



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

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

Directores: Amaia Ortigosa Cayetano
Mikel Bravo Acha
Daniel Leandro González
Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 27 de Junio 2014



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

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

Directores: Amaia Ortigosa Cayetano
Mikel Bravo Acha
Daniel Leandro González
Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 27 de Junio 2014

AGRADECIMIENTOS

Antes de nada, me gustaría agradecer a todas las personas con las que he compartido todos estos años por su apoyo.

En primer lugar a Manuel López-Amo, por su confianza y por haberme dirigido el proyecto. Una mención especial merecen Mikel Bravo y Daniel Leandro por su apoyo, los ánimos (que han sido muchos), el tiempo invertido y por ayudarme con todos los problemas que han ido surgiendo a lo largo del proyecto. Gracias a ellos este proyecto ha salido adelante, y son merecedores de más de la mitad del mérito. A Santiago Tainta por ayudarme con la programación cuando no salía nada. También debo acordarme del proyecto de investigación CICYT TEC2010-20224-C02-01 del Ministerio de Ciencia e innovación la financiación recibida.

También a mis amigos y compañeros de carrera, especialmente a Andrea, Ángel, Leire, Itziar, Nerea y Raquel, con los que he compartido largos días de estudio en la biblioteca, los necesarios cafés de la máquina y los merecidos “juevintxos” para desconectar.

Sin olvidarme de mis amigos María y Asier, por estar siempre ahí (aunque haya muchos kilómetros de por medio). Y a mis compañeras de piso, Irache y Beatriz, por los ánimos y por aguantarme en los momentos de estrés .

Por último, agradecer a mi familia, especialmente a mis padres y a mi hermana por todo el apoyo mostrado durante todos estos años.

Muchas gracias a todos

Amaia

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
1.1 INTRODUCCIÓN.....	3
1.2 FIBRA ÓPTICA Y SU APLICACIÓN COMO SENSOR	3
1.2.1.1 Birrefringencia.....	5
1.2.2 Fibra de cristal fotónico (PCF).....	8
1.2.3 Sensores de fibra óptica	10
1.3 REDES DE DIFRACCIÓN DE BRAGG	11
1.3.1 FBG como sensor	13
1.3.1.1 FBG como sensor de deformación	14
1.3.1.2 FBG como sensor de temperatura.....	14
1.3.1.3 Medición de deformación y temperatura simultáneamente.....	15
1.4 SENSORES INTERFEROMÉTRICOS.....	16
1.4.1 Interferómetro de Sagnac.....	17
1.5 TÉCNICAS DE INTERROGACIÓN DE SENSORES FBG DE FIBRA ÓPTICA	18
1.5.1 Interrogador de fuente de luz sintonizable.....	20
1.6 ACOPLADORES	23
1.7 MULTIPLEXOR POR DIVISIÓN DE LONGITUD DE ONDA	27
1.8 CIRCULADORES	28
1.9 CONTROLADOR DE POLARIZACIÓN	30
CAPÍTULO 2 IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE.....	33
2.1 INTRODUCCIÓN.....	33
2.2 SOFTWARE DEL INTERROGADOR	36
2.2.1 Funciones principales	37
2.2.1.1 Conexión.....	38
2.2.1.2 Obtención de datos	39
2.2.1.3 Procesado de datos.....	42
i. FFT	43
ii. Promediado	44
iii. Picos y valles.....	47
2.2.1.4 Cierre de conexión	47
2.2.2 Interfaz gráfica.....	48

2.2.2.1	Opciones	48
i.	Una sola trama.....	49
ii.	Streaming	50
iii.	Promediado	52
iv.	Número determinado de tramas	53
v.	Motores.....	54
2.2.2.2	Visualización de datos por pantalla	54
2.2.2.3	Almacenamiento de datos.....	56
2.3	SOFTWARE PARA EL CONTROL DE LOS MICRO-POSICIONADORES.....	57
2.3.1	<i>Funciones principales</i>	58
2.3.1.1	Conexión.....	58
2.3.1.2	Habilitar ejes.....	59
2.3.1.3	Mover motores.....	59
2.3.1.4	Obtención de la posición	60
2.3.2	<i>Interfaz gráfica</i>	61
2.4	CONCLUSIONES	64

CAPÍTULO 3 MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO 67

3.1	INTRODUCCIÓN.....	67
3.2	CARACTERIZACIÓN DE UN SENSOR PCF	69
3.3	MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES PCF EN PARALELO.....	73
3.3.1	<i>Desarrollo experimental</i>	73
3.3.2	<i>Resultados</i>	77
3.3.2.1	Comportamiento de la red de sensores	77
3.3.2.2	Estabilidad del sistema	80
3.4	MULTIPLEXACIÓN DE DOS SENSORES PCF EN SERIE	82
3.4.1	<i>Desarrollo experimental</i>	82
3.4.2	<i>Resultados</i>	86
3.4.2.1	Sensores 0.5m y 1.3m.....	87
i.	Sin introducir atenuación en la señal de interferencia	87
ii.	Introduciendo atenuación en la señal de interferencia	90
3.5	CONCLUSIONES	92

CAPÍTULO 4 RED HÍBRIDA DE SENSORES FBG E INTERFEROMÉTRICOS INTERROGADA POR UN LÁSER CONMUTABLE MULTI-LONGITUD DE ONDA DE FIBRA ÓPTICA95

4.1	INTRODUCCIÓN.....	95
-----	-------------------	----

4.2	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	97
4.2.1	Fuente de luz MWFL conmutable	97
4.2.2	Red híbrida de sensores interferométricos y FBG.....	99
i.	Red de sensores FBG	99
ii.	Red de sensores PCF.....	100
iii.	Proceso de selección de la red de sensores	104
4.3	RESULTADOS	106
4.4	CONCLUSIONES	108
	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	111
	MATERIAL UTILIZADO	117
	ESTUDIO ECONÓMICO.....	135
	BIBLIOGRAFÍA.....	141
	ANEXO A Estructura de la cadena de datos del interrogador SM125	147
	ANEXO B Código de la función detección de picos (<i>peakfinder.m</i>)	151
	ANEXO C Resultados obtenidos para la estructura de multiplexación en serie de sensores PCF para las combinaciones 0.3 - 1m y 0.8 - 1.3m.....	157
	ANEXO D Publicaciones	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Propagación de la luz en función del tipo de fibra y la forma del núcleo.	4
Figura 1.2 – Representación esquemática de la ley de Snell	4
Figura 1.3 - 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.	7
Figura 1.4 - Sección transversal para fibra a) SMF b)PCF de núcleo sólido y c) PCF de núcleo hueco.....	8
Figura 1.5 – Ilustración esquemática de una Red de Difracción y su funcionamiento ...	12
Figura 1.6 - Configuración de un interferómetro Sagnac de fibra óptica	17
Figura 1.7 - Esquema de la estructura básica de un láser de fibra.	21
Figura 1.8 - Estructura interrogador con láser sintonizable	22
Figura 1.9 - Representación esquemática de la separación mínima entre sensores para evitar solapamientos.....	22
Figura 1.10 - Esquema de un acoplador 2x2.....	24
Figura 1.11 - Estructura acoplador 2x16.....	27
Figura 1.12 - Representación esquemática de un WDM.....	27
Figura 1.13 - Esquema de funcionamiento de un circulador de tres puertos con entrada en el puerto 1	28
Figura 1.14 - Esquema del Rotador de Faraday	29
Figura 1.15 - Controlador de polarización	30
Figura 2.1 – Panel frontal del interrogador SM125	34
Figura 2.2 - Comportamiento de un FBG usado como sensor de deformación	35
Figura 2.3 - Espectro de dos interferencias en estructura Sagnac	35
Figura 2.4 - Diagrama de flujo estructura de las funciones principales del software del interrogador	38
Figura 2.5 Estructura del array básico de datos	42
Figura 2.6 - Diagrama de flujo de la función promediados.m	44
Figura 2.7 - Esquema matriz auxiliar de promediados.....	45
Figura 2.8 - Evolución de la matriz de promediados en función del número de ejecuciones. (a) Número de ejecuciones = Número de promediados +1 (b) Número de ejecuciones = Número de promediados +2 (c) Número de ejecuciones =	

2*Número de promediados -1 (d) Número de ejecuciones = 2*Número de promediados	46
Figura 2.9 - Interfaz gráfica interrogador	48
Figura 2.10 - Opciones y parámetros de entrada	49
Figura 2.11 - Diagrama de flujo de la opción "Una sola trama"	49
Figura 2.12 - Diagrama de flujo de la función "Streaming"	51
Figura 2.13 - Diagrama de flujo de la opción "Promediado"	52
Figura 2.14 - Diagrama de flujo de la opción "Número determinado de tramas"	53
Figura 2.15 - Diagrama de flujo de la función muestra de datos por pantalla	55
Figura 2.16 Panel de selección de picos/valles	55
Figura 2.17 - Detalle de las opciones de almacenamiento de los resultados	56
Figura 2.18 - Diagrama de flujo de la función Guardar Datos	57
Figura 2.19 – Interfaz gráfico motores	61
Figura 2.20 - Diagrama de flujo de la función Movimiento Continuo	63
Figura 3.1 – Estructuras esquemática de un sensor interferométrico en estructura Sagnac realizado con 0.5m de PCF HiBi	69
Figura 3.2 - Resultado del espectro en longitud de onda obtenido para el interferómetro de 0.5m de longitud	69
Figura 3.3 - Representación de la magnitud y fase de la FFT obtenidas para el interferómetro de 0.5m	70
Figura 3.4 - Función de transferencia del interrogador SM125	71
Figura 3.5 - Comportamiento de la fase de la FFT en función de la deformación. a) barrido de deformación ascendente y b) barrido de deformación descendente.	72
Figura 3.6 - Variación en longitud de onda siguiendo un mínimo de la interferencia resultante del sensor de 0.5m	73
Figura 3.7 - Estructura del montaje multiplexación en paralelo de cuatro sensores PCF mediante un acoplador 2x8.	74
Figura 3.8 – Interferencia total compuesta por las interferencias de cuatro sensores de longitudes 0.3 ,0.8, 1 y1.3m	74
Figura 3.9 - Magnitud y fase de la FFT para la interferencia compuesta por cuatro interferómetros de longitudes 0.3, 0.8, 1 y1.3m,	75
Figura 3.10 - Patrón de interferencia para cada uno de los sensores PCF	75

