también se utilizaron otro tipo de fibras no proporcionadas por el XLIM. Se trata de fibras de cristal fotónico del tipo SCF. En éste caso el núcleo de la fibra se encuentra suspendido entre 3 grandes huecos y fijado a la cubierta a través de 3 puentes tal y como muestra la Figura 5.

Ésta fibra fue cedida por el IPHT Jena, Alemania, representada en la Figura 5, cuyo diámetro externo es similar a las fibras monomodo y multimodo estándar, de $125\mu\text{m}$, con un núcleo de $2,5\mu\text{m}$ de diámetro y un diámetro total de los huecos (el conjunto de los tres) de $44\mu\text{m}$.

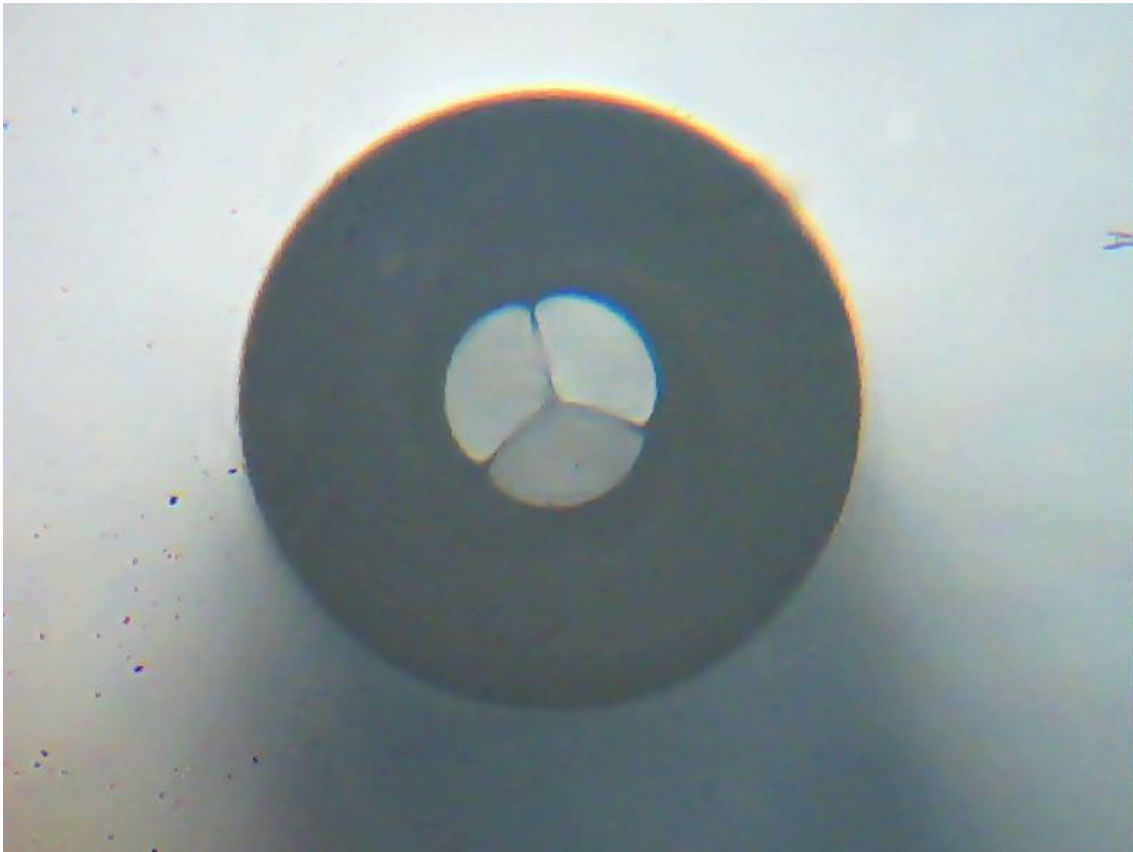


Figura 5. Imagen al microscopio de la fibra cedida por el IPHT Jena.

IV.2 Material específico

Para el desarrollo y optimización de los sensores basados en fibras de cristal fotónico para la monitorización de gases era necesario disponer de material específico para permitir el estudio así como garantizar la seguridad en el laboratorio.

Este equipo específico constó básicamente de una cámara de gas adaptada para su trabajo con fibra óptica, un panel de control gases para la gestión del caudal de gas que se inyecta a la cámara y el decapante químico necesario para la preparación de las fibras.

IV.2.1 Cámara de gas

El objetivo de los sensores a desarrollar es medir la presencia y concentración de los gases:

- Amoníaco (NH_3)
- Dióxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)

Tal y como se ha explicado en el capítulo de introducción, el amoníaco (NH_3) es tóxico (irritante y corrosivo con las mucosas) e inflamable en concentraciones superiores al 30% y el dióxido de carbono (CO_2) no es un gas tóxico ni inflamable, pero su presencia en grandes concentraciones es potencialmente peligrosa para la salud ya que desplaza la concentración de oxígeno en el aire, lo cual incide directamente sobre la calidad del aire respirado. Por su parte el metano (CH_4) no es tóxico (aunque presenta el mismo efecto de desplazamiento de oxígeno) pero si inflamable y explosivo, siendo su punto de inflamación de -188°C .

Todos estos factores hicieron indispensable la construcción y utilización de una cámara de gas estanca en la que realizar las mediciones para prevenir posibles accidentes.

La construcción de la cámara se llevó a cabo por parte de la empresa Hutipre S.L y el resultado se muestra en la Figura 6:



Figura 6. Imagen de la cámara de gas.

Dicha cámara no estaba inicialmente diseñada para su uso con fibras ópticas en su interior y por ello fue necesaria su modificación. Para ello se le construyeron cuatro entradas en los laterales para permitir el acceso a las fibras. Se colocaron dos fibras monomodo en uno de los laterales y dos fibras multimodo en el lado opuesto. Las modificaciones se llevaron a cabo a través de la empresa Hutipre. El resultado final de las modificaciones se presenta en la Figura 7.



Figura 7. Modificaciones en la cámara de gas.

IV.2.2 Panel de control gases

Para la introducción de gas de manera controlada en el interior de la cámara se dispuso de un panel de control de gases desarrollado por el equipo del laboratorio de sensores, así como de su software de control.



Figura 10. Panel de control de gases.

Este panel permite controlar el caudal de gas inyectado a través de su software asociado, permitiendo la inyección de un gas puro (con la pureza dada por la botella contenedora) o de la mezcla de varios gases, controlando la proporción de cada uno de ellos.

A efectos prácticos, a pesar de conocer el funcionamiento del panel de control de gases, apenas se ha utilizado para la investigación tal y como se justificará en los apartados siguientes.

IV.2.3 Decapante químico

Tal y como se presentará en el apartado dedicado a la preparación de las fibras, la retirada del revestimiento de plástico protector de la fibra supuso una tarea adicional no prevista inicialmente por dos motivos:

- Las dimensiones (cubierta externa) de las fibras imposibilitan el uso de los *strippers* convencionales ya que parten las fibras.
- En las fibras de dimensiones similares a las SMF (para las cuales están diseñados los *strippers*) el revestimiento, por su composición o fraguado en su construcción, se encuentra fuertemente fijado a la cubierta, lo cual entorpece la labor de retirada del revestimiento de las fibras con los *strippers*.

Como solución se ha utilizado un decapante químico para materiales plásticos, mostrado en la Figura 11.

La aplicación de éste tipo de decapantes permite retirar el revestimiento plástico de la fibra sin afectar a la cubierta de sílice.

Es de vital importancia prestar una especial atención a que el decapante no colapse los huecos de las fibras y a retirar los restos de solución una vez retirado el revestimiento. Para ello, como en el resto de procesos de limpieza de fibras se utiliza alcohol etílico aplicado con gamuzas de limpieza.



Figura 11. Decapante universal utilizado.

IV.3 Construcción del sensor

El objetivo final de la investigación era la realización, optimización y utilización de sensores de presencia de los gases descritos en el proyecto, utilizando fibras de cristal fotónico, y concretamente las fibras proporcionadas por el XLIM.

Para ello se dispuso inicialmente de dos fibras, Fibra 2 OSF y Fibra 4 OSF y posteriormente una más, la Fibra 3 OSF, descritas en detalle anteriormente en el apartado III.1.

La idea principal de la investigación es la detección de gases a través de la interacción directa entre el campo evanescente de la fibra y el medio que la rodea. Tal y como se ha explicado en el capítulo I.2.1 sobre el campo evanescente, éstas fibras proporcionan oportunidades únicas para el estudio de ésta interacción y de sus propiedades, al disponer las fibras de una parte del núcleo completamente expuesta al medio que las rodea.

Para el estudio se propusieron distintas configuraciones tanto en reflexión como en transmisión, así como diferentes fuentes de luz y receptores tanto ópticos como eléctricos.

IV.3.1 Preparación de la fibra

Como en todos los estudios realizados, el primer paso para preparar la fibra fue la retirada del revestimiento plástico exterior para dejar la cubierta de la fibra (sílice) al desnudo.

El método básico de pelado de la fibra es mediante la utilización de strippers específicos de fibra óptica, pero estos strippers tienen una limitación básica: su diseño los hace útiles exclusivamente para fibras de diámetros de cubierta del orden de la fibra monomodo estándar, es decir $125\mu\text{m}$ (si bien es cierto que disponen de un tornillo que permite regular el diámetro final de ataque del stripper, pero dado el orden de unidades, la micra, ajustar éste diámetro a mano es una tarea complicada que tiene altas probabilidades de convertirse en irreversible al no poder volver a ajustar el diámetro para fibras de $125\mu\text{m}$).

De modo que para retirar la cubierta de la Fibra 4 OSF ($225\mu\text{m}$ de diámetro de cubierta) fue necesario otro método. Para la Fibra 2 OSF ($125\mu\text{m}$ de diámetro de cubierta), teóricamente el *stripper* debería haber trabajado bien, pero se demostró experimentalmente que no es así. Por las características físicas de la fibra (al tener un “huevo” significativo en uno de los laterales), el

stripper no era capaz de despegar el revestimiento de la cubierta, produciendo roturas en la fibra y en definitiva, partiendo la fibra.

Al tratarse el revestimiento de un material plástico, la solución consistió en deshacer el polímero para así, a través de un simple gesto arrastrar el revestimiento de la cubierta.

Para ésta tarea, inicialmente se aplicó calor a través de la llama de un mechero convencional. Este método demostró ser eficaz derritiendo el polímero, y por tanto retirando el revestimiento, pero la aplicación de un cambio brusco de temperatura a la fibra (tanto en el momento de acercar la llama como en el momento de retirarla y su posterior enfriamiento) afectó a la robustez de la estructura interna de la fibra (siendo especialmente sensibles los puentes de la fibra), dando lugar a roturas de la fibra al someterla a fuerzas de curvatura.

Para evitar estos cambios tan bruscos de temperatura, se introdujo la fibra en un horno cerámico en el cual se aumentó la temperatura desde la temperatura ambiente hasta 250°C de manera progresiva.

Este método también resultó efectivo a la hora de retirar el revestimiento, pero de nuevo produjo roturas en la fibra debido al cambio de temperatura.

El decapante universal (presentado en el apartado III.2.3) supuso la alternativa adecuada para la retirada del revestimiento.

El decapante se aplicó de forma uniforme sobre la fibra con la ayuda de un bastoncillo y algodón. El tiempo de actuación del decapante sobre la fibra fue de entre unos 10 y 15 minutos, cuanto más tiempo se dejó actuar al decapante, con mayor facilidad se retiraba el revestimiento, sin afectar a la estructura de la fibra. Con 10 minutos resultó suficiente para su efectividad.

Transcurrido el tiempo de actuación, con ayuda de un papel para eliminar el residuo de la fibra se retira la cubierta. Como se ha comentado anteriormente, es importante retirar los restos de decapante que hayan podido quedar sobre la fibra por dos motivos:

- Impedir que interfieran en la señal
- Impedir que en el proceso de fusión (aplicación del arco voltaico) se volatilicen y dañen la fibra.

Para ello el proceso consistió en introducir la fibra en alcohol durante 2 horas, extracción y secado con ayuda de papel de laboratorio. Este proceso se repitió dos veces para asegurar el limpiado de las fibras.

Este proceso se realizó simultáneamente para varios fragmentos de fibra para agilizar su procesado tal y como se muestra en la Figura 12 tomada en el laboratorio.



Figura 12. Decapante actuando sobre las fibras

El último proceso de limpieza consistió en introducir la fibra en alcohol de nuevo durante dos horas para finalmente dejar secar al aire y evitando la suspensión de polvo sobre ellas. De este modo también se retira cualquier impureza que haya podido quedar como consecuencia de su manipulación con el papel de limpieza del laboratorio.

El resultado de éste proceso fue la retirada del revestimiento plástico exterior y la limpieza de la fibra de cualquier resto de decapante así como de impurezas ambientales. Además, la fibra resiste a fuerzas de curvatura (aplicadas manualmente) y mantiene su estructura interna.

En la Tabla 2 se resumen los resultados de los métodos de decapado estudiados:

Método	Retirada de revestimiento	Daños estructurales
Aplicación de calor directo mediante llama	Si	Si (rotura inmediata)
Aplicación de calor gradual mediante horno	Si	Si (rotura tras aplicar fuerzas de curvatura)
Decapante químico universal	Si	No

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos.

Para su manipulación y su estudio, tal y como se procede con el resto de fibras del mercado, era necesario aplicar cortes perpendiculares en los extremos de la fibra, extremos que serían los puntos de unión entre la fibra y las fuentes de luz o bien interfaces finales de fibra (como es el caso de un sensor en reflexión).

Para el cortado fue necesaria una herramienta de cortado fibras. Estas herramientas, inicialmente diseñadas para fibras de 125 μ m, disponen de cavidades genéricas para poder utilizar sobre fibras de diferentes tamaños, así como una posición universal que permite su utilización con cualquier diámetro de fibra.

El funcionamiento básico de la cortadora consiste en una vez fijada la fibra, una cuchilla realiza una fina incisión sobre ella que tras un golpe seco (una vibración intensa) produce la fractura de la fibra.

Para las fibras convencionales y la mayoría de fibras (incluidas las fibras de cristal fotónico) la posición relativa de la fibra una vez colocada en la cortadora con la cuchilla es irrelevante ya que la mayoría de las fibras son simétricas y una incisión en cualquier zona de su superficie propicia la fractura total y homogénea de la fibra.

En nuestro estudio, al tratarse de fibras asimétricas, con un hueco en un lateral, la posición de la fibra en la cortadora resultó determinante. Una posición inadecuada producía que la cuchilla no realizara la incisión con suficiente profundidad o que el corte no fuera homogéneo. Además, el tamaño de la fibra también influyó, junto con la posición en el corte realizado.



Figura 13. Lupa de relojero.

Para el posicionamiento de las fibras en el interior de la cortadora se utilizó como referencia el hueco de la fibra y para su localización se precisó la ayuda de una lupa de relojero de 10 aumentos, presentada en la Figura 13, ya que la fibra no era distinguible a simple vista.

En la Figura 14 se muestra un esquema del funcionamiento de la cortadora con una fibra de similares características a las utilizadas. De las múltiples posiciones aleatorias que puede tomar la fibra una vez colocada en la cortadora, tan solo la posición en la que el hueco de la fibra queda mirando hacia arriba (es decir, la sección gruesa de cubierta entra en contacto con la cuchilla) resultó efectiva en el proceso de cortado. Esto es debido a las fuerzas de rotura que sufre la fibra con el golpe que efectúa la cortadora una vez la incisión ya se ha producido.

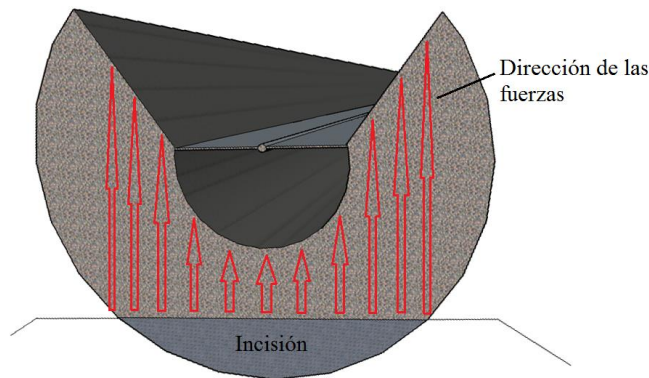


Figura 14 a) Esquema de la posición de la fibra en la cortadora.

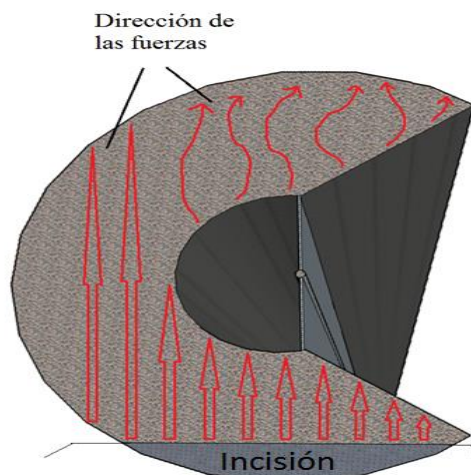


Figura 14 a) Esquema de la posición de la fibra en la cortadora.

Si la fibra se encuentra en la posición que muestra la Figura 14 a) (con el hueco no mirando hacia arriba) la cuchilla realiza correctamente la incisión, pero al fracturarse la fibra por el efecto del golpe, las fuerzas se ejercen en dirección paralela a la incisión, encontrando en algún momento el hueco en su camino. El hueco, en este momento, actúa como barrera de la vibración e impide que la parte de la fibra que queda al otro lado se vea afectada de forma similar al resto, produciéndose la fractura de forma arbitraria, y no de forma paralela como se desea.

Si la fibra se encuentra en la posición óptima, mostrada en la Figura 14 b), la vibración se propaga de forma paralela y aunque en ciertas zonas también encuentra el hueco, detrás de él no existe fibra que deba de ser fracturada, por tanto toda la fibra se ve afectada por la vibración en dirección paralela al corte.

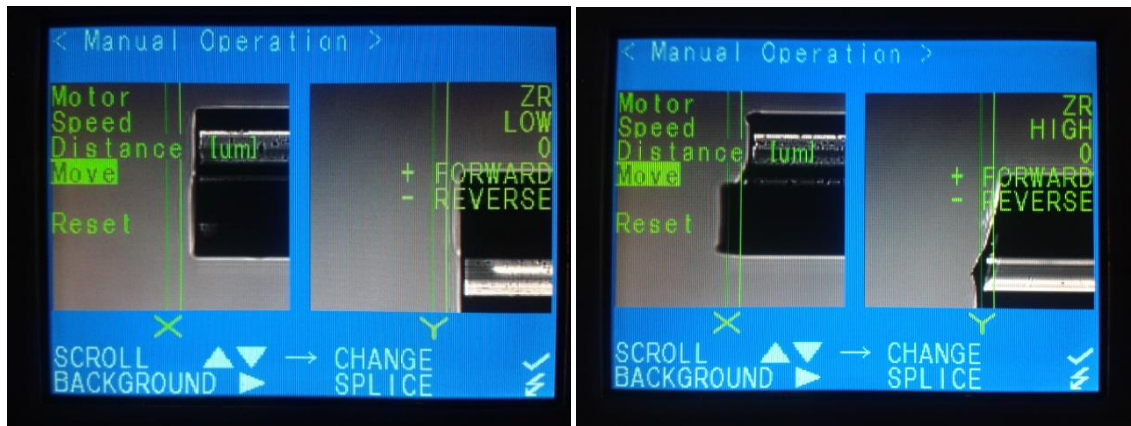
Este proceso resultó de especial importancia en la Fibra 4 OSF dadas sus dimensiones. Para la Fibra 2 OSF se consideró inicialmente menos relevante dado que sus dimensiones externas coincidían con las dimensiones para las cuales está diseñada la cortadora, pero a pesar de ello, en ciertas ocasiones los resultados obtenidos no eran satisfactorios. Aplicando el método anteriormente expuesto, se demostró que también mejoraban los resultados de forma notable.



La Figura 15 muestra el proceso de distinción de la posición del hueco a través de la lupa de relojero. Las imágenes fueron tomadas a través de la lupa, de ahí su baja calidad.

Figura 15. Localización del hueco de la fibra en la cortadora.

En la Figura 16 se muestran los resultados del proceso de cortado en los casos en los que se utilizó el método de cortado, Figura 16 a), y en el caso posicionando la fibra de forma aleatoria en la cortadora, Figura 16 b).



a) b)
 Figura 16. Resultados de cortes: a) utilizando el método; b) en posición aleatoria

IV.3.2 Posicionamiento de la fibra en la fusionadora

Con la fibra tratada para su fusión, la siguiente etapa fue su posicionamiento en la fusionadora.

El posicionamiento de fibras estándar no suele requerir ningún tratamiento previo por parte del operador de la máquina fusionadora debido a la estructura simétrica de las fibras. En este grupo de fibras se encuentran las fibras monomodo y multimodo estándar, fibras compensadoras de dispersión, fibras de cristal fotónico, etc, que en resumen, cuentan con unas características físicas externas similares: la cubierta exterior protege totalmente el interior de la fibra, son completamente sólidas, y son de núcleo simétrico a excepción de las fibras birrefringentes.

Ya sea el caso de las fibras estándar (cuyo interior es macizo) o fibras del tipo Suspended Core, la cubierta exterior actúa de protectora del interior frente al arco voltaico que aplica la fusionadora. Este no es el caso de nuestras fibras. Al tener una parte de la fibra constituida por un hueco, sin cubierta exterior, tanto el núcleo como los puentes quedaban totalmente

expuestos al arco voltaico. Es de especial relevancia la exposición de los puentes, ya que debido a su reducido grosor, son especialmente vulnerables.

Se comprobó experimentalmente en el laboratorio, que la posición relativa del hueco con respecto al punto de aplicación de arco de la fusionadora, no afectaba a la conservación de la estructura de la fibra, siendo igual de vulnerable cuando el hueco queda enfrente al punto de aplicación del arco, como cuando queda en la posición opuesta. Esto es debido a que aunque el arco se aplica de forma puntual, envuelve la totalidad de la fibra (derrite toda la fibra por igual, no afecta en mayor medida a la parte que está enfrente al punto de aplicación) y por tanto, independientemente de dónde se encuentre posicionado el hueco, se va a ver afectado por el arco.

El estudio que demostró tener gran relevancia en cuanto a la conservación de la estructura de la fibra es el de la distancia de la fibra al punto de aplicación del arco.

Este estudio se realizó a través de la pantalla de la fusionadora, por tanto son medidas relativas (el desplazamiento de la fibra en la pantalla no corresponde a un desplazamiento real de la misma distancia).

Para la medición de las posiciones de las fibras en la pantalla de la fusionadora se desarrolló una rejilla, mostrada en la Figura 17, que permite la medición de distancias expresadas en milímetros con respecto a un punto central. La rejilla está dividida en dos, cada una de ellas para medir uno de los ejes en los que muestra la posición la fusionadora.



a)

b)

Figura 17: a) pantalla sin rejilla; b) pantalla con rejilla

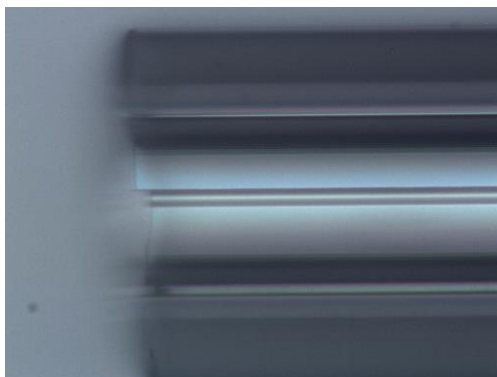
La Figura 17 a) muestra una imagen de la pantalla original de la fusionadora (en la imagen se muestra la pantalla del programa de fusión manual) mientras que la Figura 17 b) muestra la pantalla con la rejilla superpuesta.

Las dos líneas verticales (en cada uno de los ejes) muestran los puntos de partida, siendo considerados éstos los puntos 0 (entre ellos se aplica el arco). Del punto 0 hacia la derecha contamos unidades negativas y hacia la izquierda unidades positivas. Como costumbre colocamos siempre la fibra sensora en la parte derecha de la fusionadora, por tanto, al alejarla del punto de aplicación del arco siempre trabajaremos con unidades de distancia negativas (ej: -5, -10, -15mm).

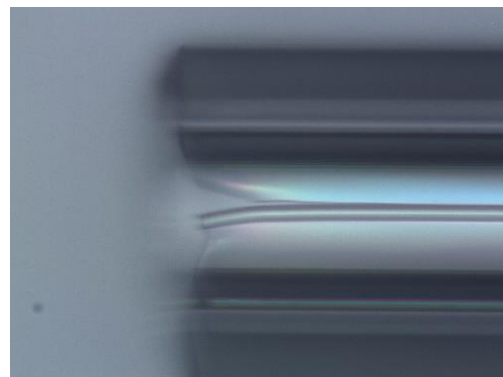
El estudio se realizó comprobando para qué distancias, utilizando el programa óptimo de fusión (descrito en el apartado III.3.4), la estructura de la fibra mantuvo sus propiedades, o si por el contrario, se vio degradada. Para la verificación de los efectos del arco se utilizó el microscopio de alta resolución.

El estudio consistió en colocar el extremo de la Fibra 4 OSF en una posición concreta de la rejilla y comparar su estructura antes y después de aplicar un solo arco (sin *Z-Push*).

En la Figura 18 a) se muestra un ejemplo estudiado con la fibra colocada a -5mm antes de ser aplicado el arco, mientras que el resultado de su aplicación se muestra en la Figura 18 b). Los mismos resultados se presentan en las figuras c) y d) pero situando la fibra a -10mm.



a)



b)

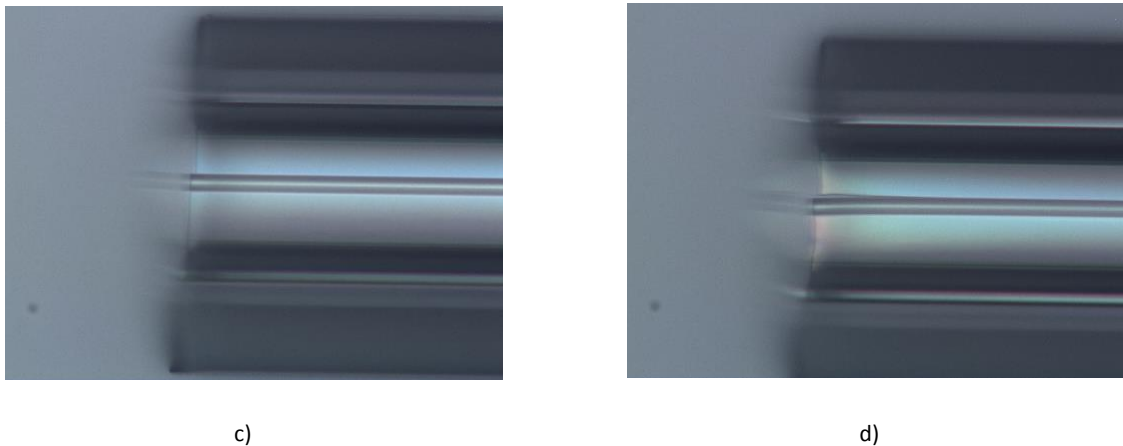


Figura 18: a) fibra situada a -5mm antes del arco; b) fibra situada a -5mm después del arco; c) fibra situada a -10mm antes del arco; d) fibra situada a -10mm después del arco.

Los resultados muestran que para fibras colocadas a 5mm del punto de aplicación del arco, el arco destruía los puentes produciendo una caída del núcleo, lo que suponía un desalineamiento a la hora de enfrentar fibras. Para fibras situadas a 10mm del punto de aplicación del arco, se observó cómo los puentes comenzaban a degradarse, pero sin llegar a romperse.

Finalmente se concluyó que el punto óptimo de colocación de las fibras estaba a 7,5mm (o - 7,5mm en la rejilla) del punto de aplicación del arco.

Esta conclusión puede parecer que contradice ligeramente los resultados del estudio anterior que afirma que a menos de 10mm, los arcos no resisten la potencia del arco. Sin embargo esto es debido a que en ese estudio no estaba contemplado el hecho de que una fibra enfrentada y alineada con la fibra OSF, que protege tanto el núcleo como los puentes de la acción del arco. Al entrar en contacto directo la fibra enfrentada (generalmente una fibra SMF o MMF) con el núcleo, puentes y cubierta de la OSF, la fibra enfrentada sujeta a la par que evita la afectación directa del arco al lateral de la fibra OSF. De éste modo, es posible aproximar más la zona de contacto al punto de aplicación del arco voltaico.

Para distancias más próximas a 7,5mm la protección que ofrece la fibra enfrentada resultó insuficiente para mantener las características físicas de la fibra OSF.

IV.3.3 Alineado de fibras

Uno de los trabajos más complejos, debido a las características de las fibras OSF y a las posibilidades que ofrece la fusionadora FITEL S175, fue el del alineado de las fibras para su fusión.

Las dimensiones de las cubiertas de las Fibras 3 y 4 OSF, mucho mayores que el diámetro de las fibras SMF o MMF, sumado a la excentricidad de los núcleos de las fibras hacían que el método de alineado siguiendo las cubiertas resultase inviable. Por su parte la Fibra 2 OSF sí que tiene unas dimensiones de su cubierta similares a las fibras SMF o MMF, luego el método de alineado siguiendo las cubiertas pudo ser utilizado, si bien es cierto que la excentricidad del núcleo sigue estando presente.

Por tanto, el único modo fiable de alineado de las fibras fue mediante la localización y alineado de ambos núcleos. En el caso de la Fibra 2 OSF se trató de alinear siguiendo las cubiertas, pero los resultados mostraron que la excentricidad del núcleo era trascendente para el alineado, por lo cual el método también quedó descartado para esta fibra.

El cuello de botella de este proceso fue la distinción del núcleo de las fibras OSF una vez colocadas en la fusionadora.

La imagen que presenta la fusionadora en su pantalla (como se ha descrito en el capítulo I) se basa en la reflexión de la luz incidente sobre la fibra. Debido a la posición aleatoria que adquiere la fibra una vez colocada en el amarre y a la imposibilidad técnica de ser rotada por parte de la fusionadora, la imagen de la fibra en la pantalla no resultaba (en la mayoría de los casos) aclaratoria. Si bien manipulando las funciones “*focus*” de la fusionadora se pudo conseguir enfocar la imagen en un punto u otro (profundidad de enfoque), la reflexión de la luz en la multitud de irregularidades de la fibra hacían que la distinción del núcleo fuera una tarea compleja y lo que suponía un agravante mayor, diferente cada vez que se iba a proceder con una fusión.

La discriminación del núcleo de la fibra, finalmente, se obtuvo por experiencia a base de trabajo en el laboratorio, sin haber sido posible encontrar un método fiable de distinción del núcleo. En la Figura 19 se muestran varios ejemplos de Fibra 4 OSF colocadas en la fusionadora en las cuales se detalla la posición del núcleo.

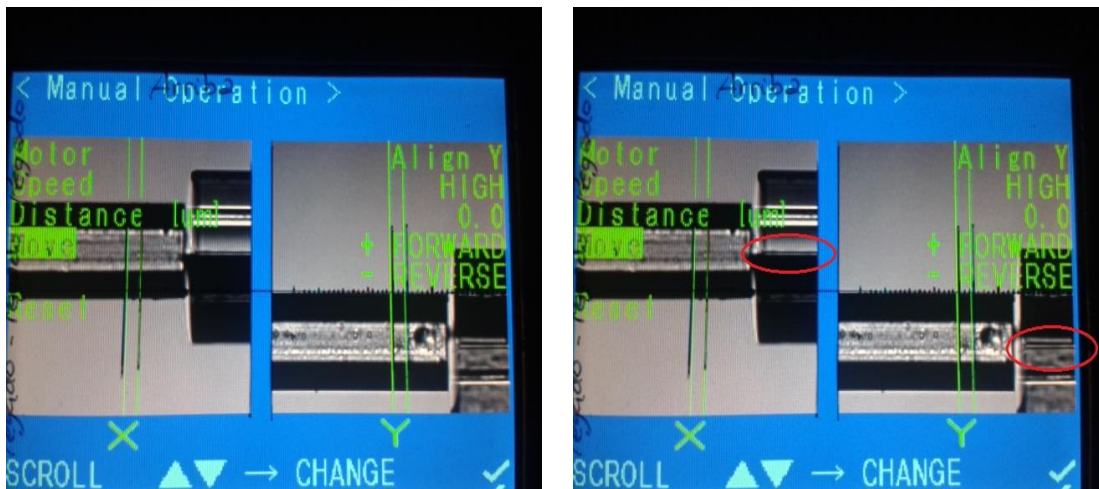
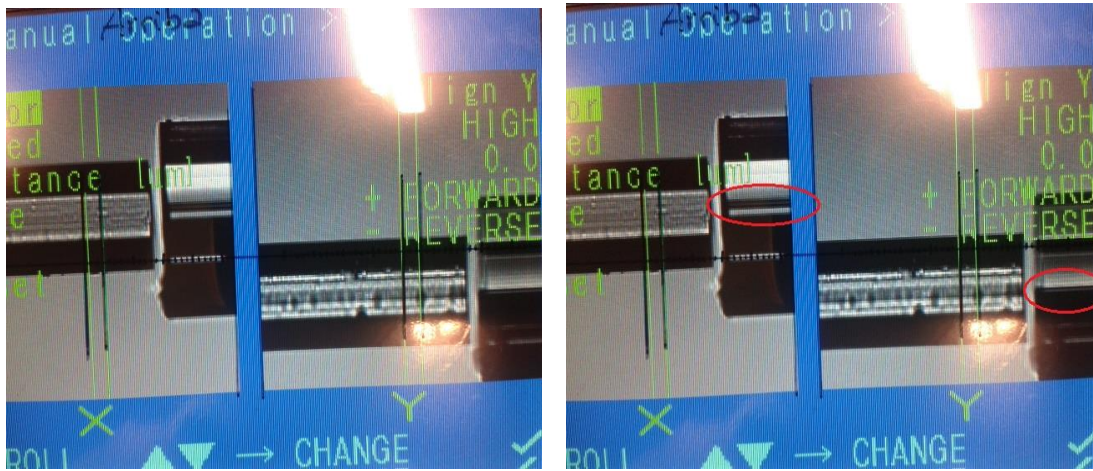


Figura 19. Ejemplos de discriminación del núcleo.

Como se puede comprobar en los ejemplos de la Figura 19, la distinción del núcleo no siempre resultaba sencilla (ejemplo superior) y en los casos en los que resulta más sencillo (ejemplo inferior) no era evidente (como sí lo puede ser en el caso de una fibra SMF o en general, una fibra con simetría cilíndrica).

IV.3.4 Programa de fusión

Para la creación del dispositivo sensor a estudiar se diseñó un programa de fusión específico para este tipo de fibras. Al igual que en el capítulo II, el objetivo del programa fue proporcionar una fusión estable en el tiempo, pero que no dañe la estructura interna de las fibras implicadas en la fusión.

Tal y cómo se ha descrito en el apartado dedicado al posicionamiento de las fibras en la fusionadora, estas fibras presentaban mayores dificultades a la hora de mantener intacta la estructura física ya que la exposición directa del núcleo y puentes al arco voltaico los hacía especialmente vulnerables.

Como se ha descrito en el apartado anterior dedicado al alineado de las fibras, el modo de funcionamiento automático de la fusionadora quedó inmediatamente descartado, realizando todo el proceso en modo manual.

Del mismo modo que en el estudio del sensor de temperatura basado en la fibra MOF, los principales parámetros optimizados del programa fueron los siguientes:

- *Arc Power* actúa sobre la potencia del arco aplicado. Medido en unidades digitales de 0 a 255.
- *Pre-Fuse Time* indica el tiempo que transcurre entre que se inicia el arco y se juntan las fibras.
- *Arc Duration* indica el tiempo de aplicación del arco sobre las fibras

La Tabla 1 muestra los valores de todos los parámetros del programa de fusión tras su optimización.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Arc Power	58	Repeat Arc Times	0 times
Pre-Fuse Time	0 ms	Repeat Arc Duration	1000 ms
Arc Duration	350 ms	Repeat Arc Interval	3000 ms
Z Push Distance	1 μ m	Repeat Arc Power Offset	0

Arc Power	20	Cleave Angle	2.0 deg
Compensation			
Cleanning A-Power	0	Loss Limit	0.2 dB
Offset			
Cleanning Time	0 ms	Aligning Type	CLAD
Z Pull Start Time	0 ms	Mode Field Radiious	4.75 μm
		L	
Z Pull Distance	0 μm	Mode Field Radiious	4.75 μm
		R	
Auto Additional Arc	0		

Tabla 1. Parámetros del programa de fusión.

Uno de los parámetros que supuso un caso especial de estudio es el parámetro *Z-Push* Distance. Éste parámetro afectaba sobre la distancia de empuje (dada en μm) que ejerce la fusionadora sobre la fibra colocada en su amarre izquierdo en el momento de la fusión.

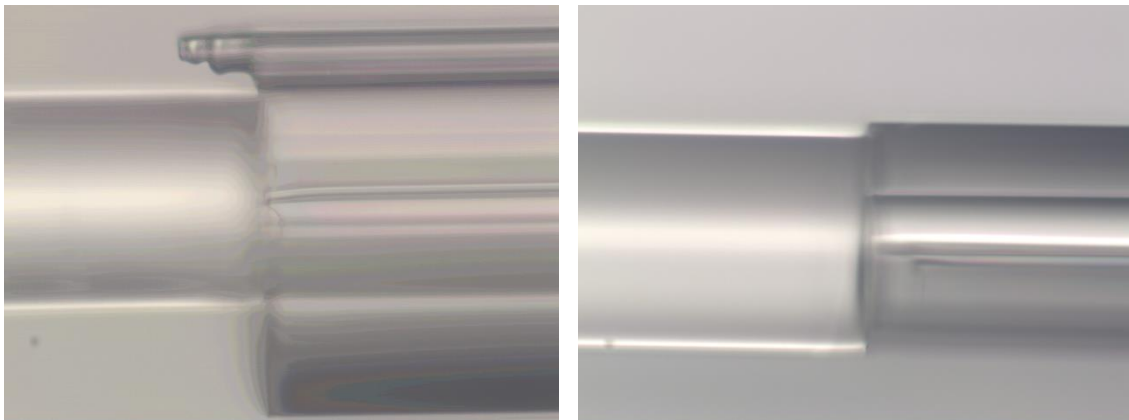
Este parámetro representa el compromiso entre dos hechos: estabilidad de la fusión y estabilidad de la estructura.

En la actuación del *Z-Push* hay que tener en cuenta la posición de las fibras antes de la ejecución del arco (reseñar que el *Z-Push* tan solo se aplica en el primer arco y no en los sucesivos). Dependiendo de la proximidad de los extremos de las fibras antes del inicio del arco, el *Z-Push* daba resultados diferentes. En este aspecto también resultó de utilidad la rejilla anteriormente presentada.