Figura 3.11 - Magnitud de la FFT para cada uno de los sensores PCF..... 76

Figura 3.12– Variación de la fase de la FFT en función de la deformación aplicada cuando los cuatro interferómetros están actuando como sensores de deformación. 78

Figura 3.13 - Variación de la fase en función de la deformación aplicada si a) S1 b)S2 c)S3 y d)S4..... 79

Figura 3.14 - Variación de la fase de la FFT en función de la deformación aplicado cuando los cuatro interferómetros están actuando como sensores para barrido de deformación negativo..... 80

Figura 3.15 - Estabilidad que presenta la estructura de multiplexación de sensores PCF en paralelo. 81

Figura 3.16 – Representación esquemática de la estructura de multiplexación de dos sensores PCF en serie..... 82

Figura 3.17 – Representación esquemática de las diferentes opciones básicas en las que pueden estar colocados los ejes de polarización para la estructura de multiplexación en serie de interferómetros PCF. a) cuando los ejes de polarización para ambos sensores coinciden entre si y con los ejes de polarización de la fuente de luz b) ejes de polarización en sentido opuesto para entre los sensores pero coinciden con los ejes de polarización de la fuente de luz y c) ejes de polarización coincidentes entre sensores pero girados 45^a con respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz. 83

Figura 3.18 - Resultados ideales para las diferentes configuraciones posibles de los ejes de polarización entre dos secciones de fibra PCF y respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz. a) todos los ejes coincidentes entre sí, b) posición opuesta entre los ejes entre los sensores con la polarización resultante coincidente con los ejes de polarización de la luz y c) ambos sensores con ejes de polarización coincidentes y polarización resultante de los sensores rotada 45° con respecto a la de la fuente de luz. 85

Figura 3.19 - Representación del a) espectro de la interferencia resultante y b) magnitud y fase de la FFT..... 88

Figura 3.20 - Resultado obtenido para las variaciones de fase de la FFT en función de la deformación cuando a) el sensor S1 está sometido a deformación (0.5m) y b) el sensor S2 (1.3m).....	89
Figura 3.21 - Resultado de la variación de fase de la FFT en función de la deformación cuando los interferómetros S1(0.5m) y S2(1.3m) están actuando como sensores..	89
Figura 3.22 - Espectro en longitud de onda resultante al introducir una atenuación de 9.6dBm en la señal de interferencia.	91
Figura 3.23 - Resultado obtenido para las variaciones de fase cuando ambos interferómetros actúan como sensor en función de la deformación aplicada cuando la señal de entrada se encuentra atenuada 9.6dBm.	91
Figura .1 – Estructura del montaje experimental del MWFL conmutable y las redes de sensores	96
Figura 4.2 - .a) Número máximo de líneas de emisión de 100 GHz de separación y b) Número máximo de líneas de emisión de 200 GHz de separación para el sistema MWFL conmutado propuesto.	98
Figura 4.3 - Selección aleatoria de las líneas de emisión para el sistema MWFL conmutado propuesto.	98
Figura 4.4 - .a) Evolución de la potencia del láser vs. la potencia de bombeo Raman y b) estabilidad de una de las líneas de emisión a lo largo de 30 minutos medido cada 30 segundos.	99
Figura 4.5 – Esquema de la red de sensores de 11 FBG dispuestos en serie.	100
Figura 4.6 - Espectro de la red de 11 sensores FBG medido con el interrogador de sensores.	100
Figura 4.7 - Esquema para la caracterización de los canales del WDM	101
Figura 4.8 – Espectro de los canales WDM visto con el software desarrollado para el interrogador de sensores FBG.	102
Figura 4.9 - Estructura esquemática del sensor interferométrico PCF.....	102
Figura 4.10 - Esquema de la red de sensores interferométricos cuando el sensor de test esta situado en el canal 7 del WDM.....	103
Figura 4.11 - Variación de fase del espectro de la interferencia de un sensor en longitud de onda al ser sometida a deformación y como afecta a la potencia de una longitud de onda fija que interroga la estructura.	104

Figura 4.12 Representación esquemática del bloque correspondiente a las redes de sensores.	105
Figura 4.13 - a) Configuración del MWFL para la interrogación de la red de sensores PCF de intensidad.	105
Figura 4.14 – Composición del barrido en longitud de onda para una única línea de emisión.....	106
Figura 4.15 – a)Comportamiento de dos sensores PCF de intensidad cuando el primero no está sometido a tensión. b) Respuesta del sensor.	107
Figura 4.16 - Reconstrucción de la respuesta de la red de sensores FBG.....	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Clasificación general de los sensores de fibra óptica.	10
Tabla 1.2 - Variación de la longitud de onda de Bragg para la tensión y la temperatura en función de la longitud de onda de trabajo.	15
Tabla 1.3 - Métodos de interrogación de sensores FBG	20
Tabla 3.1 – Valores de longitud y frecuencia espacial de los cuatro sensores PCF.....	76
Tabla 3.2 - Valores de deformación para los cuatro sensores PCF	77
Tabla 3.3 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en paralelo	78
Tabla 3.4 - Resumen de los valores obtenidos para la deformación equivalente a la inestabilidad de la fase que presenta el sistema de multiplexación de cuatro sensores PCF en paralelo.	81
Tabla 3.5 - Resumen de las longitudes y deformación por medida de los sensores PCF utilizados.	86
Tabla 3.6 – Componentes frecuenciales de la magnitud de la FFT para los sensores 0.5 y 1.3m en serie	87
Tabla 3.7- Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.5m y 1.3m.	90
Tabla 3.8 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.5m y 1.3m cuando la señal de entrada se encuentra atenuada.	92

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.

Uno de los sensores de fibra óptica más utilizados son los basados en redes de difracción de Bragg (FBG, del inglés “fiber Bragg grating”), que son fundamentalmente variaciones periódicas del índice de refracción del núcleo la fibra óptica. Su naturaleza selectiva en longitud de onda hace que estos sensores sean utilizados en sistemas de multiplexación de sensores por división de longitud de onda (WDM), lo cual permite la conexión de múltiples sensores (con diferentes longitudes de onda de Bragg) en serie a lo largo una única fibra.

La existencia de dispositivos comerciales para la interrogación de sensores FBG permite la caracterización de los mismos haciendo uso de un único dispositivo que integra tanto una fuente de luz como un detector. Por lo tanto, resulta útil y altamente rentable el desarrollo de nuevas técnicas para la ampliación de la funcionalidad de este tipo de dispositivos, que permita aumentar el tipo de sensores y redes interrogadas. De esta manera su ámbito de uso no queda limitado a sensores FBG sino que sirve para analizar otro tipo de estructuras de fibra óptica en reflexión y transmisión, así como otro tipo de sensores (intensidad, interferométricos, etc.) y diferentes estructuras de multiplexación.

Todo lo comentado anteriormente son las bases de este proyecto final de carrera en el que, en primer lugar, se desarrollan dos programas. El primero para el control y ampliación de funcionalidades del dispositivo de interrogación SM125 de Micron Optics y un segundo programa para el control de unos micro-posicionadores motorizados.

En la segunda parte del proyecto se estudia y valida experimentalmente, mediante el uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) de la señal, el comportamiento de diferentes estructuras de multiplexación de sensores interferométricos, utilizando el dispositivo de interrogación SM125 y el *software* desarrollado. Este tipo de sensores son difíciles de combinar en una misma red pero, gracias al uso de la FFT, han podido presentarse dos nuevas estructuras para su multiplexación y monitorización en tiempo real.

Posteriormente, utilizando el programa diseñado, se valida una nueva técnica de interrogación para dos redes de sensores: una de ellas formada por FBGs y la otra por sensores interferométricos.

Finalmente, se realiza un estudio económico del proyecto final de carrera y se muestran las principales características del material utilizado. En los anexos se incluyen datos complementarios al proyecto como son la estructura de datos recibida por el interrogador, algunos de los resultados menos relevantes obtenidos para los esquemas de multiplexación de sensores interferométricos y, por último, se adjuntan las publicaciones obtenidas.

Capítulo 1 Fundamentos teóricos

1.1 Introducción

En este capítulo se describe brevemente la propagación de la luz por la fibra óptica, así como los diferentes tipos de sensores de fibra óptica como son las redes de difracción de Bragg (FBG) y los basados en interferencia. Además, se detalla brevemente los métodos de interrogación de sensores mediante dispositivos comerciales. También se realiza un resumen del funcionamiento y principales parámetros de algunos de los dispositivos utilizados en el montaje, tales como controladores de polarización, acopladores, multiplexores y circuladores.

1.2 Fibra óptica y su aplicación como sensor

La fibra óptica es, en esencia, una guíaonda cilíndrica en la que su estructura básica se caracteriza por estar formada 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 mas modos de guiado). Las principales fibras en función de la forma del núcleo y del número de modos guiados se muestran en la Figura 1.1

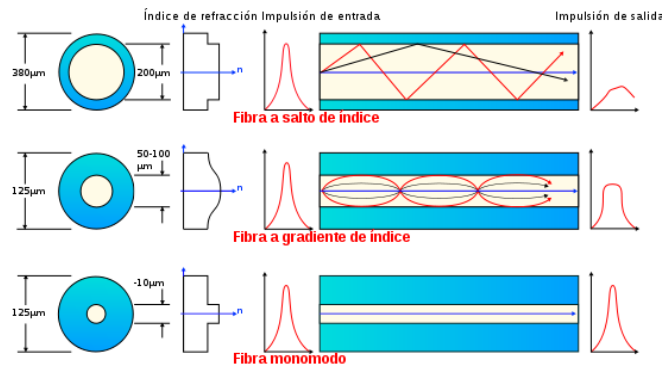


Figura 1.1 - Propagación de la luz en función del tipo de fibra y la forma del núcleo.

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.

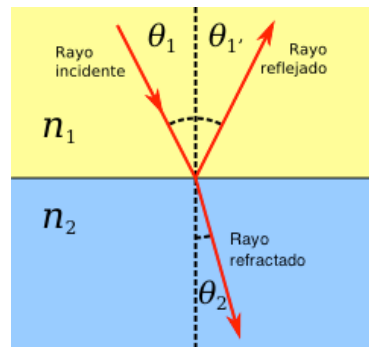


Figura 1.2 – Representación esquemática de la ley de Snell

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:

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

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 esta forma a la salida se obtiene el pulso de entrada ensanchado temporalmente.
- *Dispersión intramodal o cromática*. Esta es especialmente 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.

1.2.1.1 Birrefringencia

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 1.3 se muestra el ejemplo cuando se inyecta una señal formando 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.

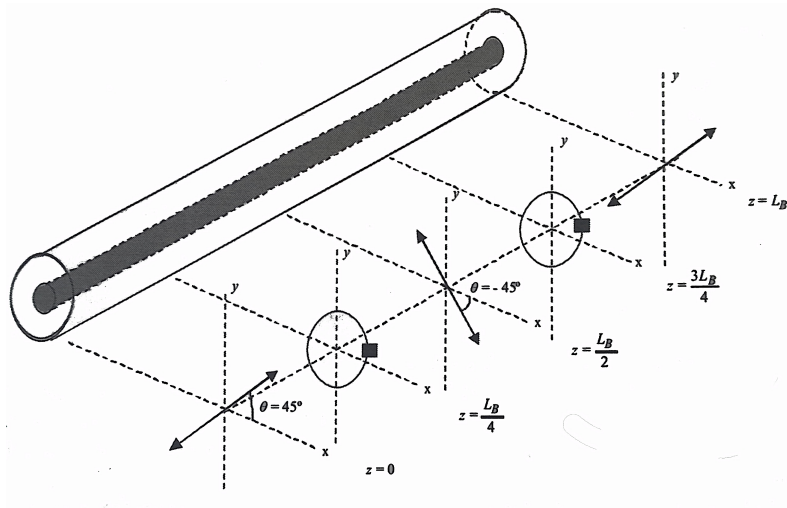


Figura 1.3 - Evolución del estado de polarización de una señal inyectada a una fibra birrefringente formando un ángulo de entrada de 45° con los ejes x e y.

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 el. 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.

1.2.2 Fibra de cristal fotónico (PCF)

En los últimos años las fibras de cristal fotónico han generado un gran interés debido a sus particulares propiedades para el guiado de la luz y sus aplicaciones, inalcanzables con la tecnología de la fibra óptica convencional. A principios de los años 90 se comenzó a investigar sobre este tipo de fibras y, desde entonces, se han encontrado aplicaciones no solo en las telecomunicaciones, sino también en otras áreas como en la biología o la astronomía [1].

Gracias a su peculiar estructura, con las fibras de cristal fotónico es posible obtener nuevas propiedades en cuanto a dispersión, efectos no lineales, potencia, o métodos de guiado de la luz, entre otras, que no se pueden conseguir con la fibra óptica común, lo que hace que el rango de aplicaciones en las que se puede utilizar sea muy amplio. Un ejemplo de este tipo de aplicaciones son las del campo de las telecomunicaciones, se pueden utilizar en la fabricación de láseres de gran potencia, amplificadores, demultiplexores WDM... Además, también pueden utilizarse para la fabricación de filtros ADD/DROP o, como el caso de este proyecto, sensores.

Las fibras de cristal fotónico (PCF) están caracterizadas por poseer una microestructura con orificios longitudinales alrededor del núcleo. En función de la forma del núcleo se distinguen dos tipos de PCF: de núcleo sólido y de núcleo hueco.

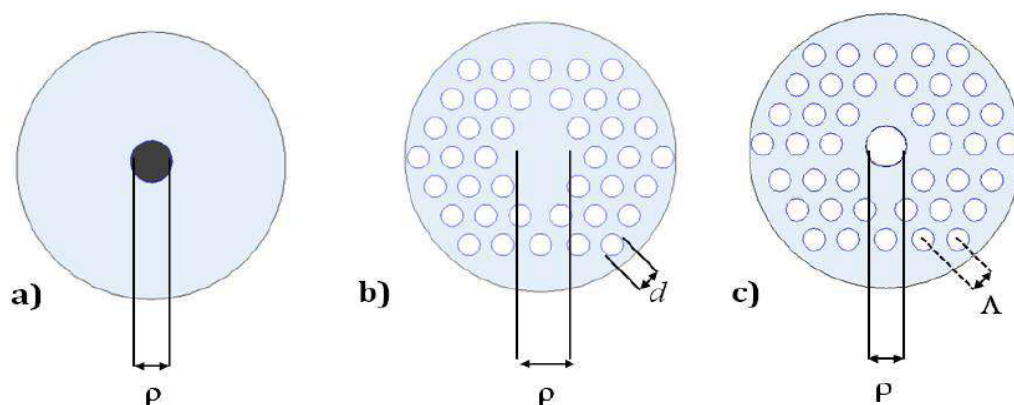


Figura 1.4 - Sección transversal para fibra a) SMF b)PCF de núcleo sólido y c) PCF de núcleo hueco.

Las PCFs de núcleo sólido presentan un núcleo sólido rodeado por un *array* periódico de agujeros de aire microscópicos. Por otro lado, las que poseen un núcleo hueco, presentan como núcleo un cavidad de aire, rodeado por una cubierta con una microestructura de cavidades de aire.

Durante el diseño, así como en el proceso de fabricación, existen diferentes parámetros físicos que se deben controlar en función de la fibra que se va a fabricar. En el caso de la fibra óptica estándar, el único parámetro a controlar es el diámetro del núcleo, ρ .

Para una fibra de cristal fotónico, serán tres los parámetros a controlar:

- 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.
- El diámetro de los huecos de aire de la cubierta.
- La distancia entre dos cavidades de aire consecutivas, Λ , también llamado *pitch*.

Estos tres parámetros, mostrados en la figura 1.4, en combinación con la elección del índice de refracción permiten realizar diferentes geometrías y diseños estructurales que implican otros mecanismos de guiado. Mientras que en las fibras convencionales la luz se guía por reflexión total interna en la región del núcleo, en este tipo de fibra, existen dos mecanismos de guiado:

- En el primero de ellos, la luz se confina en el núcleo, debido a que este tiene un índice de refracción mayor que el recubrimiento que contiene los huecos de aire.
- Mediante el segundo de los métodos de guiado, la luz se confina en el núcleo mediante el efecto *photonic bandgap* [2], [Pinto, Ana M.R. 2012. *Photonic cristal fiber for sensing applications*. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.]

1.2.3 Sensores de fibra óptica

Una vez vistas las principales propiedades de propagación involucradas en este proyecto se va a presentar como podemos beneficiarnos de estas características para la creación de sensores de fibra óptica.

Un sensor de fibra óptica [3] 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 una fuente de luz 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 .1 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 [4]. Algunas de ellas se citan a continuación [5]:

- 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 encuentran:

- 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. [Fernández Vallejo, Montserrat. 2012. *Contribution to the development of optical networks for fiber optic sensors using fiber lasers*. Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.]

1.3 Redes de difracción de Bragg

Las redes de difracción de Bragg son una estructura fotónica en fibra óptica que actúa como filtro rechazo banda estrecho. Como característica especial, estos elementos reflejan la banda rechazada en dirección de contra-propagación. Los FBGs pueden utilizarse como sensores [4] debido a la sensibilidad en longitud de onda a la deformación y la temperatura. Estos se clasifican como sensores de fibra óptica intrínsecos, simples, versátiles y de pequeño tamaño que son inscritos directamente en

la fibra de sílice. Consecuentemente, tienen todas las ventajas atribuidas a los sensores de fibra óptica: eléctricamente pasivos, inmunidad a ondas electromagnéticas, alta sensibilidad, bajo precio, buena linealidad y resistencia a entornos adversos. También, debido a que la información de la información esta codificada en la frecuencia de resonancia de la estructura (parámetro absoluto), estos dispositivos son auto-referenciados y pueden ser multiplexados fácilmente.

Una red de difracción de Bragg es un tipo de reflector Bragg distribuido, construido en un segmento corto de fibra óptica que refleja longitudes de onda particulares y transmite el resto. Esto se logra creando una variación periódica del índice de refracción en el núcleo de la fibra, creado mediante la exposición del núcleo a un patrón de interferencia óptico [6]. Dependiendo de la modulación presente en el índice de refracción, se distinguen diferentes tipos de redes de difracción de Bragg:

- *Fiber Bragg grating (FBG)*
- *Long-period fiber grating(LPG)*
- *Chirped fiber grating*
- *Tilted fiber grating*
- *Sampled fiber grating*

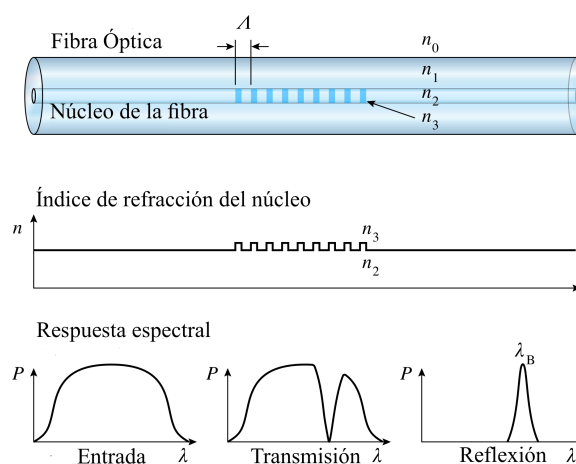


Figura 1.5 – Ilustración esquemática de una Red de Difracción y su funcionamiento

El principio fundamental de operación de un FBG es la reflexión de Fresnel, donde la luz que está viajando por el medio con diferentes índices de refracción se refleja y refracta en la interfaz. El índice de refracción suele alternarse dentro de una longitud definida. La longitud de onda reflejada (λ_{Bragg}), denominada longitud de onda de Bragg y queda definida mediante la siguiente fórmula:

$$\lambda_{Bragg} = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$$

donde n_{eff} representa el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo del índice de modulación refractivo. El índice de refracción va a cuantificar la velocidad de propagación de la luz comparándola con la velocidad de la luz en el vacío. Por lo tanto n_{eff} depende de la longitud de onda, pero también del modo de propagación de la luz.