El compromiso entre estabilidad de la fusión y la de la estructura implica que a mayor distancia de *Z-Push*, las fibras eran empujadas la una contra la otra una distancia mayor mientras se aplicaba el arco, lo que implicaba un mayor contacto entre las zonas fundidas de las fibras, pero a su vez, éste empuje suponía una modificación de la estructura interna de las fibras, siendo ésta más evidente en las fibras de cristal fotónico dadas sus características (núcleos suspendidos de finos puentes y asimetría cilíndrica). Estas fuerzas de empuje sobre las fibras de cristal fotónico en general y sobre las fibras OSF en particular se traducían en deformaciones del núcleo de la fibra, llegando a doblarse y por ende, desalinearse.

Colocando las fibras a 1mm (sobre la rejilla) y aplicando un Z Push de $3\mu\text{m}$ en el programa se consiguieron los resultados óptimos con deformaciones inapreciables al microscopio en el núcleo de la fibra.

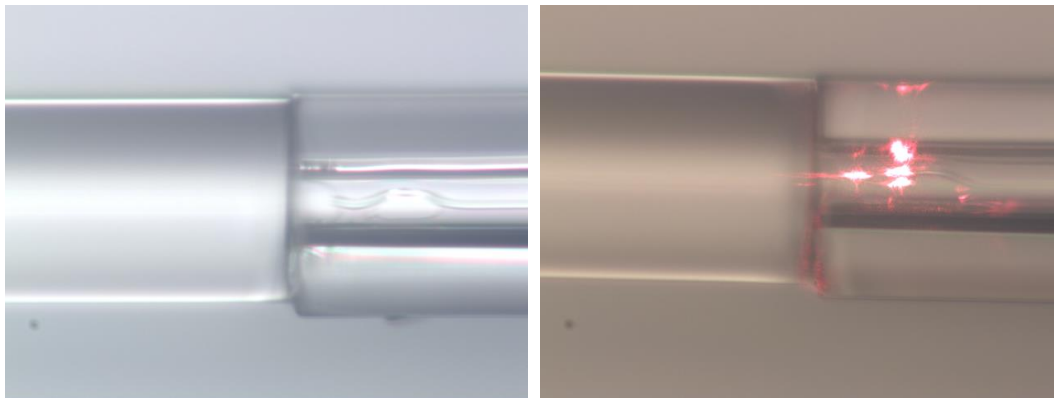
Por último, en este tratamiento resulta de gran importancia la calidad del corte obtenido en ambas fibras, ya que un corte irregular o inclinado supone un empuje irregular sobre las fibras al efectuar el *Z-Push*, y por tanto la obtención con seguridad de una fusión doblada y mal alineada.



a) b)
Figura 20. Resultado de la fusión: a) fusión SMF-Fibra 4 OSF; b) fusión SMF-Fibra 2 OSF

La Figura 20 muestra el resultado de un buen alineado y fusionado. La Figura 20 a) muestra la fusión entre una fibra SMF (izquierda) y una Fibra 4 OSF (derecha) mientras que la Figura 20 b) muestra la fusión entre una fibra SMF (izquierda) y una Fibra 2 OSF (derecha).

El resultado de una fusión en la que se utilizó un *Z-Push* demasiado grande y que como resultado se produjo la curvatura del núcleo de la fibra tal se muestra la Figura 21 a). En este caso se trata de la fusión de una SMF (izquierda) con una Fibra 2 OSF (derecha). La Figura 21 b) muestra el resultado de la curvatura del núcleo cuando se iluminó la fusión con una fuente de luz visible roja a través de la fibra SMF.



a)

b)

Figura 21. Resultados de la fusión con demasiado Z Push: a) resultado de la fusión; b) fuga de luz a causa de la curvatura.

IV.3.5 Resultados de la fusión

Los resultados de las fusiones obtenidos para los distintos tipos de fibras OSF difieren según el tipo de fibra OSF utilizada. Para todas las fibras se utilizó el mismo programa de fusionado ya que se demostró su utilidad.

Los diferentes resultados de la fusión se presentan atendiendo a cuatro fenómenos:

- Pérdidas del sensor.
- Estabilidad de la señal.
- Guiado de luz (visible).
- Resistencia de la fusión.

También se presentan los resultados de las fusiones para diferentes configuraciones, tanto en reflexión como en transmisión, lo cual implica una sola fusión (por el cual la luz pasa dos veces) por sensor en el primer caso, o dos fusiones en el segundo caso.

Sensores en reflexión

Tal y como se hizo con el sensor de temperatura y la fibra MOF, se caracterizaron los resultados de la fusiones en un montaje en reflexión. Éste montaje consta básicamente de un

circulador en el que en el puerto 1 se conecta la fuente, en el puerto 2 el sensor en reflexión y en el puerto 3 el dispositivo analizador de señal, tal y como muestra la Figura 22.

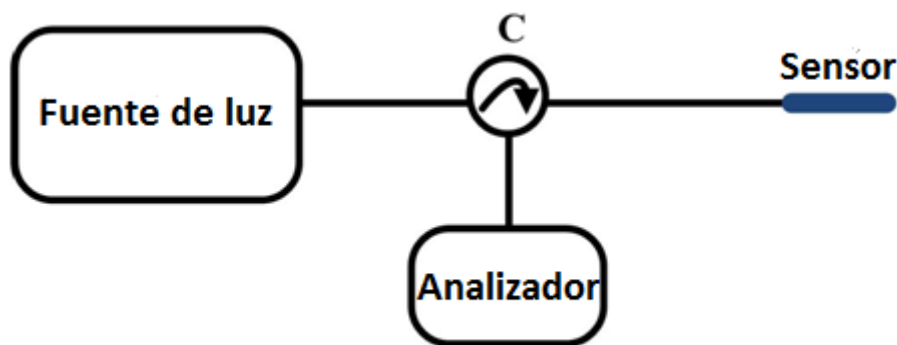


Figura 22. Esquema básico de un montaje en reflexión.

Para la medición de las pérdidas de la fusión se utilizó como fuente de luz el puerto de salida del *EXFO Multifunction Loss Tester* utilizado como medidor de pérdidas y como analizador el puerto de entrada del mismo dispositivo, utilizando como longitud de onda de medida 1550nm.

Para todos los casos se utilizaron longitudes de fibras de 5cm.

Los resultados de las pérdidas de los 3 tipos de fibras en éste montaje se presentan en la Tabla 2.

Las pérdidas del sistema provienen de la fusión, pérdidas de inserción del circulador, perdidas de las fibras y de las pérdidas producidas en el interfaz final de la fibra sílice-aire debido a la reflexión de Fresnel.

Fibra	Pérdidas de la fusión (dB)
Fibra 2 OSF	16-19
Fibra 3 OSF	28-32
Fibra 4 OSF	20-25

Tabla 2. Pérdidas de las fusiones.

Estos resultados fueron obtenidos restando las fibras introducidas por el circulador a las pérdidas totales obtenidas del sistema.

Como se puede apreciar, los resultados obtenidos son poco estables, presentando oscilaciones en los valores de potencia recibida de entre 3 y 5 dB en el caso mejor (fibra 2) y el caso peor (fibra 4) respectivamente. Ésta inestabilidad se debía a las irregularidades formadas en el proceso de fusión.

La diferencia en los valores obtenidos entre la fibra 2 y las fibras 4 se debía exclusivamente al alineado ya que ambas presentan las mismas dimensiones de núcleo y puentes. El alineado de la fibra 2 OSF se pudo conseguir con ayuda de la similitud en las dimensiones de las cubiertas mientras que en el caso de la Fibra 4 no.

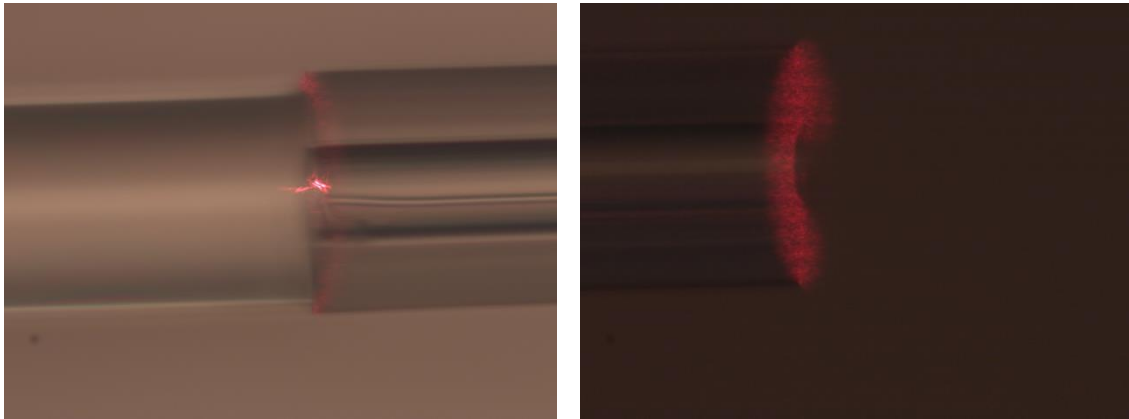
La diferencia en los valores de pérdidas obtenidos entre las fibras 3 y 4, si bien en ninguna de ellas se puede tomar como guía las cubiertas, reside en las dimensiones del núcleo. La fibra 3 al tener un núcleo más reducido, presentaba mayor dificultad al acoplar luz en la transición SMF→ OSF.

Las diferencias en los resultados entre las fibras 2 y 3 son la suma de las dos anteriores, diferencia de dimensiones y por tanto de la calidad del alineado, y diferencia del tamaño del núcleo.

Se comprobó utilizando el microscopio y la fuente de luz visible el guiado de los sensores. Tal y como muestra la Figura 23, utilizando la Fibra 2 OSF, comprobada una fusión y alineados correctos, que no llega luz al final de la fibra.

Al tener el mismo núcleo y puentes que el caso de la Fibra 4 OSF, no existe razonamiento experimental que explique por qué no se producía el guiado, por tanto se asumió este hecho como defecto de la fibra. Se comprobará en el apartado de los sensores en transmisión, que la potencia recibida es mucho menor que en los casos estudiados con la otra fibra.

Para llegar a la conclusión de que se debía a un fallo en la construcción de la fibra se probaron varios trozos de fibra tomados de diferentes partes del carrete. En todos los resultados fueron similares.

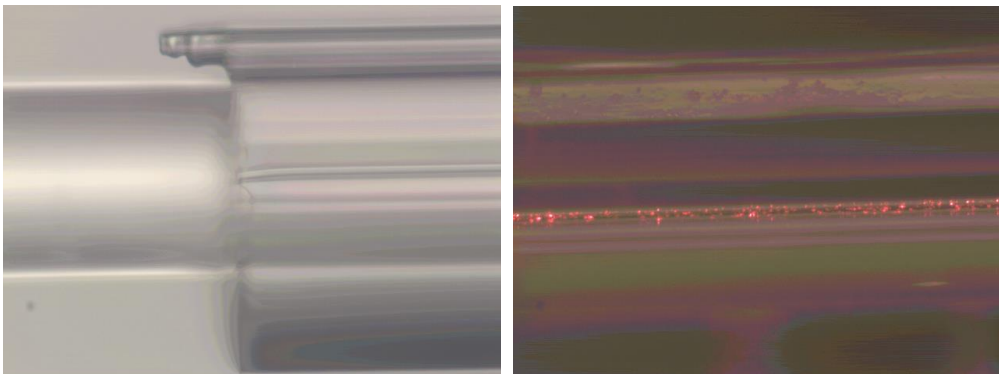


a)

b)

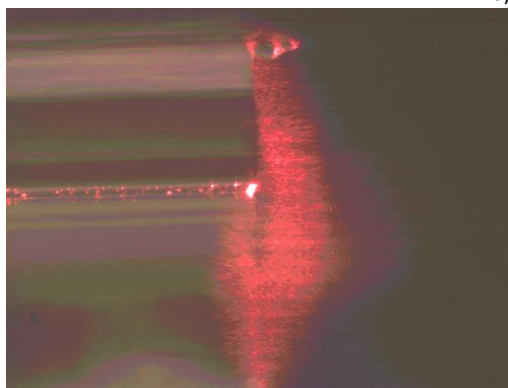
Figura 23. Sensor con Fibra 2 OSF: a) detalle de la fusión; b) detalle del final de la fibra. No llega luz.

Para el caso de las fibras 3 y 4 OSF se comprobó, igualmente una vez comprobados la fusión y el guiado, que sí que llegaba luz al final de la fibra tal y como se muestra en la Figura 24, en este caso con una Fibra 4 OSF.



a)

b)



c)

Figura 24. Sensor con Fibra 4 OSF: a) detalle de la fusión; b) guiado de la luz en un punto intermedio; c) extremo final de la fibra, hay luz en el núcleo.

Finalmente, los resultados de resistencia de las fusiones demostraron, tal y como se había estudiado acerca de los puntos de concentración de tensiones (explicados en el capítulo I), que las fibras 3 y 4 OSF, al presentar una diferencia de diámetros de cubierta externos tan grande con respecto a las fibras SMF, y por tanto una variación brusca del diámetro en el dispositivo final, presentaban muy poca resistencia a fuerzas externas, siendo sensores extremadamente débiles. Los sensores basados en estas fibras fueron difíciles de manejar debido a su fragilidad, teniendo que fijarlos recién salidos de la fusionadora a superficies sólidas para impedir su movimiento.

Por el contrario, los sensores en reflexión desarrollados con la Fibra 2 OSF, tal y como se preveía, presentaron mayor resistencia a fuerzas externas, al presentar una variación de diámetro de cubierta con respecto a la SMF mucho menor que las fibras 3 y 4, siendo esta diferencia prácticamente inexistente según la muestra de fibra utilizada y el error cometido en su construcción.

Los resultados conjuntos de las fusiones en montajes en reflexión se presentan en la Tabla 3.

Fibra	Pérdidas medias(dB)	Inestabilidades (dB)	Guiado de luz (rango visible)	Resistencia a curvatura
Fibra 2 OSF	17,5	3	No	Alta
Fibra 3 OSF	30	4	Si	Baja
Fibra 4 OSF	22,5	5	Si	Baja

Tabla 3. Resultados de los sensores en reflexión.

Sensores en transmisión

Dadas las características de las fibras OSF en la que el núcleo queda expuesto al exterior, también fueron objeto de estudio los sensores en transmisión, de forma que el campo evanescente podría estar en contacto con el medio durante mayor longitud de fibra.

Al igual que en el caso de los sensores en reflexión, los resultados se expresan siguiendo la misma línea, atendiendo a los mismos factores, si bien el factor del guiado ya no se presenta ya que se utilizan los resultados obtenidos anteriormente (la estructura de un sensor en

transmisión se basa en una estructura en reflexión). Por tanto los resultados se expresan atendiendo a:

- Pérdidas del sensor.
- Inestabilidades de la señal.
- Resistencia de la fusión.

Para el estudio de las pérdidas de los sensores se siguió una estructura similar a la mostrada en la Figura 25.

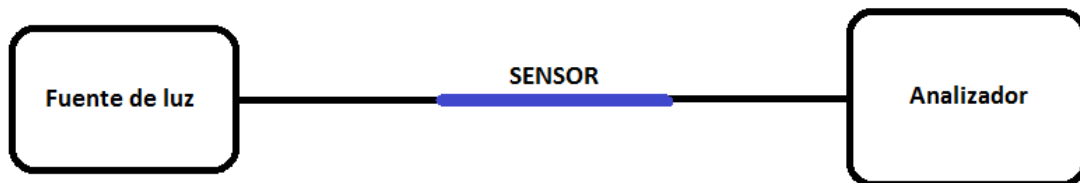


Figura 25. Esquema del montaje en transmisión.

En ésta configuración la luz tan sólo pasaba una vez por cada fusión y se tiene la certeza de que toda la luz captada por el analizador se ha visto afectada por los fenómenos que se dan en la fibra OSF, es decir, que la luz revivida en el analizador se ha propagado a través del sensor y ha sido modulada por los efectos producidos por la fibra.

Análogamente al estudio de los sensores en reflexión, para este estudio se utilizó la misma fuente de luz y el mismo analizador, ambos en el *Power Meter*. En éste caso, las pérdidas obtenidas se deben únicamente a las pérdidas de las fibras (especialmente las inducidas por la fibra OSF) y a las inducidas por las fusiones.

Los sensores se construyeron utilizando longitudes de fibra de entre 10 y 15cm. La variabilidad de la longitud de los sensores se debió a la imposibilidad de realizar las fusiones con la longitud de fibra deseada (una mala fusión implicaba cortar y fusionar de nuevo, lo que suponía un recorte en la longitud de fibra) teniendo que realizar varios intentos por fibra como se comenta en esta sección. Los resultados expresados representan la media de los resultados obtenidos en todos los sensores creados y estudiados.

Los resultados de las pérdidas de los 3 tipos de fibras en éste montaje se presentan en la Tabla 4.

Fibra	Pérdidas de la fusión (dB)
Fibra 2 OSF	50-54
Fibra 3 OSF	35-38
Fibra 4 OSF	30-33

Tabla 4. Pérdidas de las fusiones.

Tal y como se esperaba, al basarse estos sensores en una estructura similar a la estudiada en el caso de los sensores en reflexión, las inestabilidades de señal en las estructuras se mantuvieron.

En cuanto a pérdidas, los resultados también coincidieron con lo inicialmente esperado en todos los casos:

- Las pérdidas en las fibras 3 y 4 aumentan unos 5 dB con respecto al caso del sensor en reflexión. Estos 5 dB adicionales provienen del extra de longitud de la fibra (pérdidas de la fibra), así como de la segunda fusión y su alineado.
- Las pérdidas en la Fibra 2 OSF, a pesar de su valor, también se trató de un valor esperado, basándose en los resultados de guiado obtenidos del sensor en reflexión. Si bien es cierto que la operatividad de la fibra a la longitud de onda de la luz visible (620-780nm) no es la misma que a longitudes de onda comprendidas en la tercera ventana de comunicaciones (1500-1600nm), el no guiado de la fibra con la luz roja hacía presuponer su comportamiento a 1550nm. En ninguno de los casos estudiados se consiguió guiado de luz visible a través del sensor ni pérdidas totales inferiores a 48dB.

Los resultados en cuanto a resistencia de las fusiones también se ajustaron a lo esperado. Todas las estructuras mantenían lo obtenido en los sensores en reflexión, si bien la fragilidad se veía aumentada al tener que tratar con dos fusiones por sensor en vez de con una. Adicionalmente, éste hecho presentaba una gran dificultad a la hora de manipular la fibra para obtener la segunda fusión. El hecho de colocar la fibra en la fusionadora para realizar la

segunda fusión (con la primera fusión ya hecha) sin romper la ya existente constituyó, sin lugar a dudas, el mayor problema a la hora de tratar con éstas fibras, sobre todo con las fibras 3 y 4.

Como ya se ha comentado, dadas las dimensiones de estas fibras y el fenómeno de los puntos de concentración de tensiones, al colocar la fibra en el amarre de la fusionadora para realizar la segunda fusión, la fragilidad de la primera fusión llevaba siempre a la rotura del sensor por ésta parte.

El 92% de los sensores en transmisión intentados (Fibra 4 OSF) se rompieron por éste motivo (total intentado 127 porciones de fibra, total conseguidos, 10 sensores en transmisión), lo cual implicó una inversión de aproximadamente 21 metros de fibra OSF para la obtención de 10 sensores de entre 10 y 15 cm cada uno.

Se aumentó la potencia del programa de fusión para tratar de crear fusiones más estables, pero tal y como se había estudiado con anterioridad, el deterioro de la estructura de la fibra OSF aumentó de manera considerable (hasta en 20dB) las pérdidas de la fibra debido al desalineamiento producido al romperse puentes y deformar el núcleo. Además, la dirección del desalineamiento resultó ser aleatoria, sin poder predecirse y de éste modo compensarla previamente mediante un desplazamiento de la fibra SMF.

Una vez realizadas ambas fusiones, la resistencia de los sensores basados en fibras 3 y 4 también fue extremadamente débil, teniendo que fijarlos a superficies estables para evitar su rotura. Los dispositivos basados en fibra 2 exhibieron mayor resistencia, permitiendo su manipulación en la fusionadora sin problemas.

En la tabla 5 se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos para los sensores en transmisión.

Fibra	Pérdidas medias(dB)	Inestabilidades (dB)	Resistencia a curvatura
Fibra 2 OSF	52	4	Alta
Fibra 3 OSF	36,5	3	Muy Baja
Fibra 4 OSF	31,5	3	Muy Baja

Tabla 5. Resultados de los sensores en reflexión.

Los resultados comparando las pérdidas obtenidas en los sensores en reflexión y en transmisión para las fibras 3 y 4, presentaron una cierta incompatibilidad.

En ambas estructuras, la luz recibida en el analizador de señal ha viajado toda la longitud de la fibra y ha atravesado dos fusiones. En el caso de los sensores en reflexión la luz atravesaba la fusión por primera vez en el “viaje de ida” (interfaz SMF → OSF) y otra en el “viaje de vuelta” (interfaz OSF → SMF). Además, en ambas estructuras, la luz debía acoplarse de un núcleo mayor a uno menor en el interfaz SMF → OSF con la consiguiente pérdida de potencia, pero similar en ambas estructuras. Por tanto, los 5 dB de diferencia eran demasiados para deberse exclusivamente a las pérdidas de la fibra adicionales por aumentar la longitud 5cm aproximadamente.

Para comprobar la funcionalidad de los sensores, utilizando la fuente ancha de luz como y el OSA se aplicó una gota de alcohol en mitad de cada sensor.

En los sensores en transmisión, la gota en contacto con el núcleo de la fibra produjo una adaptación del índice de refracción en ese punto, que se traduce en la pérdida del fenómeno de reflexión total interna al aproximar el índice de refracción del líquido al del núcleo de la fibra y como consecuencia una pérdida total de señal en el OSA, tal y como cabía esperar.

En los sensores en reflexión, por el contrario, no se obtuvo respuesta alguna. La gota de alcohol, bien en mitad del sensor, o al final de él (en el interfaz núcleo-aire del corte) no produjo variación apreciable en la señal recibida en el OSA.

Para corroborar este hecho se analizaron los sensores en reflexión a través del OBR tal y como indica la Figura 26.

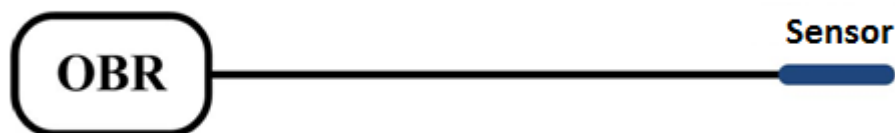


Figura 26. Esquema del montaje con el OBR.

Los resultados obtenidos en el OBR presentaron, tal y como se muestra en la Figura 27, un pico de reflexión en la fusión, lo cual implica que toda la potencia que recibíamos en el OSA provenía de la reflexión en la fusión del sensor, quedando enmascarada cualquier señal proveniente del propio sensor.

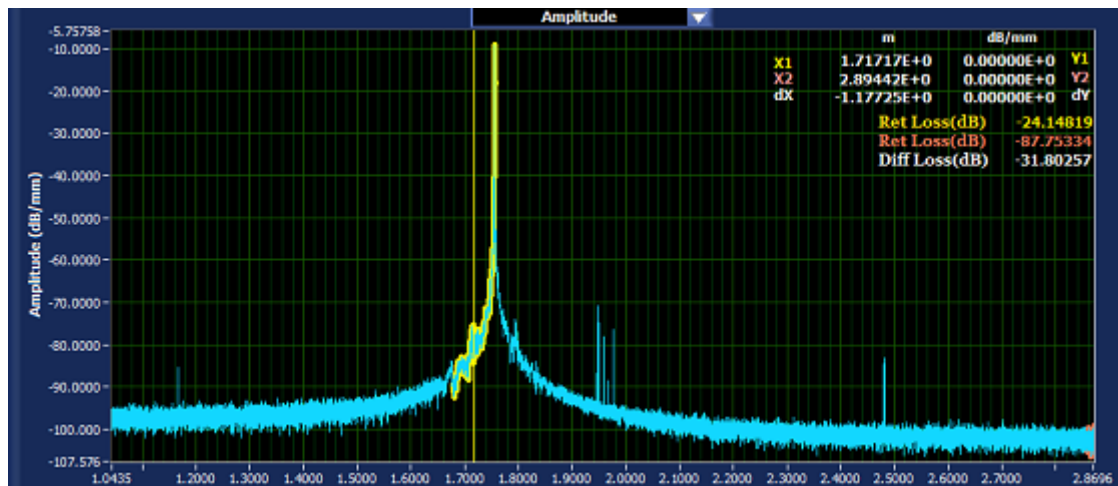


Figura 27. Reflexiones en la fibra.

Este hecho forzó a la retirada de los sensores en reflexión del estudio, ya que la señal recibida no atraviesa la fibra y por tanto no habría sido afectada por el gas.

Por el contrario, en los sensores en transmisión, se tiene la certeza (por la configuración del sistema) que la luz recibida ha atravesado la fibra y que por tanto, el campo evanescente de la señal ha estado en contacto con el medio circundante.

En definitiva, las posibilidades que originalmente abarcaban 3 fibras OSF, cada una de ellas estudiadas en dos configuraciones distintas, queda finalmente reducido a dos fibras, la Fibra 3 OSF y Fibra 4 OSF únicamente en transmisión.

En un intento por mejorar la calidad de las fusiones y reducir las pérdidas inducidas, se estudió la posibilidad de introducir una fibra intermedia en la interfaz SMF → OSF con el fin de focalizar el haz y reducir las pérdidas ocasionadas por la transición entre núcleos.

La fibra elegida para tal trabajo fue una fibra altamente no lineal llamada Narrow-Core Optical Fiber de la empresa Fiberlogix. Las características de ésta fibra se presentan en la tabla 6 y la estructura diseñada se refleja en la Figura 28.

Rango de trabajo (nm)	Atenuación (dB/km)	Ø Cubierta (µm)	Ø Núcleo (µm)
1290-1625	0,4	125	5,9

Tabla 6. Características de la fibra Narrow-Core Optical Fiber.

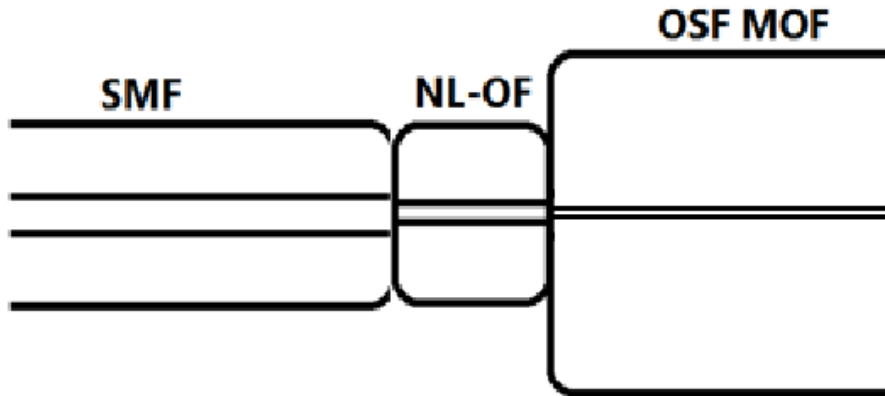


Figura 28. Estructura del sensor.

Se introdujo una longitud de 5mm aproximadamente de fibra no lineal con el objetivo de focalizar el haz dado su tamaño de núcleo. Los resultados indicaron que la mejora en cuanto a pérdidas se veía contrarrestada por la introducción de una fusión extra en el sistema, viéndose inalteradas las pérdidas totales del conjunto. Este hecho, sumado a los efectos posibles efectos no lineales excitados en la nueva fibra hicieron que se descartase la opción.

IV.4 Resultados

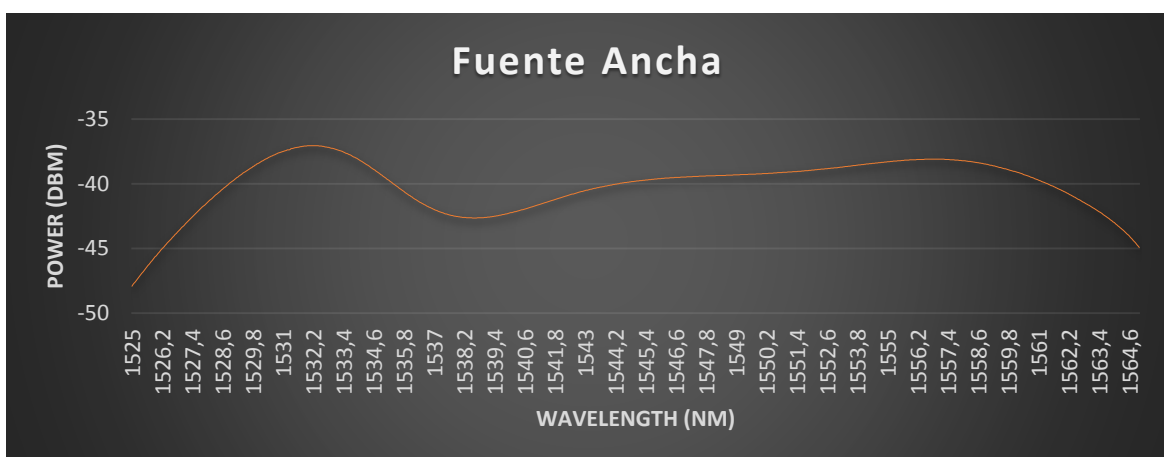
Antes de someter los sensores directamente a su estudio en la cámara de gas, se estudió la respuesta de los sensores creados con el fin de conocer su comportamiento. Se buscaron dos fenómenos:

- Interferencia debido al carácter birrefringente de la fibra.
- Capacidad de repetir la interferencia obtenida en dos muestras diferentes (con el fin de asegurar que el dispositivo era capaz de crearse de nuevo en caso de rotura).

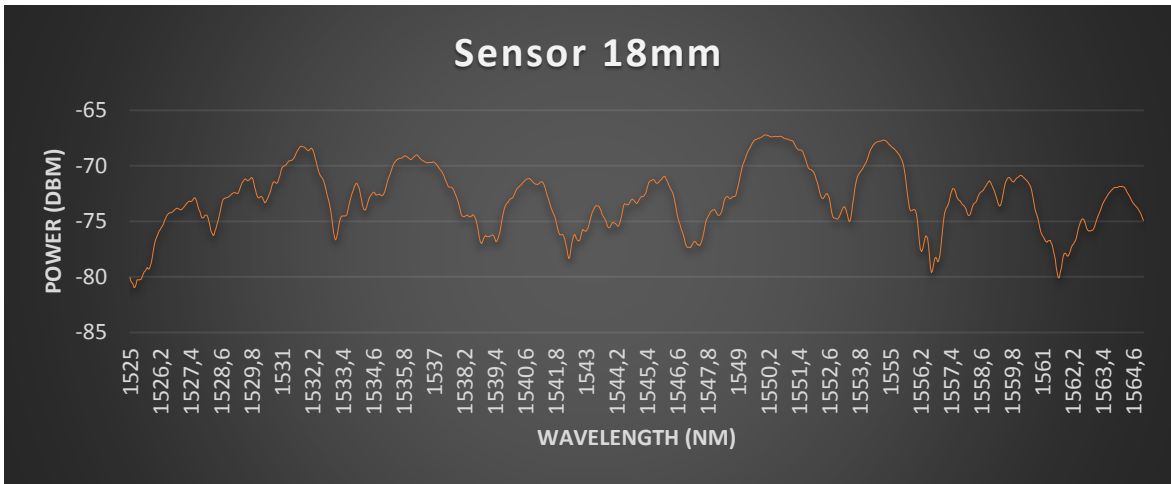
Los resultados obtenidos reflejaron que, si bien sí que se obtenía un patrón (no claro como en el caso de un Fabry-Perot) de interferencia, éste no era repetible en con distintas muestras, y que dos muestras de fibra de la misma longitud daban patrones de interferencia diferentes.

La causa de éste fenómeno es la imposibilidad de optimizar el alineado de las fibras. Por tanto, sin la capacidad técnica de rotar las fibras en la fusionadora para localizar sin error el núcleo, así como un ajuste más fino del movimiento de las fibras en el interior de la fusionadora (a la hora de acercarlas y alejarlas previa a la aplicación del arco), repetir dos alineados de forma eficiente resulta inviable.

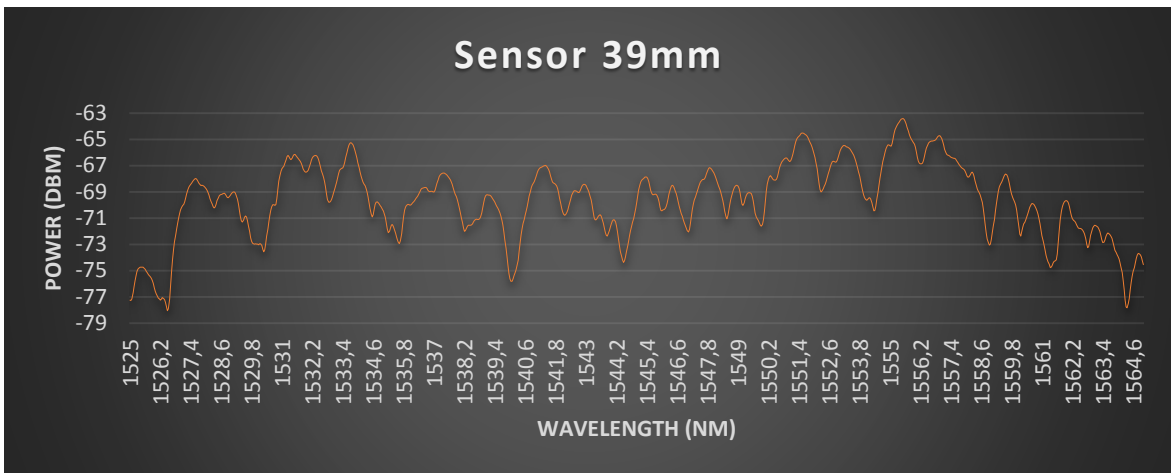
En las Figuras 29, se muestran los resultados obtenidos tras utilizar una fuente ancha de luz con la fibra 4 OSF como sensor, y analizar los datos en el OSA.



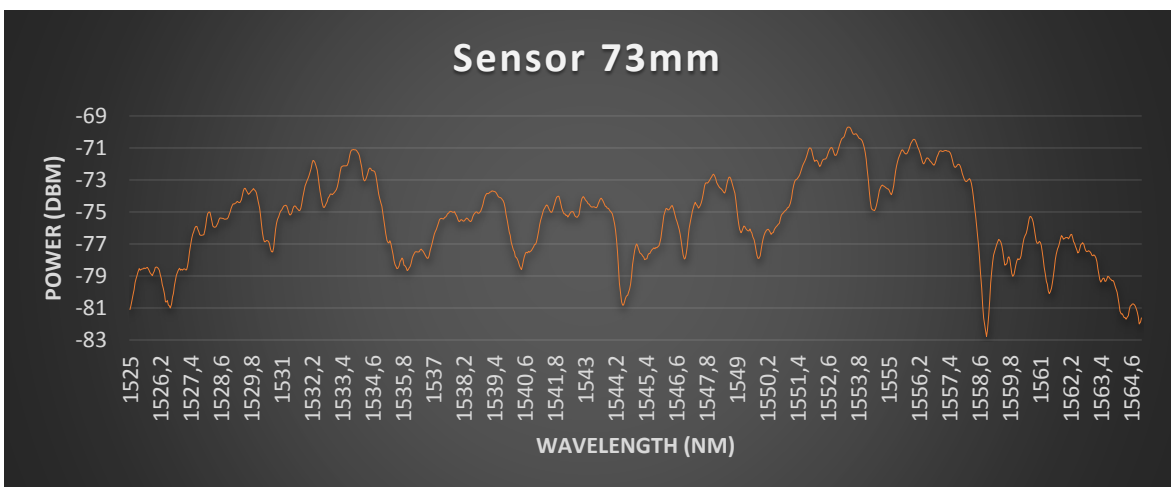
a)



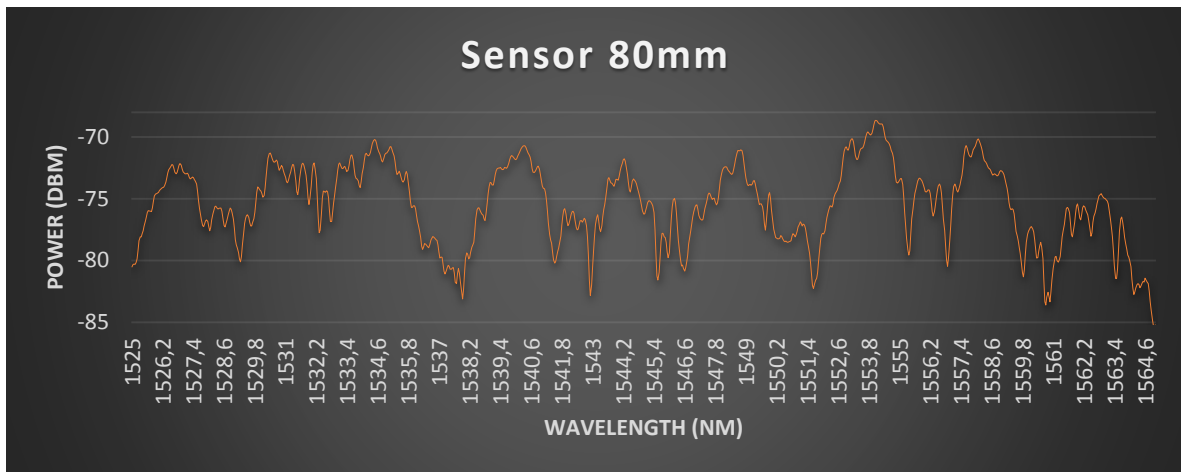
b)



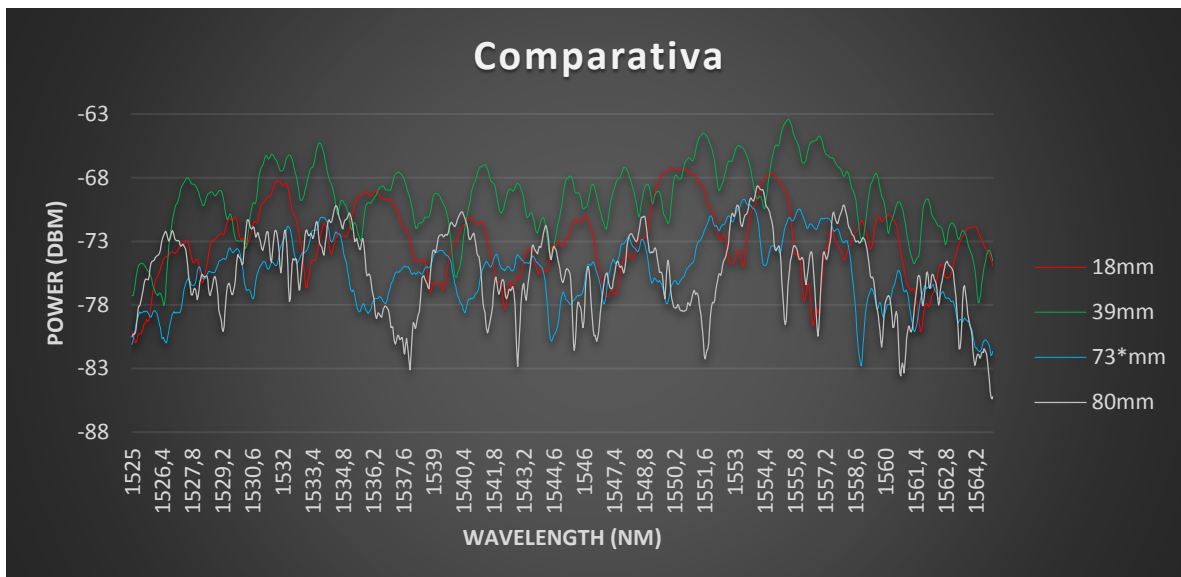
c)



d)



e)



f)

Figura 29. Respuesta de los sensores: a) espectro óptico de la fuente; b) espectro de sensor de 18mm de longitud; c) espectro de sensor de 39mm de longitud; d) espectro de sensor de 73mm de longitud; e) espectro de sensor de 80mm de longitud; f) comparativa de los espectros de los cuatro sensores.