La ecuación de Bragg revela las características de este tipo de estructuras. Cualquier perturbación que modifique el índice de refracción o el periodo provocará un cambio en λ_{Bragg} . De esta forma, las redes de difracción Bragg pueden ser consideradas como un transductor óptico intrínseco que cambia el espectro de la luz reflejada. Como la longitud de onda es un parámetro absoluto, este procesos es insensible a otras variaciones de los parámetros de la luz (como son la intensidad, la fase y la polarización) a lo largo del sistema óptico. Esta característica, en conjunto con la capacidad de multiplexación, ha dado a los FBGs una gran importancia en el dominio de sensores ópticos.

1.3.1 FBG como sensor

Los sensores FBG, en general, son utilizados para realizar mediciones de deformación, temperatura, tensión, presión, campos eléctricos o magnéticos dinámicos, vibraciones, etc. La longitud de onda central del FBG varia en función de los cambios en los valores de los parámetros que experimente la fibra óptica. Las mediciones que más interés han despertado son las de deformación y temperatura. Los correspondientes cambios de longitud de onda causados por estos parámetros se presentan en los siguientes subapartados.

1.3.1.1 FBG como sensor de deformación

La deformación afecta directamente en la respuesta de un FBG a través de la expansión y la compresión del tamaño de Λ (*grating pitch*) y del efecto deformación-óptica, es decir, la deformación introduce modificaciones en el índice de refracción efectivo debido a los efectos foto-elásticos. Las variaciones relativas en la longitud de onda, $\Delta\lambda_{Bragg}$, para una deformación longitudinal, $\Delta\varepsilon$, aplicada viene dada por la siguiente fórmula

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}(1 - \rho_\alpha)\Delta\varepsilon$$

Donde ρ_α representa el coeficiente foto-elástico de la fibra

$$\rho_\alpha = \frac{n^2}{2} [\rho_{12} - \nu(\rho_{11} + \rho_{12})]$$

donde ρ_{11} y ρ_{12} son las componentes del tensor de deformación de la fibra óptica y ν es el coeficiente de Poisson. Los valores para una fibra óptica convencional son $\rho_{11}=0.113$, $\rho_{12}=0.252$, $\nu=0.16$ y $n=1.482$ [7]. La respuesta de la deformación medida a temperatura constante viene determinada por [8]

$$\frac{1}{\lambda_{Bragg}} \cdot \frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta\varepsilon} = 0.78 \times 10^{-6} \mu\varepsilon^{-1}$$

Medida en $\mu\varepsilon^{-1}$ donde el $\mu\varepsilon$ es la deformación correspondiente a $\frac{1 \mu m}{m}$

1.3.1.2 FBG como sensor de temperatura

La sensibilidad térmica de un FBG ocurre principalmente por el efecto del cambio de índice de refracción termo-inducido y en menor medida debido al coeficiente de

expansión térmico de la fibra. Para una variación de temperatura ΔT , el cambio en la longitud de onda de Bragg viene representado por:

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}(\alpha + \xi)\Delta T \approx \lambda_{Bragg}(1 + \xi)\Delta T$$

donde ξ y α representan el coeficiente termo-óptico de la fibra y el coeficiente de expansión térmica respectivamente (valores típicos $\xi=8.6 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y $\alpha=0.55 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ [7]). Finalmente, la responsividad térmica normalizada considerando una tensión de la fibra constante es[8]:

$$\frac{1}{\lambda_{Bragg}} \cdot \frac{\Delta\lambda_{Bragg}}{\Delta T} = 6.67 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

1.3.1.3 Medición de deformación y temperatura simultáneamente

Debido a que los cambios en la longitud de onda de Bragg son sensibles simultáneamente tanto a la temperatura como a la deformación, en aplicaciones prácticas no se puede asociar un cambio en la longitud de onda a valores específicos de deformación o temperatura. Las variaciones en la longitud de onda se deducen combinando las ecuaciones de cada caso por separado, de forma que se obtiene

$$\Delta\lambda_{Bragg} = \lambda_{Bragg}[(1 + \xi)\Delta T + (1 - \rho_\alpha)\Delta_\epsilon]$$

En la Tabla 1.2 se presentan los valores típicos para el cambio de la longitud de onda de Bragg para la temperatura y la deformación, aunque estos dependen del tipo de FBG [9], [10].

	830nm	1300nm	1550nm
Cambio de longitud de onda para la tensión (pm/mε)	~0.64	~1	~1.2
Cambio de la longitud de onda para la temperatura (pm/°C)	~6.8	~10	~13

Tabla 1.2 - Variación de la longitud de onda de Bragg para la tensión y la temperatura en función de la longitud de onda de trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, debido a la sensibilidad cruzada que presentan este tipo de sensores a la temperatura y deformación, son necesarias diferentes técnicas

para una correcta medida de uno o ambos de los parámetros. Típicamente se utiliza otro sensor para compensar el efecto de uno de los parámetros, aunque también pueden utilizarse FBGs con apantallamiento térmico o no sujetos a deformaciones. [Fernández Vallejo, Montserrat. 2012. *Contribution to the development of optical networks for fiber optic sensors using fiber lasers*. Tesis doctoral. Universidad pública de Navarra. Pamplona.]

1.4 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 corresponderá 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 de dicha luz. Existen varios 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. Los más comunes son el interferómetro Mach-Zender, Michelson, Fox-Smith, Sagnac y SMS (monomodo-multimodo-monomodo). En este proyecto se va a hacer uso, en particular, de la estructura Sagnac, la cual se explica más detalladamente en el siguiente apartado.

1.4.1 Interferómetro de Sagnac

En la Figura 1.6 se presenta la estructura correspondiente a un reflector o espejo de fibra, también denominado Interferómetro de Sagnac. En esencia, está constituido por un tramo de fibra óptica de longitud L , que se interconecta a las salidas de un acoplador tal y como muestra la figura.

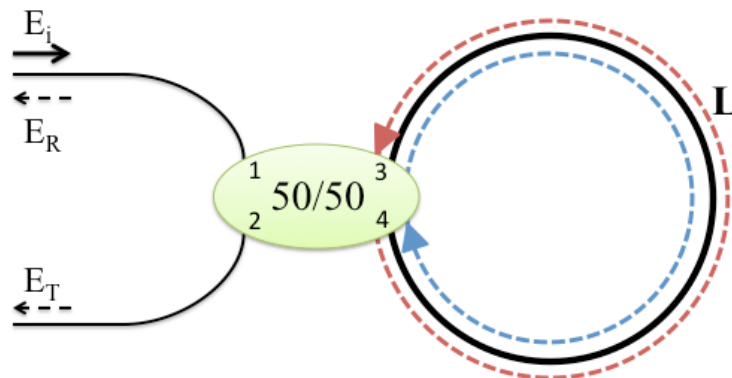


Figura 1.6 - Configuración de un interferómetro Sagnac de fibra óptica

Su funcionamiento es el siguiente: se inyecta la señal al dispositivo por el puerto 1 (E_i) del acoplador, ésta se divide en dos partes dentro del acoplador que recorren el lazo de fibra siguiendo sentidos de giro opuestos. Al finalizar el recorrido se combinan de nuevo en el acoplador, de forma que una parte de la componente de campo eléctrico E_R vuelve a salir por el puerto 1 (señal reflejada) y por otra parte la componente E_T sale por el puerto 2 (señal transmitida).

Debido al hecho de que las señales que se combinan en el acoplador y se dirigen hacia el puerto 2 están desfasadas π radianes entre si debido al efecto del acoplador, es posible eliminar completamente la señal transmitida. Cabe recalcar que ambas recorren el mismo camino, aunque en sentidos opuestos, por lo que el desfase relativo entre ambas al propagarse por el anillo de fibra es nulo. Si las amplitudes de ambas contribuciones son la misma (acoplador 50:50), entonces ambas señales tienen la misma amplitud pero fase opuesta, por lo que su suma es nula.

En general, si la estructura es pasiva, entonces, se verifica que el cambio de fase experimentado por la señal que recorre el anillo en sentido de las agujas del reloj es el

mismo que el experimentado por la señal que lo recorre en sentido inverso, por lo que el desfase relativo entre ambas es nulo. Sin embargo, es posible introducir en el anillo elementos no recíprocos (por ejemplo un controlador de polarización) que alteren dicha situación de equilibrio. Cuando esto sucede, el interferómetro Sagnac posee interesantes aplicaciones como sensor, entre otras.

Al utilizar una fibra óptica altamente birrefringente dentro de este tipo de interferómetro, la diferencia existente entre las velocidades de propagación de los estados de polarización dentro del interferómetro Sagnac está ligada a la alta birrefringencia de la fibra. Como se ha comentado en el apartado 1.2.1.1 la birrefringencia es un parámetro físico que muestra la diferencia entre los índices de refracción de los ejes de propagación x e y . Esta diferencia entre índices de refracción implica una diferencia de fase ($\Delta\varphi$) entre las ondas propagadas:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi BL}{\lambda}$$

donde L corresponde a la longitud de la fibra y λ es la longitud de onda de operación. El espectro de transmisión que presenta el interferómetro de Sagnac sigue aproximadamente una función periódica en función de la longitud de onda tal que:

$$T = \left[\text{sen}\left(\frac{BL}{\lambda}\right) \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \right]$$

donde θ_1 y θ_2 representan los ángulos de entrada y de salida de la luz en el eje de propagación en la fibra birrefringente.

1.5 Técnicas de interrogación de sensores FBG de fibra óptica

Los métodos de interrogación de sensores FBG están orientados a convertir las variaciones en longitud de onda de Bragg en señales eléctricas con unas características adecuadas para poder obtener la información a partir de la medición realizada [11]. La técnica más simple consiste en utilizar los espectrómetros convencionales que se utilizan en los laboratorios. Sin embargo, los analizadores de espectro óptico de alta

resolución son inapropiados para los sistemas reales de sensores, no solo por su elevado precio y gran tamaño, sino también por sus limitaciones en velocidad para la medición dinámica de sensores [12]. Existen varios métodos para la interrogación sensores FBG, pero solo algunos de ellos son prácticos, compactos y con un coste asequible para poder ser usados en aplicaciones reales [8], [13].