Se pudo comprobar cómo los patrones de interferencia cambiaban con la longitud de la fibra OSF utilizada tal y como se esperaba de una interferencia causada por la birrefringencia de la fibra.

Ésta respuesta interferométrica de los sensores ofrece posibilidades dentro del ámbito del sensado interferométrico como puede ser el caso de sensores de temperatura,

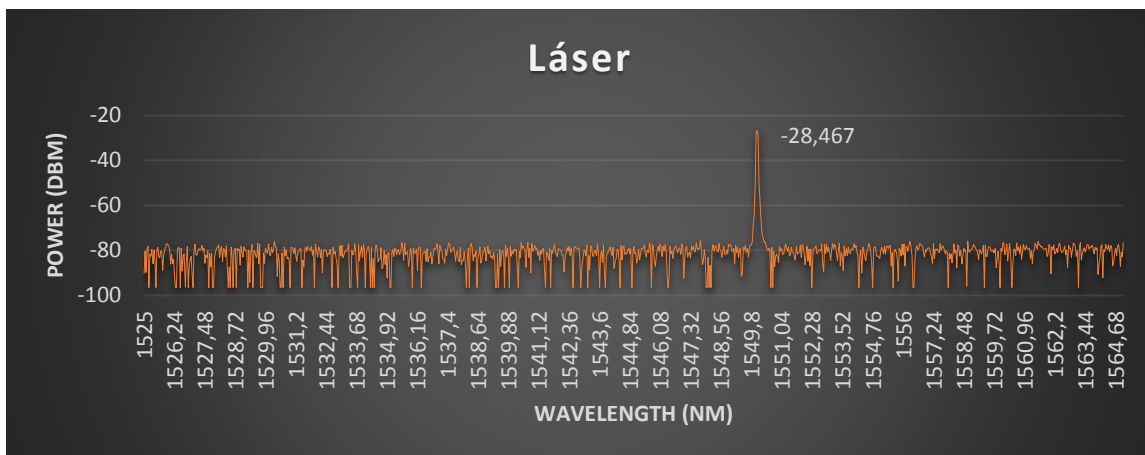
desplazamiento o índice de refracción [1,2,3,4] pero imposibilita el objetivo buscado en el proyecto, que es discernir la presencia de 3 gases diferentes.

La caracterización de los sensores mediante la detección de cambios de índice de refracción en presencia de los gases [4] en función de su desplazamiento en longitud de onda se descartó debido a la imposibilidad de discernir si el desplazamiento era debido a la presencia de un tipo de gas u otro, a cambios de temperatura o a la alteración del propio sensor.

Además, la amplitud de la interferencia es mucho mayor que la profundidad de las líneas de absorción de los gases [5,6], por lo que cualquier factor que induzca en la fibra un desplazamiento en longitud de onda de la respuesta del sensor se traduciría en un error en la medida de la presencia del gas.

El método para distinguir la presencia de un gas inequívocamente es mediante sus líneas de absorción, atacando con un láser directamente una de ellas y comprobando los niveles de potencia recibidos del sensor (lo cual implica la disposición de un láser para cada longitud de onda).

También se caracterizó la respuesta de los distintos sensores (en función de su longitud) cuando eran iluminados por un láser, a la longitud de onda de absorción del gas, tal y como se muestra en la Figura 30.



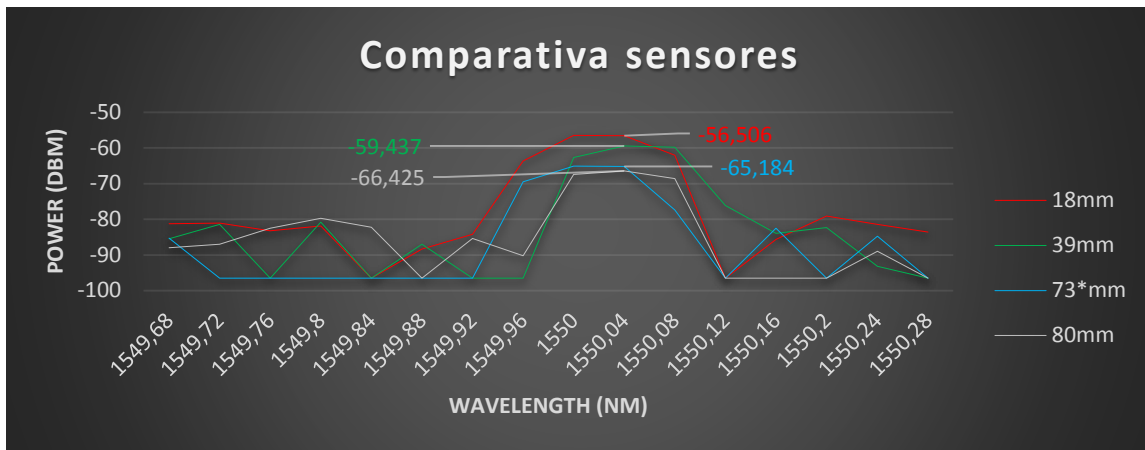


Figura 30. Comparativa de la respuesta del sensor iluminado por un láser a 1550nm

A pesar del hecho de que el carácter interferométrico del sensor a causa de la birrefringencia de la fibra limitaba mucho al sensor (tan sólo es viable si la interferencia no se desplaza), se siguió con su estudio para comprobar si poseía las propiedades para medir gases.

Se comenzó por el estudio de la presencia de CO₂, atacando directamente la línea de absorción de 1570nm con un láser (realizando un ajuste fino de la longitud de onda a través de su controlador de temperatura). Para éste estudio se sigue el mismo esquema que el mostrado en la Figura 25 pero introduciendo la fibra sensora dentro de la cámara de gases para evitar la contaminación del entorno del laboratorio.

Los resultados del estudio, utilizando para ello los 4 sensores desarrollados con diferentes longitudes de fibra, saturando la cámara de CO₂, utilizando un láser a 1570nm, y recogiendo la señal en el OSA fueron nulos. La señal recibida no se vio alterada por la presencia del gas en la cámara.

Para el llenado de la cámara con el gas no se utilizó el panel de gases si no que se inyectó CO₂ directamente desde la botella a la cámara, para alcanzar rápidamente la saturación.

Ni los sensores basados en la fibra 4 como los basados en la fibra 3 reaccionaron a la presencia de CO₂ en el entorno.

Dos posibles causas fueron planteadas como posibles:

- La longitud de onda de emisión del láser no era lo suficientemente exacta y no se estaba emitiendo a la longitud de onda de absorción, ya que la longitud de onda de emisión se comprobó con el detector de longitud de onda.

- La fibra OSF no poseía las características necesarias para presentar sensibilidad a la presencia de gas.

La primera de las hipótesis se estudió mediante el empleo de un barrido de longitud de onda con ayuda del Láser Sintonizable SANTEC. El SANTEC nos permitió realizar barridos en longitud de onda de forma muy precisa y acotada. Para ello, se introdujo en la entrada del SANTEC una señal rampa periódica a través de la cual controlamos la longitud de onda central de emisión del láser y el rango de barrido. El esquema de medición se muestra en la Figura 31.

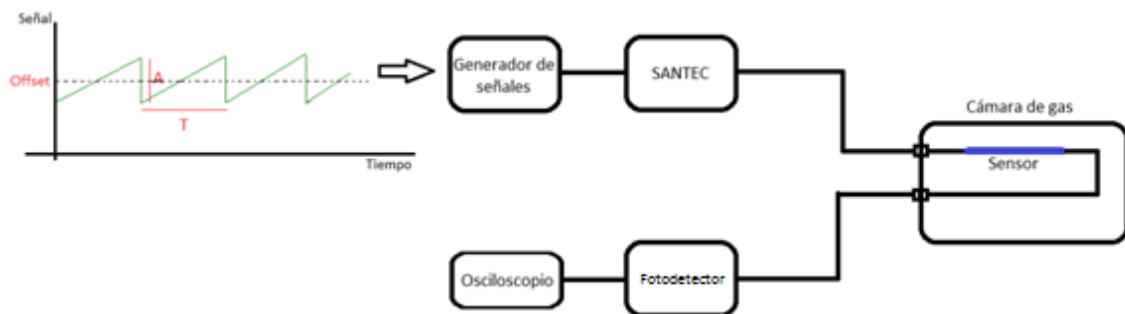


Figura 31. Esquema medición con el SANTEC.

Los parámetros de la señal eléctrica de entrada al SANTEC nos permiten controlar los siguientes parámetros de la señal de salida óptica:

Offset: controla la longitud de onda central de emisión del láser.

Amplitud (A): controla el rango de barrido del láser.

Frecuencia de la señal rampa ($1/T$): Controla la velocidad de refresco del barrido.

De éste modo, centrando la longitud de onda de emisión en 1570nm, con una amplitud de la señal rampa de 3Vpp realizamos un barrido de 40pm en torno a la longitud de onda de emisión.

De nuevo, realizando un estudio en el que se barrieron longitudes de onda comprendidas entre 1560nm y 1574nm no se encontraron diferencias significativas en el nivel de potencia

recibido (las variaciones medidas correspondían a la inestabilidad del sensor y no a la línea de absorción).

Por tanto, comprobado con exactitud que en el rango de 1568-1573 no fuimos capaces de detectar la línea de emisión, se concluyó que las fibras OSF no eran capaces de detectar la presencia del CO₂ (ni siquiera en entornos saturados).

Para apoyar ésta conclusión se trató de encontrar las líneas de absorción del CO₂, para constatar experimentalmente que existen, pero que las fibras OSF no son capaces de medirlas.

Para ello se recurrió al sistema de medida más básico: medidas en espacio abierto. Estas medidas se basan en el estudio de la señal una vez ha atravesado una longitud L de espacio libre en presencia del gas objetivo. Para ello se utilizó un colimador constituido por dos lentes colimadas que permitió la conexión de dos fibras SMF, una en cada uno de sus extremos y que proporcionaba un haz de luz colimado de 80mm en espacio libre, presentando unas pérdidas de entorno a 13dB.

Para el estudio se utilizó como fuente de luz y analizador de señal el OBR en la configuración que muestra la Figura 32.

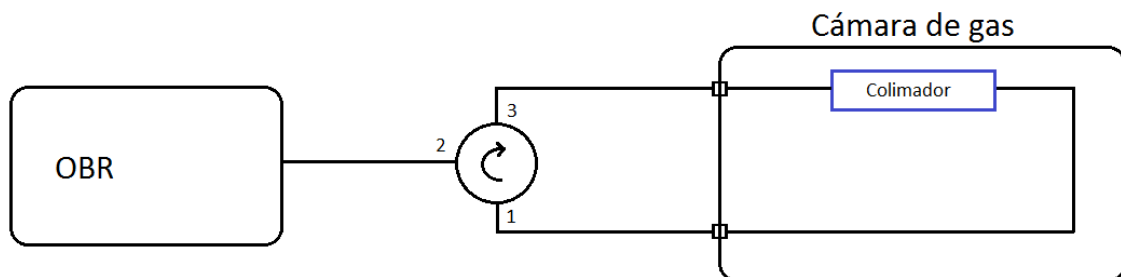


Figura 32. Esquema del montaje de medida en espacio libre.

Del mismo modo que en los estudios anteriores, el gas se inyectó en la cámara directamente de la botella para alcanzar el punto de saturación.

Los resultados obtenidos de las mediciones se presentan en la Figura 33.

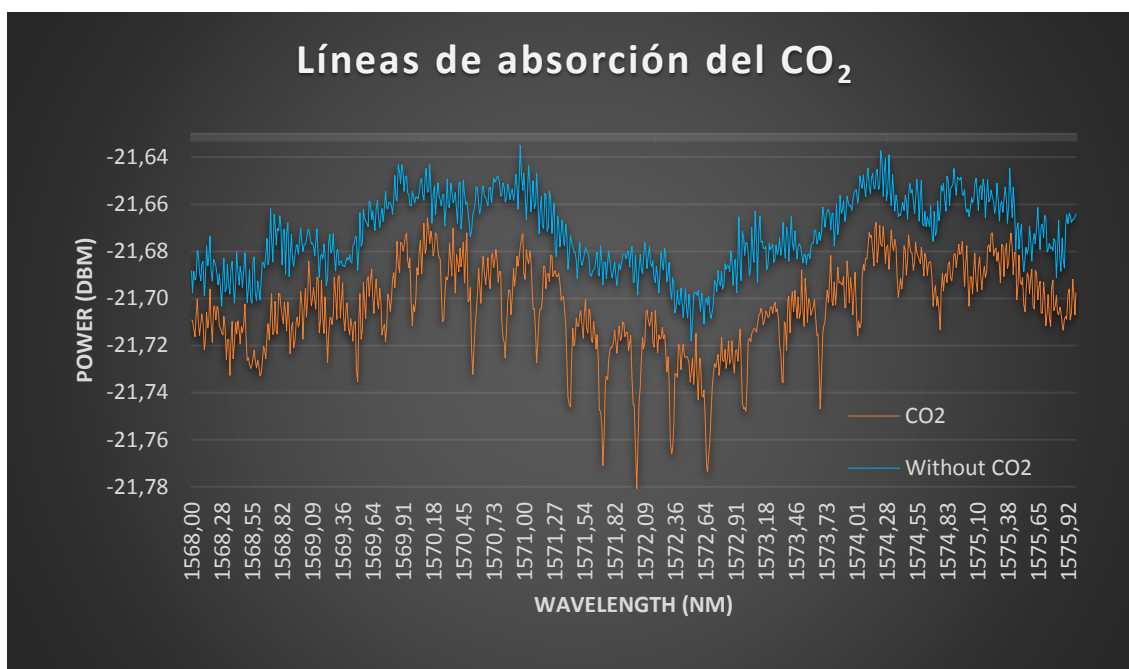


Figura 32. Resultados de las mediciones en espacio abierto.

En la Figura 32 se aprecia con claridad los resultados obtenidos de las mediciones, y la presencia de las líneas de absorción a las longitudes de onda esperadas. Además las líneas presentes en el rango estudiado (1568-1573) presentan la mayor profundidad de todo el espectro, lo cual es un hecho favorable a la hora de encontrarlas.

Este resultado certifica lo expuesto anteriormente, que las líneas de absorción están presentes en el rango de longitudes de onda estudiados, pero que las fibras OSF proporcionadas, tratadas con los dispositivos y técnicas disponibles, carecen de sensibilidad suficiente para detectarlas.

Cabe resaltar el hecho de que se trata de líneas extremadamente débiles. La línea de absorción más profunda, centrada de 1572nm, apenas representa 0,1dB de diferencia con respecto a la potencia recibida en esa misma longitud de onda pero sin presencia de CO₂.

Este hecho implica que las medidas con dispositivos de baja resolución (o no tan alta como el caso del OBR) no es posible detectar estas diferencias. Además, esta diferencia tan sutil de potencia hace que, para sensores basados en interferómetros, cualquier desplazamiento en longitud de onda de la respuesta del sensor, enmascare los resultados de las líneas de absorción. Por lo que las fibras facilitadas por XLIM quedaron descartadas al presentar todas ellas birrefringencia, y por lo tanto respuestas con patrones de interferencia. Como última

opción, se estudiaron sensores basados en las fibras MOF con el objetivo de encontrar variaciones en la señal causadas por las líneas de absorción, concretamente en la fibra 3 MOF y la fibra proporcionada desde Jena, si bien estas fibras también presentan birrefringencia y su utilización como sensor de gas quedaría descartada por el mismo motivo que las OSF.

En ambos casos se trataron de dispositivos en reflexión, ya que dada la estructura de las fibras, carente hueco en la cubierta que permitiese la exposición del núcleo al medio externo, una estructura en transmisión no permitiría la interacción entre la señal y el gas. El objetivo del sensor en reflexión es medir la interacción de la luz con el medio en la reflexión en la interfaz núcleo-aire del corte así como la interacción del campo evanescente a lo largo de la fibra con el gas que se pueda introducir en los huecos de la fibra.

En ambos casos los resultados fueron similares, ninguna de las dos fibras respondía a la presencia de gas (mediciones realizadas a través del OBR).

La explicación de porqué las fibras OSF, con el planteamiento de la interacción del campo evanescente con el aire circundante, no presentaban sensibilidad a la presencia de CO_2 vino de la mano del investigador Dr. Marco Petrovich en un encuentro en la Conferencia Internacional de Sensores de Fibra Óptica OFS23 y del profesor Manuel López-Amo (tutor de éste proyecto).

El planteamiento de la interacción del campo evanescente con el medio que lo rodea es correcto, pero el error se encuentra en las dimensiones de la fibra, concretamente de su núcleo.

Todas las fibras poseen campo evanescente que “rodea” al núcleo de la fibra como consecuencia directa de la teoría de ondas, tal y como muestra la Figura 33. El aspecto clave es cuánta potencia (o fracción de ella) está presente en éste campo, y qué parámetros de la fibra influyen en él.

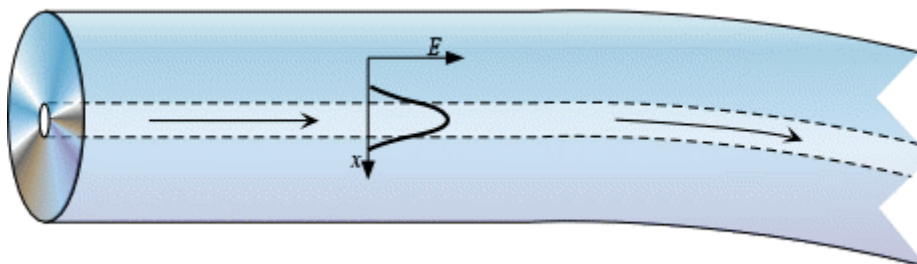


Figura 33. Campo evanescente en una fibra óptica.

Las curvas b-v nos describen el comportamiento en cuanto a número de modos soportados por una fibra y la fórmula que describe la frecuencia normalizada viene expresada en la Figura 34:

$$V = a \times \frac{2\pi}{\lambda} \times AN$$

Figura 34. Frecuencia normalizada de la fibra.

Donde a es el radio del núcleo de la fibra y AN es la apertura numérica de la fibra dada por la Figura 35:

$$AN = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Figura 35. Apertura numérica de la fibra.

Siendo n_1 el índice de refracción del núcleo y n_2 el índice de refracción de la cubierta.

De la fórmula de la Figura 34 se obtiene que la frecuencia normalizada V es proporcional al tamaño del núcleo (al radio del núcleo a) lo cual implica que para tamaños mayores de núcleo (manteniendo el resto de parámetros) se aumenta el número de modos soportados por la fibra. Este hecho se puede visualizar a través de la teoría de rayos como muestra la Figura 36.

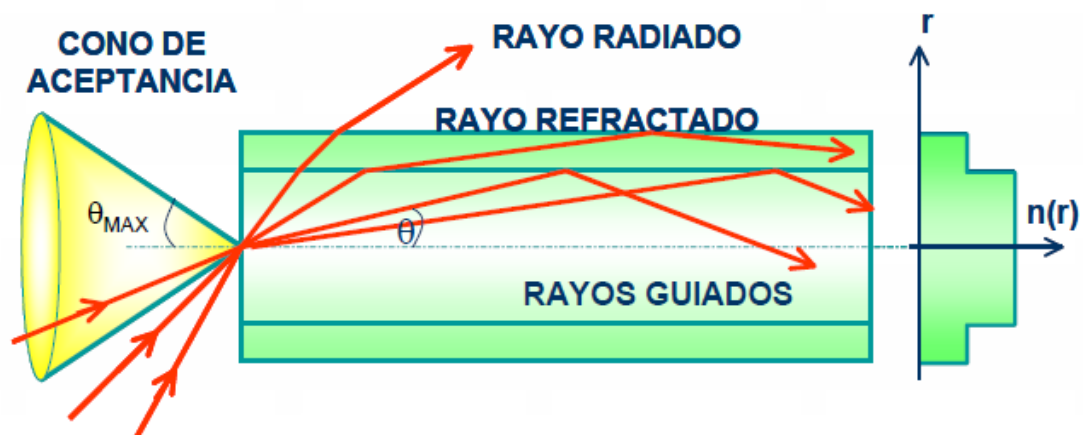


Figura 36. Rayos guiados en una fibra.

Se puede extraer que a mayor tamaño del núcleo, un mayor número de rayos (y por consiguiente, modos) son aceptados y guiados en el interior del núcleo. Éste hecho se refleja en las curvas b-V representadas en la Figura 37.

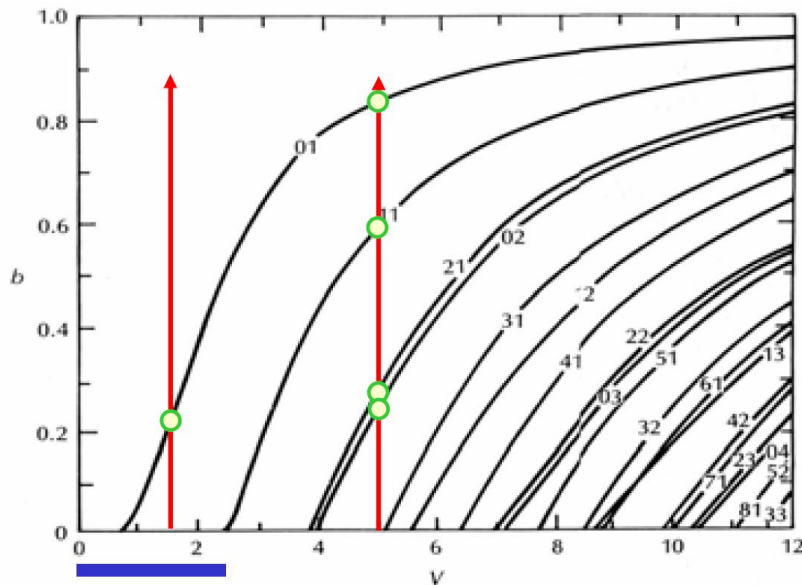


Figura 37. Diagrama b-V.

El error viene de la comúnmente aceptada idea de que a mayor tamaño del núcleo, más modos se guían en la fibra (hipótesis de la teoría de rayos correcta) y que los modos se encuentran más desconfiados (hipótesis errónea).

La confusión reside en que a mayor V, se excitan modos de orden superior y guiados en la fibra. Cuanto mayor sea el orden del modo, más desconfiada presenta su distribución de potencia, tal y como se muestra en la Figura 38. Pero esto no implica que para un mismo modo (ejemplo del modo fundamental LP₀₁) a mayor tamaño del núcleo (mayor V) su distribución de potencia sea más ancha, de hecho ocurre el fenómeno inverso.

Es decir, a través de la gráfica b-V presentada en la Figura 37, se observa que para un tamaño de núcleo dado (V menor que 2,4) tan sólo aparece un modo (primera flecha roja). Conforme aumentamos V, aparecen otros modos. Para V=5 tenemos que la gráfica corta 4 líneas, es decir, 4 modos se encuentran presentes en la fibra. Paralelamente, el modo fundamental que está presente a partir de V=1,6 (aproximadamente) presentará una distribución de potencia

más confinada conforme aumente V, y análogamente para el resto de modos, una vez estén excitados, su distribución de potencia se confinará conforme aumente V.

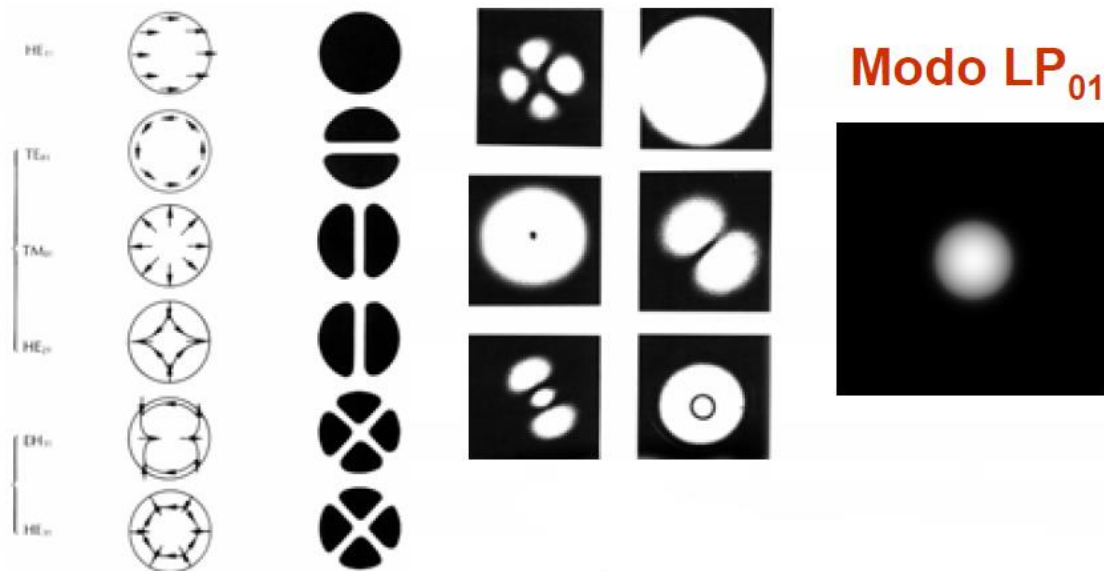


Figura 38. Modos de polarización de la luz.

Éste fenómeno de dispersión de la distribución de potencia de un modo es necesario analizarlo a través de la teoría de ondas. La distribución de potencia de un modo en el interior de la fibra presenta forma gaussiana, tal y como muestra la Figura 39.

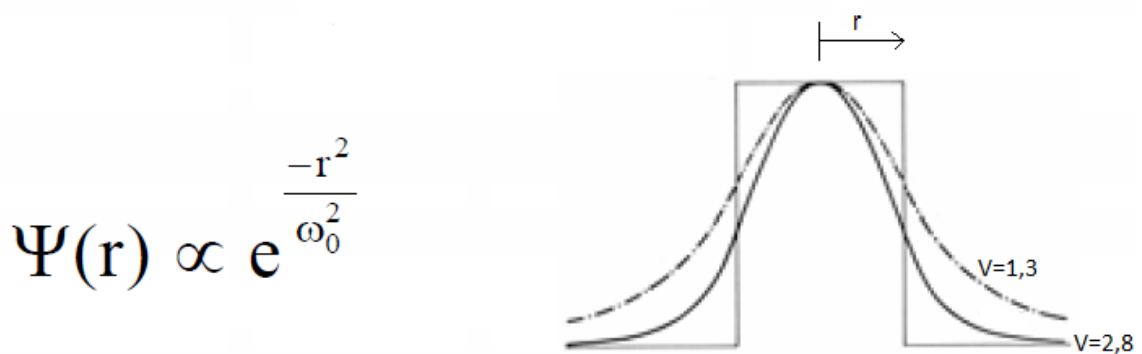


Figura 39. Distribución de potencia de un modo en el interior de la fibra.

La anchura de la gaussiana, representada por $\Psi(r)$ disminuye conforme aumenta el radio del núcleo de la fibra r .

Por tanto, la distribución de potencia de un modo en el interior de la fibra se ensancha con la disminución del tamaño del núcleo, o lo que resulta equivalente, el campo evanescente (campo que “se sale” del núcleo de la fibra) aumenta conforme se disminuye el núcleo de la fibra.

En resumen, se puede decir que a una longitud de onda de trabajo dada y con los índices de refracción de cubierta y núcleo fijados, a mayor tamaño del núcleo de la fibra, ésta soporta mayor número de modos (y mayor orden de éstos) y a su vez la distribución de potencia de cada uno de estos modos se encuentra más focalizada y por tanto, el campo evanescente es menor.

A través del investigador Dr. Marco Petrovich, se supo que para las fibras con las que estábamos trabajando cuyo núcleo está compuesto de sílice puro (índice de refracción de $\sim 1,46$) y la cubierta la constituye el aire (índice de refracción de ~ 1) y trabajando a longitudes de onda comprendidas en el rango de 1500-1650nm (donde se encuentran las principales líneas de absorción de los gases objetivo) para tener un campo evanescente suficientemente potente como para ser detectado en las mediciones, el tamaño del núcleo debería ser de $1\mu\text{m}$ de diámetro o inferior, lo cual dista bastante de las dimensiones del núcleo de las fibras OSF.

Se propuso al XLIM reducir las dimensiones del núcleo de la fibra para aumentar el campo evanescente presente, pero dicha modificación resultó inviable.

El método para reducir las dimensiones de la fibra se basa en calentar la fibra y estirarla (lo que comúnmente se conoce como hacer un “taper” con la fibra) resultando una fibra similar a la mostrada en la Figura 40. De éste modo, partiendo de la fibra original, se obtiene una fibra con similar estructura, dimensiones inferiores y una longitud superior. Dadas las dimensiones de los puentes que mantienen el núcleo suspendido, éste método resulta inviable debido a que el estiramiento reduciría sus dimensiones (grosor) hasta el punto de no poder mantener suspendido al núcleo o hasta su ruptura directamente.

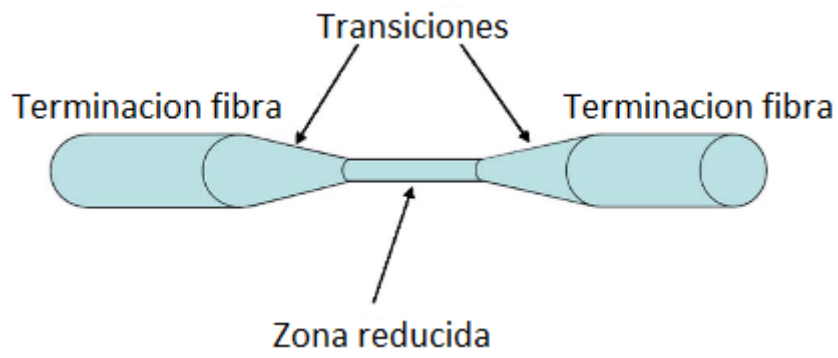


Figura 40. Resultado del proceso de *taper*, o estrechamiento de fibras.

IV.5 Hollow Core PCF

Uno de los problemas encontrados en el estudio de la interacción luz-gas en espacio abierto es la disponibilidad de longitud suficiente de interacción para mejorar la sensibilidad. En el caso estudiado con el colimador, una longitud de 80mm dio como resultado unas líneas de absorción de 0,1dB.

Aumentando la distancia de interacción se consiguen mejoras en la sensibilidad del dispositivo [7,8].

Mediante la utilización de fibras de cristal fotónico de núcleo hueco se consigue que la luz guiada viaje por un núcleo constituido por un hueco. Este hueco se puede llenar del fluido objeto de estudio y obtener un sensor.

La estructura de la fibra Hollow Core se presenta en la Figura 41.

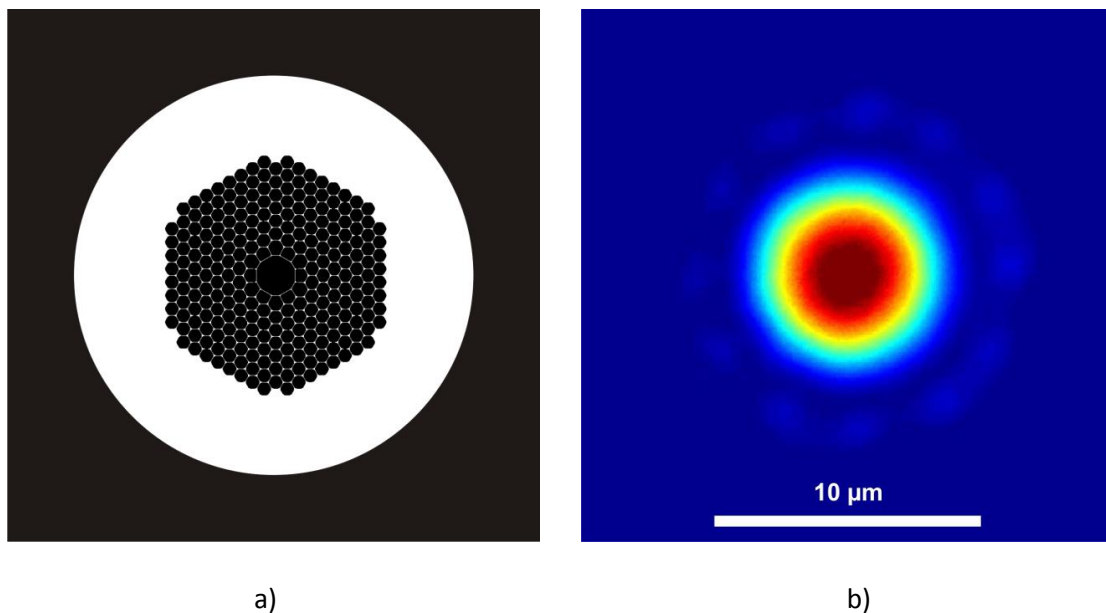


Figura 41: a) estructura de la fibra Hollow Core; b) perfil de intensidad de potencia.

Para permitir la libre circulación del fluido (en nuestro caso un gas) en el interior de la fibra, es necesario mantener un espacio entre la fibra SMF/MMF y la fibra *Hollow Core*. De éste modo, el punto clave del montaje no son las fusiones si no el alineamiento entre las fibras.

El alineado de fibras sin existir contacto entre ellas constituye un aspecto complicado debido a la fuga de luz producida entre las fibras debido a sus aperturas numéricas, AN. Pequeñas variaciones en el alineado de las fibras producen grandes pérdidas de potencia en el acople de luz entre fibras tal y como se ha comprobado experimentalmente.

Se ha realizado un breve estudio del método de alineado con las herramientas disponibles actualmente en el laboratorio:

Alineado de fibras SMF-Hollow Core

- Como primera aproximación se alinearon ambos extremos de la fibra HC utilizando las dos fusionadoras disponibles. Este montaje no es viable dada la imposibilidad de introducir ambas fusionadoras en la cámara de gas, pero sirvió como estudio para conocer las pérdidas. El esquema del montaje se presenta en la Figura 42.



Figura 42. Fotografía del sistema implementado.

Se obtuvieron 27,73dB de pérdidas resultantes del montaje. Estas pérdidas se producen mayoritariamente por dos motivos:

- El hueco existente entre las fibras (hay que contabilizar dos conexiones).
- La reflexión de Fresnel en la primera conexión y la dificultad de la luz para acoplarse en la segunda conexión (pasa de guiarse por el aire a guiarse por el núcleo de la SMF, pasando de un índice menor a uno mayor).

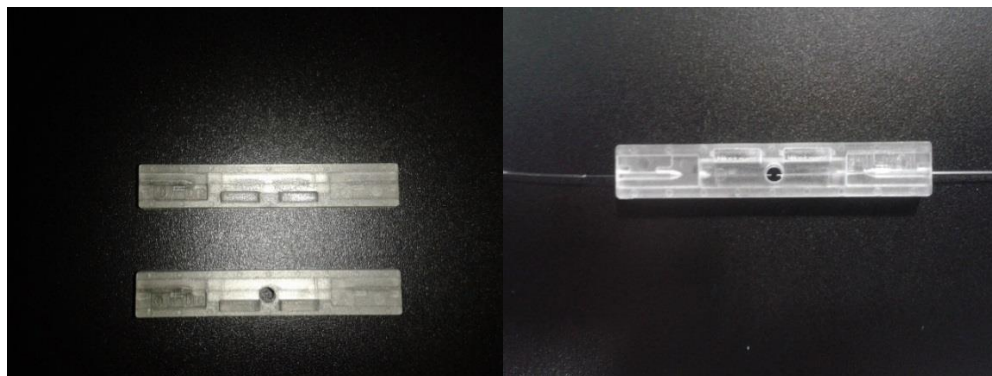
Se estableció como referencia de pérdidas el resultado obtenido, unos 28dB de pérdidas.

Conectores mecánicos:

Los conectores mecánicos, por norma general, están diseñados para fijar las fibras en su interior previamente ajustadas, impidiendo la circulación de aire en su interior (y como se verá posteriormente algunas incorporan gel adaptador de índice para reducir las pérdidas de la fusión, pero que impiden el flujo de gas en su interior.

Por éste motivo, el primer paso fue taladrar un agujero en el centro de los conectores para posibilitar la circulación del aire, tal y como se muestra en las Figuras 43 a), b) y c)

Se contaba en el laboratorio con conectores mecánicos para fibras de diámetros comprendidos entre 250 y 900 μ m.



a)

b)



c)

Figura 43: a) conectores antes y después de taladrar; b) conector taladrado con fibras alineadas; c) conector con fibras alineadas guiando luz roja.

El resultado de este conector fue de unas pérdidas muy variables con la posición de las fibras. Esto es debido a que el conector no está diseñado para alinear fibras de 125µm de diámetro, como es el caso de las fibras SMF utilizadas o de 120µm como es el caso de la fibra HC, sino que está diseñado para fibras de diámetro mínimo de 200µm.

Por último, para verificar este hecho, se miró el alineamiento de las fibras (enfocando sus extremos) en un microscopio de alta resolución y se comprobó cómo existía un desalineamiento entre ellas.

Se repitió el experimento con conectores mecánicos especiales para fibras de diámetros de cubierta comprendidos entre 125 y 140µm. Los conectores se presentan en la Figura 44.



Figura 44. Conectores mecánicos para SMF.

Tal y como se observa en la Figura 44, el conector consta de dos partes: la parte de color amarillo que se encarga del alineamiento de las fibras y la parte de color gris que se encarga de la sujeción y fijación del cilindro amarillo.