Una técnica ideal de interrogación tendría que poseer las siguientes características:

- Alta sensibilidad a las variaciones de la longitud de onda de Bragg.
- Gran Rango de medida.
- Inmunidad a las fluctuaciones de potencia óptica.
- Baja sensibilidad al entorno.
- Compatible con la multiplexación de sensores.
- Simplicidad.
- Bajo coste.

En general, los sistemas de detección activa requieren de sistemas más complejos que usualmente conllevan escaneo o modulación. Comparándolos con los que usan detección pasiva, los sistemas activos muestran mayor resolución. La mayoría de estas técnicas de demodulación están basadas en filtros de corte, filtros sintonizables, métodos interferométricos de escaneo y métodos interferométricos de escaneo de doble cavidad. Estos se diferencian en el principio de operación utilizado para detectar las variaciones en longitud de onda. Algunos de los sistemas de interrogación más utilizados se muestran en la Tabla 1.3.

Métodos de interrogación	Observaciones
Métodos de detección pasiva	Dispositivo con dependencia lineal en longitud de onda Espectrómetro CCD Detección en potencia
Métodos de detección activa	Filtro Fabry-Perot Interferómetro Mach-Zender no balanceado Espectrómetro transformada de Fourier Par de FBGs igualados Interferómetro de Michelson
Otros métodos	Fuente de luz sintonizable Correlador óptico CDMA Modulación frecuencial

Tabla 1.3 - Métodos de interrogación de sensores FBG

La elección del método de interrogación depende de diversos factores como pueden ser el rango a medir, la precisión y sensibilidad requeridas, el número de sensores a interrogar y el coste del equipo [14]. [Fernández Vallejo, Montserrat. 2012. *Contribution to the development of optical networks for fiber optic sensors using fiber lasers*. Tesis doctoral. Universidad pública de Navarra. Pamplona.]

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado un interrogador (SM125 de Micron Optics) cuya fuente de luz es un láser sintonizable. A continuación se describe el funcionamiento de este tipo de interrogador.

1.5.1 Interrogador de fuente de luz sintonizable

Hoy en día se utilizan interrogadores formados por un láser sintonizable de alta potencia (capaz de concentrar la energía en una banda muy estrecha del espectro y proporcionado una elevada SNR) y un fotodetector. Este dispositivo está formado por un láser de fibra óptica, probablemente dopado con tierras raras. Un láser de fibra óptica se comporta como una estructura de guía-onda que puede tener altas densidades de potencia en el

núcleo. Al estar basados en fibra óptica tienen todas las ventajas que la tecnología permite: bajas pérdidas por dispersión, bajas absorciones no deseadas, pocas imperfecciones del material. Permiten un buen solapamiento entre las ondas guiadas del bombeo y de emisión láser cuando se utilizan fibras monomodo en ambas longitudes de onda. Las fibras ópticas presentan una relación entre superficie y volumen alta que permite una buena disipación del calor.

Los diferentes diseños permiten obtener anchuras de línea muy estrechas y longitudes de onda sintonizables, operando con una potencia umbral de bombeo baja. La longitud de onda de emisión láser viene determinada por el dopante y su característica espectral, por lo que, variando tanto la composición como la densidad de dopaje, se podrá modificar el espectro de emisión del láser. En la Figura 1.7 se muestra la estructura básica de un láser de fibra óptica.

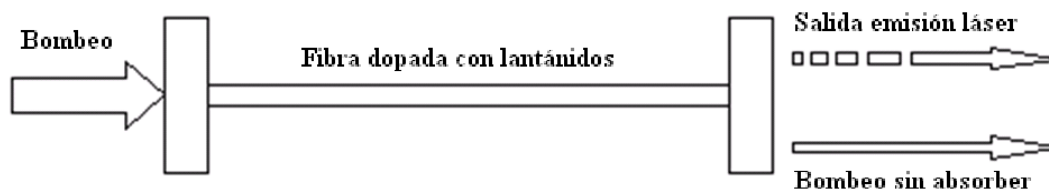


Figura 1.7 - Esquema de la estructura básica de un láser de fibra.

La alta potencia óptica generada por esta arquitectura permite que una sola fuente de luz pueda estar conectada simultáneamente a varios canales. El funcionamiento se basa en que el láser barre todo el rango de longitudes de onda y simultáneamente el fotodetector mide las reflexiones provocadas por los sensores FBG. Así cuando la longitud de onda del láser se iguala a la longitud de onda Bragg de uno de los FBGs, el fotodetector recibe respuesta correspondiente. La estructura básica de un interrogador basado en una fuente de luz sintonizable se muestra en la Figura 1.8.

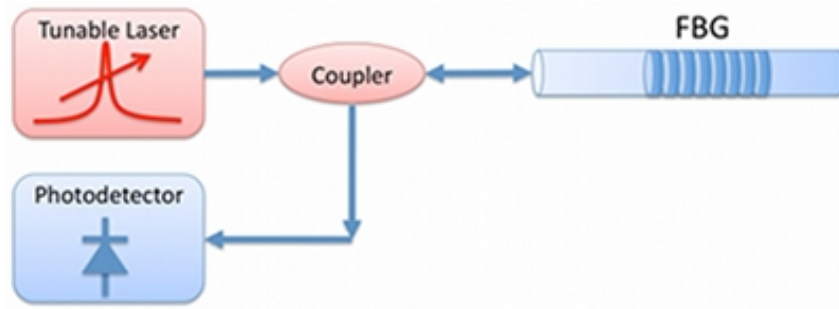


Figura 1.8 - Estructura interrogador con láser sintonizable

El número de sensores que se pueden incorporar en una sola fibra depende tanto del rango de operación de cada sensor como del rango de longitud de onda total disponible en el interrogador (valores típicos de 60 a 80nm). Para asegurar que cada sensor opera en un rango espectral único, evitando que las longitudes de onda de Bragg de varios sensores interfieran (ver figura 1.9), se deben seleccionar correctamente las longitudes de onda de cada sensor y su rango espectral.

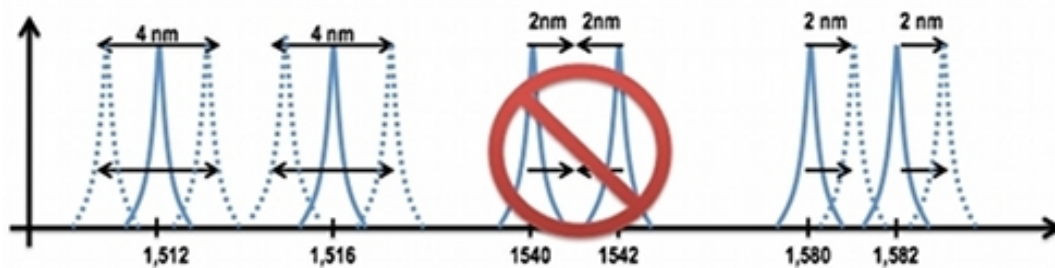


Figura 1.9 - Representación esquemática de la separación mínima entre sensores para evitar solapamientos.

Debido a que las longitudes de onda de operación de los sensores FBG se encuentran en el rango de los nanómetros, los interrogadores deben realizar medidas con una resolución de picómetros. Las características para el caso particular del interrogador SM125 de Micron Optics aparecen adjuntas en el apartado “MATERIAL UTILIZADO”.

1.6 Acopladores

Los sistemas de comunicaciones ópticas precisan de elementos capaces de transferir energía de una o varias fibras ópticas a otra u otras. Tradicionalmente, la función de transferir señales entre caminos ópticos diferentes se ha realizado mediante divisores de haz, sin embargo, en el caso de la transmisión guiada de señales ópticas, esta función puede ser desarrollada por los acopladores.

Un acoplador es un dispositivo pasivo que se encarga de distribuir la energía procedente de M guías de entrada en N guías de salida. Según la naturaleza de las guías que se deseen interconectar, los acopladores pueden ser para fibra monomodo o multimodo. Los acopladores tienen aplicaciones interesantes tanto en la división de potencia, como en la multiplexación/demultiplexación en longitud de onda, en la división por polarización, etc.

Hasta la fecha se han desarrollado dos tecnologías para la fabricación de acopladores: la basada en óptica integrada y la de fibra óptica. Los principios de funcionamiento son similares para ambos casos, aunque en este apartado se realizará una descripción detallada de los acopladores de fibra óptica.

Este efecto puede analizarse en función del campo modal del modo guiado que se extiende más allá del núcleo. Así, cuando dos núcleos de fibra (o guía-ondas planas) se aproximan lo suficiente de tal forma que sus campos modales se solapan, entonces los modos de las dos fibras se acoplan y la potencia puede ser transferida periódicamente entre las dos fibras. Este mecanismo se puede describir por la teoría acoplo de modos.

Si la constante de propagación de los modos de las dos fibras es igual, entonces la potencia adaptada entre las guías es completa. Para un acoplador direccional con dos fibras monomodo idénticas, si $P_1(0)$ es la potencia lanzada a la fibra 1 y despreciando pérdidas ópticas, entonces a cualquier longitud de acoplo z , la potencia que se propaga en las dos fibras sigue la siguiente ecuación:

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2(kz)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \sin^2(kz)$$

donde k es el coeficiente de acoplo y es una medida de la fuerza de la interacción entre las dos fibras, la cual depende de los parámetros de la fibra, la distancia entre núcleos y la longitud de operación. En relación con las ecuaciones anteriores, se tiene que se da un cambio periódico de la potencia entre las dos fibras a lo largo de la zona de acoplo z . En $z = q\pi/k$ ($q = 0, 1, 2, \dots$) se tiene que $P_1(z) = P_1(0)$ y $P_2(z) = 0$ (toda la potencia está en la fibra de entrada). Para valores de $z = (q+1/2)\pi/k$ entonces se tiene que $P_1(z) = 0$ y $P_2(z) = P_1(0)$, es decir, toda la potencia se acopla en la otra fibra. El valor de $z = L_c = \pi/2k$ se denomina longitud de acoplo del acoplador direccional.