Como se ha comentado anteriormente, éstos conectores incorporan gel adaptador de índice en su interior para minimizar las pérdidas de la conexión. En la Figura 45 se puede observar el detalle de las partes del conector:

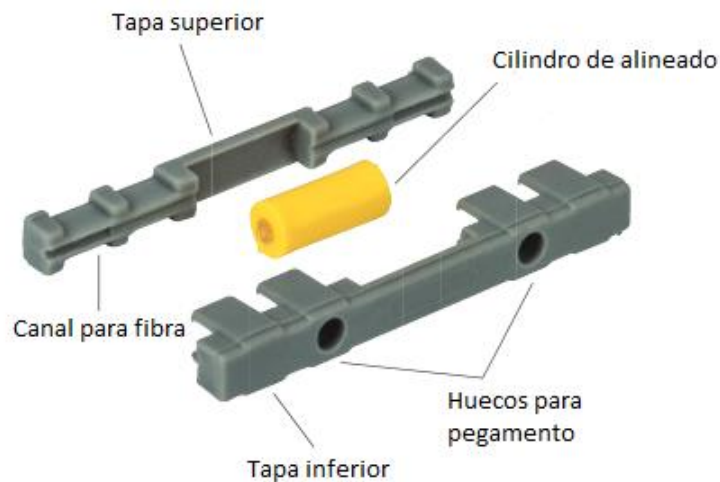


Figura 45. Partes del conector.

El elemento principal del conector, el cilindro de color amarillo, consta de un cilindro exterior de guiado y la guía de la fibra interior, fabricado en silicona. La guía interior, a su vez está dividida en dos piezas, ambas semicirculares. Una de ellas presenta un “surco” que actúa como guía de la fibra, y la otra es totalmente plana, realizando funciones de sujeción.

Al igual que el conector anteriormente estudiado, el conector original (con el gel adaptador de índice), no permite dejar un hueco entre las fibras para que circule el gas, por tanto, se repitió el proceso de taladrado sobre el conector. Dos ejemplos de los resultados se presentan en la Figura 46:

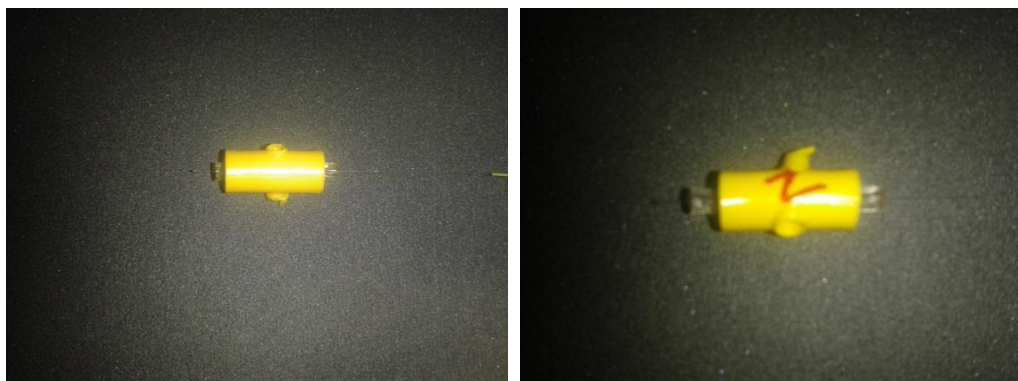


Figura 46. Conectores SMF taladrados.

Los resultados de éste método, de nuevo, no fueron los inicialmente previstos. Al taladrar el conector, cuando la broca alcanza la guía interior de silicona, ésta no queda agujereada uniformemente sino que se dobla y se ve sometida a fuerzas de torsión que inutilizan la guía, produciendo severos desalineamientos cuando introducimos las fibras.

Para evitar éste deterioro de la guía interior de silicona lo que se hizo fue sacar esa guía antes de taladrar, aplicando la perforación únicamente al cilindro amarillo hueco. Posteriormente la guía de silicona se cortó en dos partes de igual longitud para introduciendo una por cada extremo del cilindro, dejar una cavidad entre ellos. La idea era que al ser ambos trozos pertenecientes a la misma guía, el alineado debería de ser perfecto, pero se demostró experimentalmente que al partir la guía de silicona cada una de las partes resultantes aplicaba la fuerza de distinta forma sobre la fibra colocada, produciendo en última instancia desalineamientos en las fibras.

Por último, se trató de alinear las fibras utilizando tan solo la parte de la guía de silicona en la cual se encontraba dibujado el surco de $140\mu\text{m}$, colocando las fibras sobre él y fijándolas con pegamento.

Los resultados comprobados en el microscopio demostraron que aunque parecen bien alineadas, ligerísimas variaciones en el alineamiento produjeron pérdidas de señal hasta el punto de no existir nivel de potencia suficiente para ser detectado.

IV.6 Conclusiones y líneas futuras

Se han caracterizado completamente las fibras recibidas desde el XLIM para la detección y medición de gases: Fibra 2 OSF, Fibra 3 OSF y Fibra 4 OSF.

Se ha configurado y optimizado un programa de fusión para estas fibras que produce fusiones estables (aunque muy sensible a fuerzas de curvatura debido al efecto de los puntos de concentración de tensiones) sin dañar la estructura interna de las fibras.

Se ha optimizado el proceso de decapado, corte, colocación de fibras en fusionadora y alineado para éstas fibras (y aquellas que presenten características estructurales y de simetría similares).

La Fibra 2 OSF no guía luz presentando altas pérdidas en comparación con el resto de fibras. Se ha concluido que se debe a un defecto en la construcción de la fibra.

Los dispositivos en reflexión presentan la reflexión en el punto de fusión y no al final de la fibra en el interfaz fibra-aire por lo que no son aptos para medición.

Los dispositivos en transmisión basados en las Fibras 3 y 4 OSF sí son aptos para la medición aunque presentan altas pérdidas (entre 30 y 35dB).

Los dispositivos contruidos presentan patrones de interferencia debido a su naturaleza birrefringente.

Esta interferencia presentaría un gran obstáculo en el caso de encontrar las líneas de absorción ya que su desplazamiento debido a motivos ajenos a los estudiados podría enmascarar los resultados obtenidos mediante el estudio de las líneas de absorción.

Todos los dispositivos sensores contruidos a partir de fibras OSF no presentan sensibilidad a la presencia de gas, resultando imposible la localización de las líneas de absorción del gas. Hecho causado por las dimensiones del núcleo y el confinamiento de la distribución de potencia de los modos para ese tamaño del núcleo.

Líneas de absorción del CO₂ encontradas en un montaje basado en un colimador y la interacción luz-gas en espacio libre. Con un trayecto de 80mm en espacio libre y en presencia de CO₂ (en saturación), líneas de 0,1dB encontradas en el rango de 1569-1576nm.

A continuación se ofrecen diferentes alternativas a las fibras disponibles y líneas futuras de investigación planteadas en función del fenómeno en el que se basan:

- Reducción de las dimensiones originales de las fibras OSF (descartado desde el XLIM debido a la debilidad de la estructura interna de las fibras).
- Utilización de microhilos o nanohilos para aumentar el campo evanescente y de este modo su interacción con el entorno.
- Utilización de fibras de cristal fotónico de núcleo hueco o Hollow Core Fibers para aumentar la distancia del trayecto en el que la luz guiada en la fibra interactúa con el aire.

Se ha comenzado a trabajar sobre la última opción planteada, apareciendo los primeros problemas en cuanto al alineado de las fibras y el acople de luz entre ellas.

Líneas futuras

Los resultados obtenidos tanto en la caracterización de las fibras OSF como sensores de gas, así como del estudio de las causas de los resultados condujeron al planteamiento de dos posibles líneas futuras de investigación:

- Utilización de fibras “*Nanowires*” que dispongan de fábrica de las dimensiones requeridas [9].
- Continuación utilizando fibras *Hollow Core PCF* que permitan aumentar la distancia de interacción directa luz-gas manteniendo el guiado.

Los *Nanowires* (también llamados mircohilos o nanohilos) presentan dos propiedades interesantes para la medición de gases. Al reducir el diámetro total, se reduce el tamaño del núcleo, con lo que se consigue el desconfinamiento de los modos en su interior. Por otro lado, al reducir el tamaño de la cubierta, se consigue que el campo evanescente (las colas de la

distribución de potencia del modo) salga de la cubierta, pudiendo interactuar directamente con el gas que rodea a la fibra. Éste hecho se muestra de forma esquemática en la Figura 47.

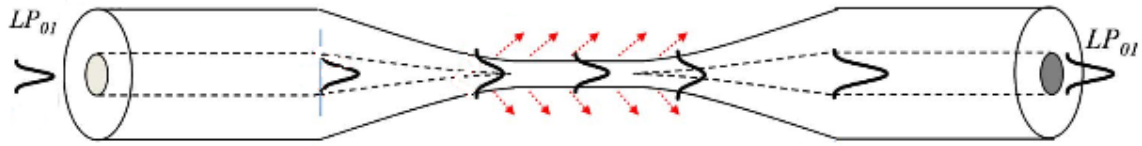


Figura 47. Esquema de un *Nanowire*.

El problema que presentan estas estructuras radica en su dificultad de fabricación, en la cual hay que controlar cuidadosamente los parámetros de calentado y estirado en todo momento así como en su fragilidad al tratarse de estructuras de pequeñas dimensiones (el diámetro de total de la cubierta puede rondar los $10\mu\text{m}$) [10].

Referencias.

- [1] A. M. R. Pinto, A. Lopez-Aldaba, M. Lopez-Amo, O. Frazao, J. L. Santos, J. M. Baptista, H. Baierl, J. -L. Auguste, R. Jamier, and P. Roy. *Characterization of a hybrid Fabry-Pérot Cavity based on a four-bridge double-Y-shape-core microstructured fiber*. Proc. SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 91577O (2 June 2014); doi: 10.1117/12.2059072.
- [2] S. Rota-Rodrigo; M. Lopez-Amo; J. Kobelke; K. Schuster; J. L. Santos; O. Frazão. *Control of the strain sensitivity using a suspended core photonic crystal fiber sensing head*. Proc. SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 91571Y (2 June 2014); doi: 10.1117/12.2055081.
- [3] S. Rota-Rodrigo, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, K. Schuster, J.L. Santos, O. Frazao. *Simultaneous strain and temperature measure based on a single suspended core photonic crystal fiber*. Proc. SPIE 9157, 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, 915721 (2 June 2014); doi: 10.1117/12.2059019.
- [4] Qiang Wu, Yuliya Semenova, Binbin Yan, Youqiao Ma, Pengfei Wang, Chongxiu Yu, and Gerald Farrell. *Fiber refractometer based on a fiber Bragg grating and single-mode–multimode–single-mode fiber structure*. Optics Letters, Vol. 36, Issue 12, pp. 2197-2199 (2011).
- [5] W. Jin, H.L. Ho, Y.C. Cao, J. Ju, L.F. Qi. *Gas detection with micro- and nano-engineered optical fibers*. Optical Fiber Technology Volume 19, Issue 6, Part B, December 2013, Pages 741–759.
- [6] Hoi L. Ho ; Wei Jin ; M. Suleyman Demokan. *Quantitative measurement of acetylene by using external cavity tunable diode laser*. Proc. SPIE 3852, Harsh Environment Sensors II, 124 (December 8, 1999); doi:10.1117/12.372834.
- [7] Ed Austin, Adriaan van Brakel, Marco N. Petrovich, David J. Richardson. *Fibre optical sensor for C₂H₂ gas using gas-filled photonic bandgap fibre reference cell*. Sensors and Actuators B: Chemical Volume 139, Issue 1, 20 May 2009, Pages 30–34.

[8] T. Ritari, J. Tuominen, H. Ludvigsen, J. C. Petersen, T. Sørensen, T. P. Hansen, and H. R. Simonsen. *Gas sensing using air-guiding photonic bandgap fibers*. Optics Express, Vol. 12, Issue 17, pp. 4080-4087 (2004).

[9] N. Díaz-Herrera, M.C. Navarrete, Ó. Esteban, A. González-Cano. *Aplicación de las fibras ópticas estrechadas a la medida de temperatura*. Departamento de Óptica. Universidad Complutense de Madrid.

[10] Gilberto Brambilla, Fei Xu, Peter Horak, Yongmin Jung, Fumihito Koizumi, Neil P. Sessions, Elena Koukharenko, Xian Feng, Ganapathy S. Murugan, James S. Wilkinson, and David J. Richardson. *Optical fiber nanowires and microwires: fabrication and applications*. Advances in Optics and Photonics, Vol. 1, Issue 1, pp. 107-161 (2009)

V. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El proyecto “Desarrollo de sensores en fibra de cristal fotónico para detección de gases y temperatura”, enmarcado dentro del proyecto ECOAL-MGT, consta de dos partes.

La primera parte se dedica al estudio experimental de una fibra microestructurada con un núcleo en forma de doble Y, con la cual se desarrollan un sensor de temperatura y un sensor de tensión.

Se han desarrollado y optimizado las técnicas de fusión y manipulación para tratar con la fibra MOF así como un programa de fusión específico y optimizado para la fibra. Se descartaron dos fibras microestructuradas debido a sus dimensiones y su imposibilidad de ser fusionadas con fibras convencionales.

Se ha desarrollado un sensor de temperatura, basado en una cavidad Fabry-Perot de $500\mu\text{m}$, que presenta una sensibilidad de $9.8\text{pm}/^\circ\text{C}$ y $11.93\text{pm}/^\circ\text{C}$ dependiendo de si se analizan los resultados con el OSA o con el OBR respectivamente. Los resultados de éste sensor se recogen en la publicación “*Characterization of a hybrid Fabry-Pérot Cavity based on a four-bridge double-Y-shape-core microstructured fiber*”.

Se ha desarrollado un sensor de tensión basado en 10cm de fibra MOF fusionados a una fibra SMF. A través de un micro-posicionador se caracterizó la fibra como sensor de tensión, presentando desplazamientos en longitud de onda de la señal al aplicar estiramientos sobre la fibra MOF. Éstos desplazamientos se estudiaron a través de la Transformada de Fourier de la señal y analizando la fase resultante, obteniéndose una sensibilidad de $0,018\pi \text{ rad}/\mu\epsilon$.

La segunda parte del proyecto consta del estudio de las fibras OSF para su aplicación como sensor de gas basado en la interacción entre el campo evanescente y el gas circundante.

Se han desarrollado y optimizado las técnicas de fusión y manipulación para tratar con ésta fibra así como un programa de fusión específico y optimizado para la fibra.

La Fibra 2 OSF quedó descartada debido a fallos estructurales que impedían la propagación de la luz en su interior.

Para las Fibras 3 y 4 OSF quedaron descartadas las estructuras en reflexión, ya que la potencia reflejada provenía de la fusión y no de la reflexión de Fresnel al final de la fibra.

Se han desarrollado diferentes sensores en transmisión con las fibras 3 y 4, presentando todos ellos respuestas interferométricas debidas a la birrefringencia de la fibra. En estos casos, en ninguno de los sensores desarrollados se logró encontrar las líneas de absorción del CO_2 .

Pero aun habiendo encontrado dichas líneas, la naturaleza interferométrica de los sensores resulta incompatible con la medición de gases a través de las líneas de absorción, ya que un desplazamiento en la interferencia enmascararía cualquier línea debido a su baja potencia.

El motivo de la inoperatividad de las fibras OSF para la medición de gases se basa en la baja potencia del campo evanescente presente causada por el excesivo tamaño del núcleo. Para observar las líneas a las longitudes de onda en las que se encuentran (ej: líneas de absorción del CO₂ en torno a 1570nm) es necesario un núcleo del orden de 1µm de diámetro o inferior, para garantizar la presencia de campo evanescente.

A través de un montaje en espacio libre con una longitud de 80mm entre dos lentes colimadas se encontraron las líneas de absorción del CO₂, presentando una potencia de 0,1dBm en el caso de la línea más potente.

Las alternativas para detectar gases estudiadas fueron la reducción del tamaño del núcleo de las fibras OSF para fomentar la presencia de campo evanescente o la utilización de fibras de núcleo hueco.

La primera de ellas fue rechazada por el XLIM debido al reducido tamaño de los puentes de la fibra, los cuales se romperían al disminuir el diámetro total de la fibra en un proceso de estirado (*taper*).

La segunda opción no se basa en la interacción entre el campo evanescente y el gas, si no en la interacción directa entre la luz guiada en el núcleo y el gas que lo ocupa (mismo fenómeno que en el caso del estudio en espacio libre). El problema en éste caso vino en el método de alinear las fibras dejando un espacio entre ellas para permitir la libre circulación del gas.

Otra línea futura, fuera del objetivo de utilizar fibras de cristal fotónico es la utilización de microhilos, los cuales dadas sus dimensiones presentan campos evanescentes elevados.

Materiales Utilizados

Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA)



MARCA MPB

MODELO P18

ESPECIFICACIONES

Rango típico de operación 1530-1565nm

Saturación potencia de salida 18,5 dBm

Aislador de entrada y salida.

Baja figura de ruido.

Fuente ancha de fibra dopada con Erbio.

MARCA Fiberwhite

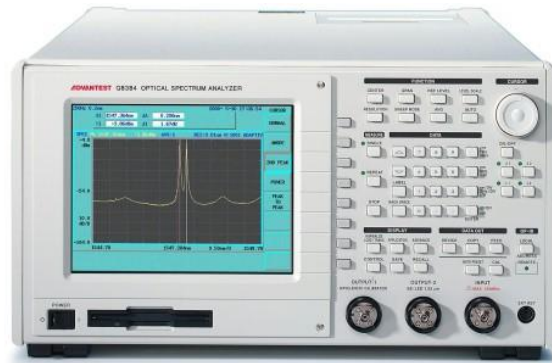
MODELO SPL

ESPECIFICACIONES

Rango típico de operación 1530-1610nm

Saturación potencia de salida ≥ 16 dBm

Analizador de espectros ópticos (OSA)



MARCA ADVANTEST

MODELO Q8384

ESPECIFICACIONES

<i>Resolución</i>	10pm
<i>Precisión</i>	20pm
<i>Rango dinámico</i>	60dBm
<i>Potencia máxima de entrada</i>	23dBm

OBR



MARCA Luna Technologies
MODELO 4600

PARAMETER	SPECIFICATION			UNITS
Maximum Device Length:				
Standard Mode	30 or 70			meters
Long Range Mode ¹²	2000			meters
Spatial Resolution (two-point)¹:				
	10 µm over 30 meters			
	20 µm over 70 meters			
	1 mm over 2 km			
Dead Zone:				
	Equals 2-pt spatial resolution			
Wavelength Range²:				
	1270-1340 or 1525-1610			nm
Wavelength:				
Resolution (max)	0.02			µm
Accuracy ³	±1.5			µm
Integrated Return Loss Characteristics:				
Dynamic range ⁴	70			dB
Total range	0 to -125			dB
Sensitivity	-130			dB
Resolution ⁵	±0.05			dB
Accuracy ⁵	±0.10			dB
Integrated Insertion Loss Characteristics:				
Dynamic range ⁶	18			dB
Resolution ⁵	±0.05			dB
Accuracy ⁵	±0.10			dB
Group Delay:				
Accuracy	1.0			ps
Distributed Sensing^{7,12,13}:				
Spatial Resolution ⁸	±1.0			cm
Temperature Resolution ⁹	±0.1			C
Strain Resolution ⁹	±1.0			µstrain
Measurement Timing¹⁰	Standard	Fast¹¹	Spot Scan¹¹	
5 nm scan time	3	1.6	0.3	s
Time vs. wavelength range	2.1 s+0.14 s/nm	1.3 s+0.06 s/nm	0.15 s+0.02 s/nm	-
Long Range (2 km) Scan Time	20			s