Para explicar el funcionamiento de este dispositivo se va a hacer uso de un acoplador direccional 2x2 (dos entradas y dos salidas), el más utilizado en la actualidad en sistemas de comunicaciones ópticas monomodo y multimodo. Basándose en la Figura 1.10, se tiene que la potencia que se introduce en el puerto de entrada es P_{in} , P_2 es la potencia transmitida, P_3 es la potencia acoplada en la otra fibra, P_4 es la potencia reflejada y P_1 es la potencia reflejada de retorno.

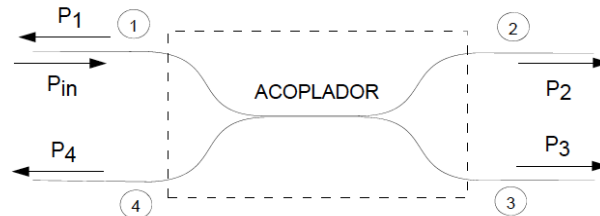


Figura 1.10 - Esquema de un acoplador 2x2

Los parámetros fundamentales que caracterizan al acoplador son los siguientes:

- a) Constante de acoplo (*coupling ratio*), indica la división de la potencia óptica entre los puertos de salida.

$$k = \frac{P_3}{P_2 + P_3}$$

La constante de acoplo, k , es dependiente de la longitud de onda, por lo que las características del acoplador pueden variar con la frecuencia de funcionamiento. Este efecto se aprovecha para la implementación de filtros ópticos, multiplexores y demultiplexores de longitud de onda.

- b) Pérdidas de exceso (*excess losses*), indica la relación entre la potencia total de entrada al dispositivo y la potencia de salida del mismo.

$$EL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_2 + P_3} \right)$$

- c) Pérdidas de inserción (*insertion losses*), representa las pérdidas introducidas por el acoplador al considerar la propagación de la señal a través de una determinada configuración de puerto de entrada y puerto de salida

$$IL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_2} \right) \text{ (Para el puerto 2)}$$

- d) Pérdidas de retorno, mide el aislamiento entre la potencia óptica de entrada y la reflejada en ese mismo puerto. Parámetro muy importante en las aplicaciones interferométricas donde se usan fuentes de luz láser

$$RL = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_1} \right)$$

- e) Directividad del acoplador, representa la fracción de la potencia de entrada que el acoplador devuelve en forma de señal retro-propagada a la guía 2.

$$D = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_4} \right)$$

Los acopladores, en tecnología de fibra óptica, se clasifican en dos tipos según el mecanismo empleado para conseguir el acoplo de señales:

- a) *De campo evanescente*

Para conseguir el acoplo de señales se aprovecha el campo evanescente del modo fundamental de una guía, para excitar la aparición y propagación del modo fundamental en la otra, provocando una transferencia de energía controlable.

Se forma colocando dos guías muy próximas entre sí. Para ello, se elimina parte de las cubiertas de las fibras que lo componen, con el fin de facilitar el acoplo de los campos

evanescentes. La constante de acoplo de los dispositivos fabricados mediante este proceso puede ser controlada para obtener cualquier valor entre 0 y 1.

Su modo de funcionamiento es el siguiente, el campo evanescente del modo fundamental de una de las dos guías excita la aparición del modo fundamental en la otra guía, cuyo campo evanescente a su vez excita y provoca una transferencia de energía a la guía de partida. Este proceso se produce de manera continua y provoca un intercambio periódico de la señal entre las dos guías.

b) De interferencia modal

Se realiza juntando dos fibras en una región de unos pocos milímetros, de forma que el vidrio de las dos fibras se funda conjuntamente en la zona de contacto y a continuación se estira para conseguir la longitud de iteración deseada. El guiado en la región de acoplo se realiza en la superficie de separación aire-vidrio de la cubierta. La constante de acoplo está determinada por la longitud de iteración, distancia entre los núcleos, los radios de los núcleos y los índices de refracción.

Para lograr el acoplo de señales en este caso se crea una zona bimodal común a las dos guías consiguiéndose la transferencia de energía por medio de una interferencia controlada entre los dos modos que pueden propagarse por dicha zona.

La zona de acoplo no está constituida por dos guías físicamente separadas, sino por una región común de dimensiones superiores a las de cada una de las guías de entrada y salida, de forma que dentro de ella pueden propagarse dos modos. El acoplo de energía entre ellos es el que produce la transferencia de energía de una guía a otra.

Al combinar en cascada acopladores básicos de 4 puertos, explicados previamente, se pueden crear arquitecturas más complejas como 2×2^n o $M \times N$ (Figura 1.11)

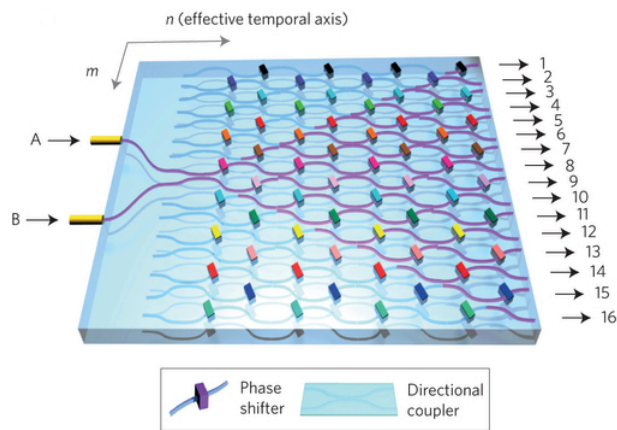


Figura 1.11 - Estructura acoplador 2x16

1.7 Multiplexor por división de longitud de onda

Un multiplexor por división de longitud de onda (WDM) es un dispositivo pasivo bidireccional. En uno de sus sentidos, combina las longitudes de onda de sus entradas uniéndolas en una sola salida. En el otro, realiza el proceso inverso (de-multiplexor), separando las longitudes de onda entre sus salidas. Los WDM permiten por lo tanto la transmisión simultánea de dos o más señales ópticas independientes y con distintas longitudes de onda que viajaban por caminos distintos. Pueden verse como acopladores selectivos en longitud de onda.

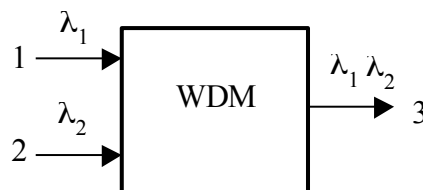


Figura 1.12 - Representación esquemática de un WDM

El multiplexor más simple está constituido por dos entradas y una salida como el que se muestra en la figura 1.12. A continuación, se muestran los parámetros más importantes de un multiplexor:

- Pérdidas de inserción: P_1/P_2 ó P_3/P_2

- Aislamiento o diafonía: cuando el WDM actúa como demultiplexor, este parámetro indica la cantidad de potencia de un canal que aparece en la salida correspondiente al otro.
- Directividad: es la medida de la cantidad de potencia introducida por la entrada 1 que sale por la 3 y viceversa.

En este proyecto se ha hecho uso de un WDM de dos entradas y ocho salidas para la red de sensores del apartado 4.2.2ii.

1.8 Circuladores

Un circulador es un componente de fibra óptica que puede ser usado para separar señales ópticas que viajan en sentidos opuestos dentro de una fibra óptica.

El concepto de funcionamiento de un circulador es muy sencillo. Para un circulador de tres puertos, por ejemplo, la luz introducida por el puerto 1 se transmite por el puerto 2, pero, sin embargo, la luz reflejada por el puerto dos no es transmitida al puerto 1. Lo mismo ocurre con la señal de entrada por el puerto 2 del circulador, será emitida por el puerto 3, pero la señal introducida por el puerto 3 no podrá ser transmitida por el puerto 2. Análogamente con los puertos 3 y 1.

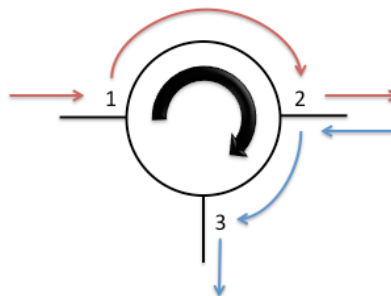


Figura 1.13 - Esquema de funcionamiento de un circulador de tres puertos con entrada en el puerto 1

Debido a su gran aislamiento entre la entrada y la potencia reflejada y las bajas pérdidas de inserción que presenta, pueden ser utilizados para lograr una transmisión bidireccional sobre una única fibra.

La fórmula que describe el aislamiento o las pérdidas de acoplo es,

$$\text{Aislamiento} = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

para las pérdidas de inserción se tiene,

$$IL = 10 \log \frac{P_1}{P_2}$$

Estas fórmulas se refieren a la conexión entre puertos 1 y 2, de forma análoga para los puertos 2 y 3.

El funcionamiento de los circuladores está basado en el Rotador de Faraday. De este modo las señales que viajan en un sentido atraviesan el sistema, mientras que las señales que viajan en sentido contrario no pueden atravesar los cristales polarizados debido a que el Rotador de Faraday ha cambiado su polarización de manera conveniente.

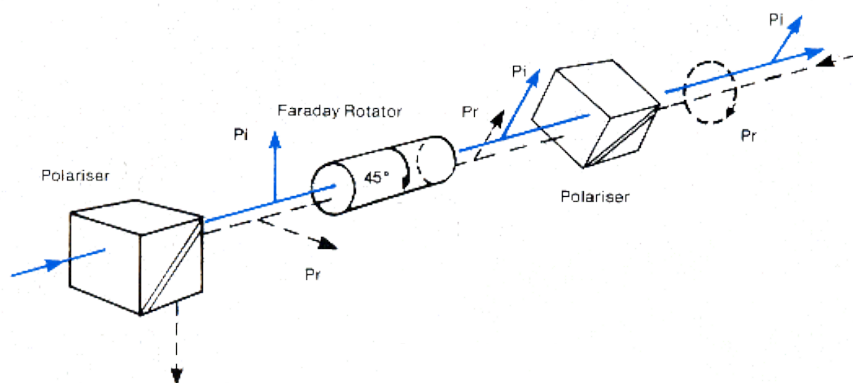


Figura 1.14 - Esquema del Rotador de Faraday

Por lo tanto, las ventajas que presentan los circuladores son principalmente tres:

- Disminución de las pérdidas en la operación inserción/extracción,
- Independencia casi total de la polarización,
- Puede utilizarse como aislador al permitir que la luz circule en un único sentido.