Láser sintonizable SANTEC

MARCA SANTEC

MODELO TLS 210

Category	Parameter	Unit	Specification	Notes
Wavelength Characteristics	Tuning Range (Maximum tuning width)	nm	-	Refer to "TSL-210 Wavelength Selection"
			-	Refer to "TSL-210 Wavelength Selection"
	Resolution	nm	0.01	0.001nm with fine tuning (210)
	Accuracy	nm	<±0.1	
	Repeatability	nm	<±0.05	N=50 /Measured at center wavelength
	Stability	nm	<±0.01	After a warm-up 1h/1hour /Measured at center wavelength
	Fine Tuning Range	GHz	10	=0.08nm
	Tuning Speed	ms/nm	170	
Power *	Output Power	mW	-	Refer to "TSL-210 Output Power"
	Accuracy	%	<5	
	Repeatability	dB	<±0.01	N=50 /Measured at center wavelength /at 6dBm
	Stability	dB	<±0.01	After a warm-up 1h/1hour /Measured at center wavelength
	APC Flatness	dB	<±0.2	Measured at 6dBm APC:Automatic Power Control
	(Built in Attenuator Option)	dB	0 to 20	Resolution 0.04dB (Typ.)
Environmental Conditions	(Built in Tracking Filter Option)	dB	20% down	3dB Bandwidth 3nm (Typ.), Resolution 0.24nm (Typ.)
	Operating Temp. Range	°C	20 ~ 30	
	Operating Humidity Range	%	<80	non condensing
	Storage Temp. Range	°C	10 ~ 40	
	Storage Humidity Range	%	<80	non condensing
	Recommendation Calibration Period	Year	1	
Spectrum	Spectrum Line Width (Coh. OFF)	MHz	<1	Measured at center wavelength
	Spectrum Line Width (Coh. ON)		1 to 500	Variable /Measured at center wavelength
	SSR	dB	>45	Measured at center wavelength
	RIN	dB	>145	Measurement Freq. <1GHz
Interface	Optical Connector	-	FC or SC	
	Optical Fiber	-	SMF or PMF	
	Connector Polish	-	SPC or APC	
	GP-IB & RS-232C	-	Yes	IEEE-488
Modulation	LF modulation	KHz	0 to 10	
	(RF Modulation option)	MHz	1 to 100	at 3dB Down
Power Supply	Voltage	V	AC100-240	
	Power Consumption	VA	35-55	
Dimensions	Width x Height x Depth	mm	210x110x370	
	Weight	kg	6	

Láser sintonizable



MARCA ANDO ELECTRIC
MODELO AQ8203

AQ8203 Halfsize Frame

Display	STN color LCD
Serial interface	For AQ8202 connection
GP-IB interface	IEEE-488.2 compatible
Number of mountable modules	3
Power requirements	AC 100 to 120 ($\pm 10\%$)/200 to 240 ($\pm 10\%$) V, 50/60 Hz, Max. 190 VA
Environmental conditions	Operation temperature: 5 to 40 °C Storage temperature: 0 to 50 °C Humidity: 85 % RH or less (no condensation) Overvoltage Category: II, contamination level: 2, maximum altitude: 2000 m
Dimensions and mass	Approx. 212 (W) x 132.5 (H) x 400 (D) mm Approx. 5.4 kg
Accessories	Battery cable: 1 (with 3/2 terminal conversion plug), remote interlock short plug: 1, remote interlock connecting plug: 1, optical output control key: 2, blank panel: 2, dust cover (for GP-IB connector: 1, for external expansion connector: 1), instruction manual: 1
Options	19-inch rack mount kit B (132.5) for connecting 2 units of AQ8203 19-inch rack mount kit C (132.5) for mounting 1 unit (left mount) of AQ8203 19-inch rack mount kit D (132.5) for mounting 1 unit (right mount) of AQ8203

Láser 1570nm



MARCA EBLANA PHOTONICS

MODELO EP1572-DM-DX1-FM

ESPECIFICACIONES

Potencia salida max

6dBm

Controlado a través del controlador de temperatura

PARAMETER	SYMBOL	MIN	MAX	UNIT	CONDITION
DX1 Power Supply	V_{CC}		5.5	V	
TEC Control Voltage	V_{TEC}	0.1	3	V	$1.5V = 25^{\circ}C (T = 6.9 * V_{TEC} + 14.4)$
Bias Control Voltage	V_{bias}	0	1.2	V	$I_{op} (A) = V_{bias} / 10, (1V=100mA)$
Fiber Bend Radius		30		mm	
		T_{min}	T_{max}		
Submount operating temp.	T_{sub}	0	50	$^{\circ}C$	
Storage temp.		-40	85	$^{\circ}C$	

Interrogador de redes



MARCA MICRON OPTICS

MODELO SM125

ESPECIFICACIONES

<i>Tipo de láser</i>	Láser de fibra
<i>Clase del láser</i>	1
<i>Potencia de salida (CW)</i>	>0.06mW <0.25mW
<i>Diámetro del haz</i>	9mm
<i>Apertura numérica</i>	0.1
<i>Rango de longitudes de onda</i>	1510-1590 nm

Interrogador multifunción



MARCA EXFO

MODELO FOT-930

EXTERNAL POWER METER			
	FOT-932	FOT-932X	FOT-933
Detector type	Ge	GeX	InGaAs
Measurement range (dBm)	10 to -70	26 to -55	6 to -73
Range displayed (dBm)	Down to -77	Down to -65	Down to -80
Uncertainty ^{b, c}	± 5 % ± 0.1 nW	± 5 % ± 3 nW	± 5 % ± 0.05 nW
Wavelength range (nm)	800 to 1650	800 to 1650	800 to 1650
Display resolution (dB) ^b	0.01	0.01	0.01
Calibrated wavelengths	40	42	40
Recommended recalibration period (years)	3	3	3
Automatic offset nulling ^d	Yes	Yes	Yes
Measurement-distance units	kilometers, meters, kilofeet, feet, miles	kilometers, meters, kilofeet, feet, miles	kilometers, meters, kilofeet, feet, miles

SOURCES					
	Standard	-4	-5	-12C (second port)	-12D (second port)
Wavelengths (nm) ^a	1310 ± 20 1550 ± 20	1310 ± 20 1550 ± 20 1625 ± 10	1310 ± 20 1490 ± 10 1550 ± 20	850 ± 25 1300 +50/-20	850 ± 25 1300 +50/-20
Emitter type	Laser	Laser	Laser	LED	LED
Minimum output power (dBm) ^a	-1/-1	-1/-4/-7	-1/-7/-4	-27/-27 (50/125 μm) ⁱ	-21/-21 (62.5/125 μm) ⁱ
Spectral width (nm) ^f	± 5/± 5	± 5/± 5/± 5	± 5/± 5/± 5	50/135	50/135
Stability (8 hours) (dB) ^g	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05	± 0.05

FasTEST					
	Standard	-4	-5	-12C (second port)	-12D (second port)
Wavelengths (nm)	1310 1550	1310 1550 1625	1310 1490 1550	850 1300	850 1300
Loss range (dB) ^h	60	56	56	40	46
Loss precision (repeatability) (dB) ⁱ					
side-by-side	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
loopback	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Length measurement range (km)	200	200	200	5	5
Length measurement uncertainty ^j	±(10 m + 1 % x length)				

Fusionadora de fibra óptica Fitel S175 v2000



MARCA Fitel
MODELO s175 v2000

ESPECIFICACIONES

<i>Fibras aceptadas</i>	SM/MM/DSF/EDF
<i>Diámetro de cubierta y núcleo</i>	0.25-0.9mm/0.1-0.15mm
<i>Longitud de agarre</i>	16mm
<i>Pérdidas medias</i>	0.02dB(SM) 0.01dB(MM) 0.04dB(DS)
<i>Reflexión</i>	-60dB
<i>Estimación de precisión</i>	+/- 0.05dB
<i>Tiempo de operación típico</i>	20s(Fusión) 90s(Calentar)
<i>Test de tensión</i>	299g

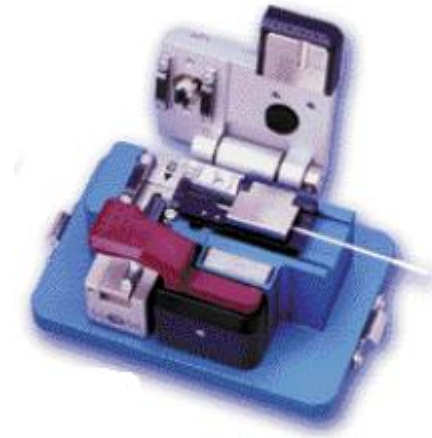
Peladora de fibra (stripper)



MARCA Miller
MODELO 125µm

Válida para fibras con cubiertas plásticas de 250µm o tubos de almacenamiento de 900µm.

Cortadora de fibra Fitel S324



MARCA Fitel

MODELO s324

ESPECIFICACIONES

Fibras aceptadas

Todas

Diámetro de cubierta aceptadas

0.25mm-0,9mm

Cortadora de fibra Fitel S324



MARCA Fitel

MODELO s325

ESPECIFICACIONES

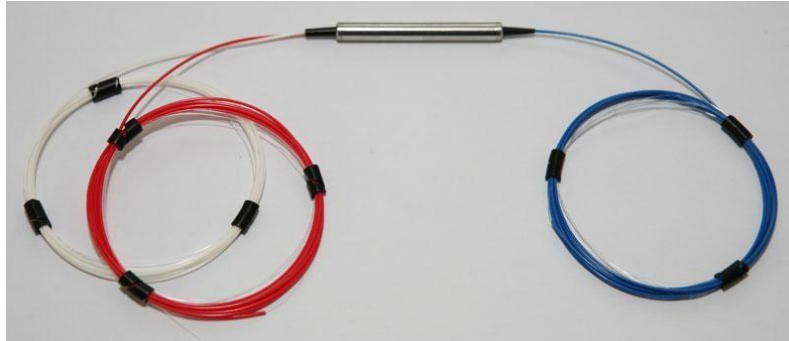
Fibras aceptadas

Todas

Diámetro de cubierta aceptadas

0.25mm-0,9mm

Circulador de tres puertos



MARCA LZX
MODELO CR-3-145-P-09-1FC/APC

ESPECIFICACIONES

<i>Pérdidas de inserción</i>	de 1 a 2	0.6dB
	de 2 a 3	0.61dB
<i>Aislamiento</i>	de 2 a 1	57dB
	de 3 a 2	60dB

Aislador 1570nm

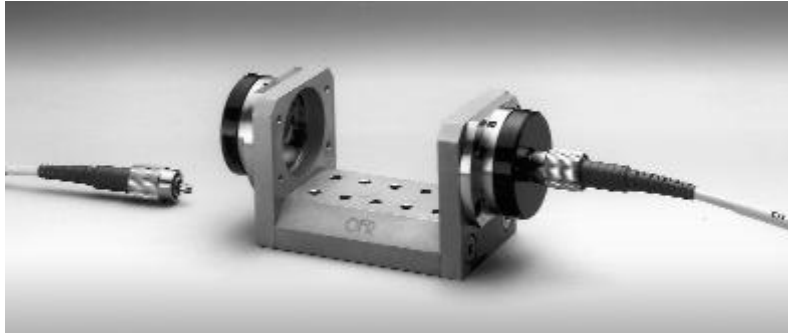


MARCA LZX
MODELO CR-3-145-P-09-1FC/APC

ESPECIFICACIONES

<i>Pérdidas de inserción</i>	de 1 a 2	0.6dB
	de 2 a 3	0.61dB
<i>Aislamiento</i>	de 2 a 1	57dB
	de 3 a 2	60dB

Colimador



MARCA LZX

MODELO CR-3-145-P-09-1FC/APC

ESPECIFICACIONES

Pérdidas de inserción

0.6dB

Fibra Hollow Core

MARCA NKT Photonics

MODELO HC-1550-02

- < 5% of optical power located in silica
- Gaussian-like fundamental mode
- Can be filled with gas
- Negligible bend loss
- Fresnel reflection of core mode to air $\lt; 10^{-4}$
- Mode effective index close to unity
- Numerical Aperture ~ 0.2
- Pure silica for good temperature stability

Hollow core Photonic Bandgap Fibers guide light in a hollow core, surrounded by a microstructured cladding of air holes and silica.

Since only a small fraction of the light propagates in silica, the effect of material nonlinearities is insignificant and the fibers do not suffer from the same limitations on loss as conventional fibers made from solid material alone.

Applications

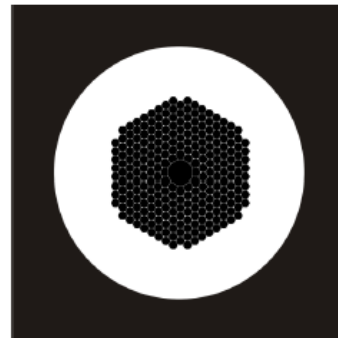
- Fiber optic gyroscopes
- Pulsed lasers (pulse delivery and/or compression)
- Gas spectroscopy
- Low latency communication

Physical properties	
Core diameter	10 ± 1 μm
Cladding pitch	3.8 ± 0.1 μm
Diameter of PCF region	70 ± 5 μm
Cladding diameter	120 ± 2 μm
Coating diameter	220 ± 30 μm
Coating material	Single layer acrylate

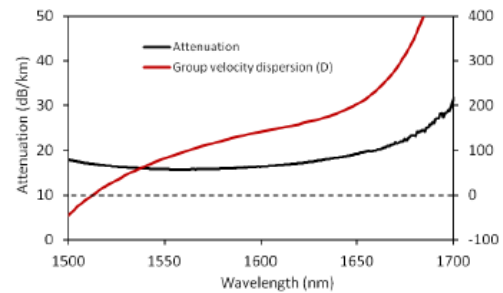
Optical properties	
Design wavelength	1550 nm
Attenuation @ 1550 nm	< 30 dB/km
Typical GVD @ 1550 nm	90 ps/nm/km
Operating wavelength ⁽¹⁾	1490-1680 nm
Mode field diameter @ 1550 nm ⁽²⁾	9 ± 1 μm

1. Over which the attenuation is < 30 dB/km
 2. Full 1/e²-width of the near field intensity distribution

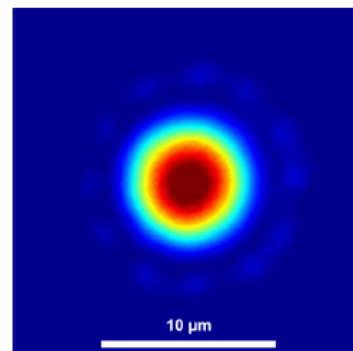
Schematic fiber cross section



Typical attenuation and dispersion



Typical near field intensity profile



Cámara de gas



MARCA HUTIPRE SL.

MODELO -

ESPECIFICACIONES

2x Latiguillos SMF

2x Latiguillos MMF

2x entrada/salida de gas

Micro-posicionador de línea



MARCA Ealing

MODELO 61-0329

ESPECIFICACIONES

<i>Rango de medida</i>	50mm
<i>Precisión de seguimiento</i>	4 μ m
<i>Precisión de lectura</i>	10 μ m
<i>Capacidad de carga (kg)</i>	
<i>Horizontal</i>	12
<i>Vertical</i>	0.3
<i>Patrón de cavidades</i>	M6
<i>Peso(kg)</i>	1

Microscopio



MARCA Leica

MODELO DM2500P

ESPECIFICACIONES

Aumentos

1,25x-100x

Software para control remoto

Estudio económico

Introducción

En este estudio económico se realiza una estimación del presupuesto del conjunto del Proyecto Fin de Carrera siendo considerado como un proyecto de investigación en una empresa. En él se tienen en cuenta el coste del personal encargado de realizarlo y el coste del material, instrumental y equipos de laboratorio empleados.

Coste de personal

Supondremos que el proyecto es realizado por un futuro ingeniero en telecomunicación, asesorado por un responsable cualificado, el cual dedica un 20% del tiempo de su trabajo a las tareas de asesoramiento y revisión.

Puesto	Sueldo (€/mes)	Cantidad	TOTAL (€)
Ing. de Telecomunicación	1500	14	21.000
Asesor Doctor	600	14	8.400

Al sueldo base de ambos se les debe añadir las gratificaciones así como las obligaciones sociales.

Cargas sociales	Porcentaje (%)
Indemnización por despido	3
Seguro de accidente	5
Subsidio familiar	3
Subsidio vejez	5
Abono festivos	10
Días de enfermedad	3
Plus cargas familiares	3
Gratificación extraordinaria	10
Otros conceptos	12
TOTAL	54 %

Por tanto, si a los sueldos anteriores le sumamos las cargas sociales obtendremos el salario total bruto.

Puesto	Salario base (€)	Cargas sociales	TOTAL (€)
Ing. de Telecomunicación	21.000	11.340	32.340

Asesor Doctor	8.400	4.536	12.936
			45.276 €

Coste material

En este apartado se incluye el coste de materiales adquiridos en alquiler y compra de equipos de laboratorio, el material fungible y la edición del proyecto.

Material alquilado

Parte del material utilizado en el estudio posee un coste muy alto para su utilización en un solo proyecto, por tanto se opta por alquilarlo. A continuación se detalla todo el material alquilado.

Equipo	Coste (€/mes)	Cantidad	TOTAL (€)
Interrogador SM125 Micron Optics	417	1	417
OSA Advantest Q8384	278	14	3.982
OBR 2400	750	7	5.250
Micro-posicionador PMC	48	1	48
Microscopio DM2500P	270	4	1080
Fuente luz blanca Fiberwhite	288	6	1.728
Fusionadora Fitel s175 v2000	350	14	4.900
Láser sintonizable SANTEC	170	1	170
EDFA MPB P21	270	1	270
Láser sintonizable ANDO	200	1	200
<i>Multifunction loss tester</i>	80	14	1.120
			19.012 €

Material adquirido

Este es el detalle el material adquirido.

Equipo	Coste (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Cámara de gas	1.200	1	1.200
Circulador LZX CR-3-145	480	1	480
Fibra HC-1550 NKT Photonics	205	14	2.870
Conectores mecánicos SMF	11,96	12	146,52
Láser Elbana 1570nm	1.400	1	1.400

Aislador 1570nm	310	1	310
Control de polarización	170	1	170
Atenuador variable	100	1	100
			6.676,52€

Coste total

Los costes calculados anteriormente forman parte del presupuesto de ejecución y material, sobre el que se calcula el beneficio industrial, y al cual se le aplica el IVA.

Coste de personal	45.276 €
Material alquilado	19.012 €
Material adquirido	6.676€
Presupuesto de ejecución	77.641 €
Beneficio industrial (10%)	7.764 €
Presupuesto sin IVA	85.405 €
IVA (21%)	17.935 €
TOTAL	103.340 €

Por tanto el coste final del proyecto asciende a un total de ciento tres mil trescientos cuarenta euros.

Anexo 1. Problemas modificaciones realizadas a la cámara de gas.

En primer lugar, la empresa encargada de la construcción de la cámara, en su preparación para el envío de la misma, sometió a los latiguillos a fuerzas de torsión que, tras su estudio con el OBR, afectaron a la estructura de los mismos, haciendo necesaria una reposición de latiguillos. Para su sustitución, siguiendo las instrucciones indicadas por el fabricante se comprobaron otros dos fallos:

- Las roscas de los interfaces de entrada/salida de los latiguillos no estaban bien acabadas y presentaban rebabas que impedían su correcto enroscado tal y como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Desperfectos en las roscas.

- El diámetro de la abertura de los interfaces entrada/salida era insuficiente para permitir pasar un conector FC/APC estándar de fibra, siendo necesario un limado del conector, tal y como se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Limado de los conectores FC/APC.

En la parte inferior de la Figura 9 se muestra un conector FC/APC estándar sin aplicar el proceso limado, mientras que en la parte superior se muestra otro conector resultante del proceso.

El último fallo a subsanar fue la falta de un tornillo en el cierre de la puerta de la cámara que implicaba una gran fuga de gas en su interior. A falta de tornillo y tuerca de la medida exacta y comprobada que su falta no implicaba fallo en el funcionamiento se decidió taponar este hueco con silicona para impedir la fuga de gases y garantizar la estanqueidad del interior de la cámara.