En cuanto a las desventajas que pueden encontrarse al utilizar un circulador, estas radican en la potencia derivada del puerto 1 al puerto 3. En aplicaciones de pequeña

señal esto puede ser un problema. También afecta si se realiza la detección en el puerto 3, ya que supone una señal parásita que se suma a la información.

1.9 Controlador de polarización

Un controlador de polarización es un dispositivo óptico que permite modificar el estado de polarización de la luz. En la Figura 1.15 se muestra el esquema correspondiente a un controlador de polarización. Este está compuesto por tres placas, en las cuales la fibra óptica se enrolla de forma circular para cada una de las placas. De izquierda a derecha el número de vueltas para cada una de ellas será: 2-3-2.

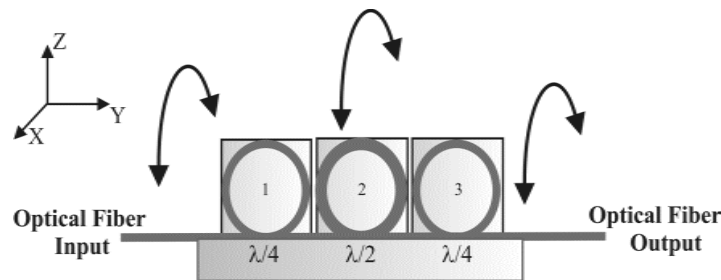


Figura 1.15 - Controlador de polarización

Para una longitud de onda concreta y un diámetro apropiado para las placas, se introducen cambios de fase en el campo óptico incidente debido a la tensión aplicada a la fibra óptica, y por consecuencia, se induce cierta birrefringencia. El grado de birrefringencia queda definido por:

$$\Delta n = \alpha \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

donde α es un parámetro relacionado con el material de la fibra, r es el diámetro del revestimiento de la fibra y R es el diámetro de la placa. Este último queda definido como:

$$R = \frac{8\pi\alpha r^2}{\lambda}$$

Cuando un campo óptico se propaga por el controlador, éste va a sufrir un cambio de fase a la salida de la primera placa de 90° , consecuentemente, la última placa tiene el mismo comportamiento. La segunda actúa como un retardador de $\lambda/2$, debido a que la fase del campo óptico a la salida de la placa ha cambiado 180° . Este cambio de fase puede ser expresado como:

$$\Delta\phi = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \cdot \Delta n \cdot 2\pi \cdot R$$

Teniendo en cuenta este efecto y asumiendo que el campo óptico incidente tiene una estado de polarización elíptico, la primera placa retarda $\lambda/4$ cambiando el estado de polarización a un estado lineal. La segunda placa produce un retardo de $\lambda/2$ rotando el estado de polarización hacia una dirección específica. Finalmente, la tercera placa introduce un retardo de $\lambda/4$ cambiando del estado de polarización lineal al deseado.

Capítulo 2 Implementación del software

2.1 Introducción

Para la realización de este proyecto se ha desarrollado un software para el dispositivo comercial de interrogación de redes de sensores FBG (fiber Bragg grating) SM125 de Micron Optics. Este tipo de interrogadores de FBGs son unos espectrómetros que, mediante una fuente sintonizable y tantos detectores como canales dispongan, estudian la luz reflejada en una fibra óptica. Estos equipos se suministran con un software diseñado para el procesado de las reflexiones producidas por las redes de Bragg y su seguimiento para, posteriormente, traducirlas en deformación, temperatura, vibración... Si se conecta otro tipo de estructura óptica a este interrogador como por ejemplo un interferómetro tipo *Sagnac* el cual refleja la interferencia producida, el interrogador puede utilizarse como un espectrómetro óptico con la ventaja de que incluye la fuente. También, interconectando los puertos, se pueden estudiar diferentes estructuras en transmisión. Por lo tanto, el software que aquí se presenta, permitirá el estudio de estructuras diferentes a los FBGs.

Entre los diferentes lenguajes de programación disponibles se ha elegido MATLAB. Se trata de una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio de alto nivel (lenguaje M). Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, representación de datos y funciones, implementación de algoritmos, comunicación con programas en otros lenguajes como pueden ser C/C++ o Java™, y con otros dispositivos hardware. Pudiendo ampliar sus capacidades incorporando los *toolbox* disponibles. El paquete MATLAB también dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones: Simulink, plataforma de simulación multi-dominio y GUIDE un editor de interfaces de usuario, que serán los que se utilicen en este proyecto. Análogamente, se puede utilizar en una gran variedad de aplicaciones, tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional. Por ello es un

software muy utilizado tanto en universidades como en centros de investigación y desarrollo.

En cuanto al interrogador, está formado por una fuente de luz conectada simultáneamente a cuatro canales diferentes conectados a un fotodetector respectivamente. Cada uno de los canales estudia las reflexiones producidas por los componentes conectados a ellos.

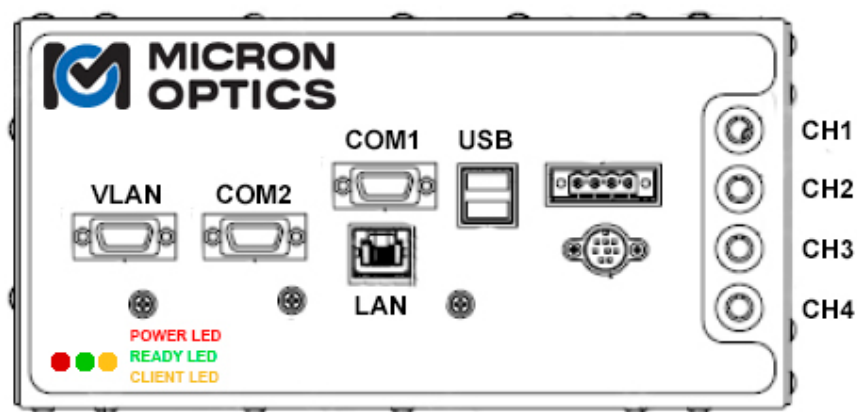


Figura 2.1 – Panel frontal del interrogador SM125

La fuente de luz que incorpora es un láser sintonizable estrecho, que barre un rango de 80nm en longitud de onda (1510-1590nm), posee una frecuencia de escaneo de 1Hz y una resolución en longitud de onda de 1pm.

Debido a estas características y a que es un dispositivo enfocado a redes de sensores FBG (que normalmente poseen un rango de operación del orden de los nanómetros) el número máximo de sensores FBG que podemos monitorizar por cada canal es de cuarenta.

El funcionamiento para una red de sensores FBG es el siguiente: el láser realiza un barrido en todo el rango de longitudes de onda y simultáneamente el fotodetector mide las reflexiones provocadas por los sensores FBG. Debido a que este tipo de sensores poseen una estructura selectiva en longitud de onda, el foto-detector, que está en sincronía con la fuente, recibe la respuesta correspondiente, obteniendo un pico en

reflexión cuando la longitud de onda del láser se iguala a la longitud de onda Bragg de cada uno de los FBGs. Al someterlos a estiramiento o cambio de temperatura, como se ha explicado en el Capítulo 1, cambiará la estructura de forma que la longitud de onda Bragg reflejada aumentará o disminuirá (Figura 2.2).

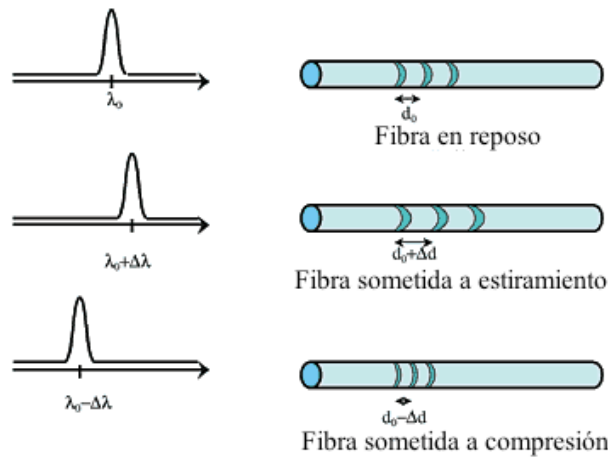


Figura 2.2 - Comportamiento de un FBG usado como sensor de deformación

Además de interrogar redes de sensores FBGs, se pretende que sea capaz de caracterizar diferentes estructuras de fibra óptica como interrogar otro tipo sensores de modulación de longitud de onda como son los interferométricos (Figura 2.3). Con la dificultad que supone seguir el desplazamiento de uno de los picos en el espectro y su consecuente dificultad de multiplexación. Como se verá en siguientes capítulos con el software diseñado (véase apartado 2.2) se aumentarán considerablemente las capacidades de este dispositivo.

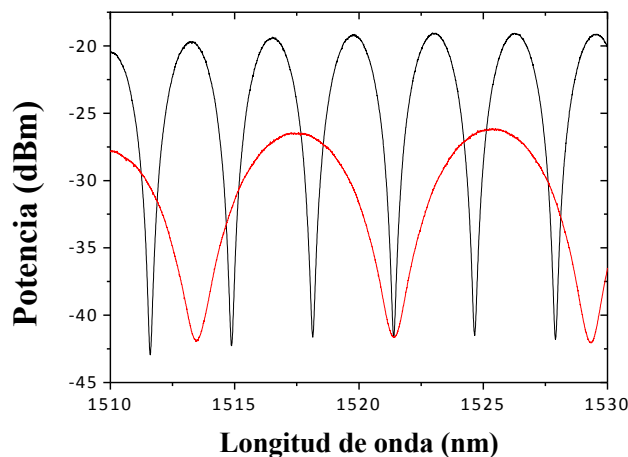


Figura 2.3 - Espectro de dos interferencias en estructura Sagnac

Adicionalmente se ha desarrollado otro software para poder controlar dos micro-posicionadores. Para ello se va a utilizar el controlador de movimiento DCX-PCI100, se trata de una tarjeta PCI-bus formada por 8 ejes a los que conectaremos de uno a ocho servo módulos DCX-MC110, donde cada uno de ellos que permitirá controlar un micro-posicionador.

Estos micro-posicionadores nos van a permitir realizar desplazamientos de aproximadamente 17 nm.

El objetivo principal es poder utilizar el interrogador de sensores simultáneamente con los micro-posicionadores para poder caracterizar sensores de, por ejemplo, deformación, curvatura, desplazamiento... de manera sencilla, precisa y automática. Pudiendo capturar los datos a tiempo real al mismo tiempo que son mostrados por pantalla.

2.2 Software del interrogador

Antes de implementar el software es importante conocer tanto las propiedades de la conexión como la estructura de la cadena de datos [15].

La comunicación con el interrogador se realizará mediante una conexión TCP/IP, a través del puerto 50000, la dirección IP y la máscara de subred por defecto son 10.0.0.122 y 255.255.255.0 respectivamente, por lo que configuraremos el ordenador con el que controlaremos remotamente el interrogador para que pertenezca a la misma red que el interrogador. Por otro lado, la estructura de los datos viene representada por una cadena binaria de 128108 bytes (Anexo A), que se divide de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} & \text{Cabecera principal}[20 \text{ bytes}] + \text{Num. canales}[4] * \text{Subcabecera} [20 \text{ bytes}] \\ & + \text{Num. canales}[4] * 2[\text{bytes}] * \text{Num. puntos}[16001] \end{aligned}$$

Esta cadena de datos comienza con una *cabecera principal*, que nos proporciona información sobre la versión del protocolo utilizado, el número de canales y contiene un contador secuencial para los datos. Tiene una longitud total de 20 bytes que se dividen en 5 campos de 4 bytes cada uno, representados por enteros sin signo de 32 bits. Los siguientes 20 bytes corresponden a la *subcabecera*, una para cada canal, representada

por cinco campos de 4 bytes y, al igual que en la cabecera principal, corresponden a la clase entero sin signo 32. Cada campo contiene la información sobre el tamaño de dicha subcabecera, la longitud de onda inicial, el salto entre longitudes de onda consecutivas, el número de datos y el número del canal al que pertenecen dichos datos. Dos de los cinco bloques representan la información sobre la longitud de onda, en concreto, la longitud de onda mínima y el incremento de dicha longitud por cada muestra, estos datos antes de ser transmitidos son multiplicados por un factor 10000 y por lo tanto una vez recibidos se dividen por 10000 para convertirlos al formato de longitud de onda en nanómetros.

Tras cada una de las subcabeceras se encuentran los datos de cada uno de los canales. Cada dato está representado por la clase entero sin signo 16 bits y los valores que contienen antes de ser transmitidos están multiplicados por un factor 100. Por tanto para reconvertirlos a números con dos decimales de precisión se debe dividir cada entero de 16 bits entre 100.

Para el procesado de los datos hay que tener en cuenta que la cadena está formada por diferentes clases numéricas (enteros sin signo de 16 bits y 32 bits), y que el formato de cada uno de los campos contiene en primer lugar el bit menos significativo (*LSB first*) y por lo tanto será necesario invertir el orden de los bits.

Una vez conocidas las propiedades de la conexión y la estructura de los datos obtenidos procedemos a la implementación del software en MATLAB. Para explicar el funcionamiento del programa, éste va a dividirse en dos bloques: uno constituido por las que se consideran las funciones principales que se utilizarán posteriormente y un segundo bloque en el que se presenta un interfaz gráfico.

2.2.1 Funciones principales

En este apartado se va a explicar el funcionamiento del núcleo del programa representando por los siguientes bloques: Conexión, obtención de datos, procesado y cierre de conexión. Como se muestra en la Figura 2.4.

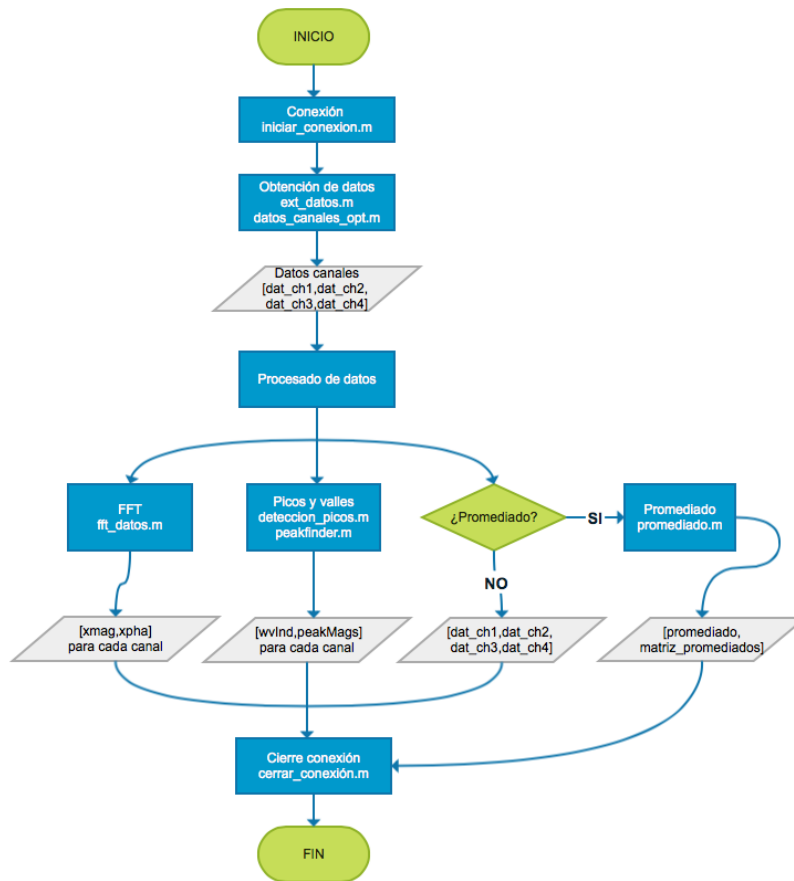


Figura 2.4 - Diagrama de flujo estructura de las funciones principales del software del interrogador

A continuación se explican cada uno de los bloques de manera detallada.

2.2.1.1 Conexión

Como se muestra en la Figura 2.4, la primera tarea a realizar es establecer conexión con el dispositivo, para ello se creará una conexión TCP/IP utilizando el interfaz LAN (Figura 2.1) del interrogador y el puerto Ethernet del ordenador.

En primer lugar se debe configurar la red. Como se ha comentado anteriormente, el interrogador tiene por defecto unos valores determinados de IP y máscara de subred. Estos se pueden cambiar mediante los comandos #SET_IP_ADDRESS y #SET_IP_NETMASK, aunque en este caso se utilizarán las predefinidas del propio

interrogador: 10.1.0.122 para la IP y 255.255.255.0 en el caso de la máscara de subred. Por último sólo falta configurar la dirección IP y la máscara de subred del puerto Ethernet del ordenador. En este caso, se utiliza como dirección IP 10.1.0.50 y máscara de subred 255.255.255.0. Está es una de las múltiples posibilidades ya que el único requisito es que la dirección IP quede dentro del rango que limita la red definida por el interrogador.

Una vez configurada la red, se establece la conexión con el interrogador mediante Matlab. Para ello se utilizará la función *iniciar_conexion.m*. Mediante comando *tcp-ip* se configuran las propiedades de la conexión. Tiene como variable de salida la propia conexión y como variables de entrada, la IP y el puerto de la conexión (en este caso el 50000, definido por el propio interrogador).

Finalmente sólo queda abrir la conexión utilizando el comando *fopen*.

```
function iniciar_conexion(ip)
    global C
    C = tcpip(ip,50000,'NetworkRole','client','InputBufferSize',128118);
    fopen(C);
end
```

Hay que tener en cuenta que Matlab tiene establecido por defecto para este tipo de conexión un buffer de datos de 512 bytes, y la cadena de datos que se recibe tiene una longitud de 128108 bytes, a los que hay que añadir 10 bytes extra de información. Por lo tanto, para recibir los datos de manera correcta es necesario incrementar el tamaño de dicho buffer hasta 128118 bytes.

2.2.1.2 Obtención de datos

Una vez queda establecida la conexión, se pasa a obtener e interpretar los datos de los diferentes canales del interrogador. Para ello, se utiliza la función *ext_datos.m* que, mediante el comando *fprintf*, envía la orden #GET_DATA que, a su vez, se encarga de solicitar los datos. Para leer la respuesta enviada por el interrogador se emplea el comando *fread*, introduciendo como variables la propia conexión TCP/IP(C) y el número de bytes que queremos leer, que en este caso es 128118.

```
function [dat_ch1 dat_ch2 dat_ch3 dat_ch4] = ext_datos(C)
bytesToRead = 128118;
fprintf(C, '#GET_DATA'); %Pedimos los datos. C = conexión TCP/IP.
dat = fread(C,bytesToRead);
realdat = dat(11:end,:); %Descartamos los 10 primeros bytes.
[dat_ch1,dat_ch2,dat_ch3,dat_ch4] = datos_canales_opt(realdat);
end
```

De la respuesta obtenida, los 10 primeros bytes corresponden a información sobre el dispositivo y por lo tanto no se utilizan. Los otros bytes restantes, como se ha comentado anteriormente, se dividen en:

Cabecera principal + Num. canales * Subcabecera + Num. canales * 2 * Num. puntos

Al igual que los bytes de información sobre el dispositivo, la cabecera principal no aporta información sobre el sensor y por lo tanto también se descartan.

La subcabecera proporciona información sobre la longitud de onda inicial, el incremento de longitud de onda en cada paso y el número de datos. Estos valores son idénticos para todos los canales. Por ejemplo, se obtienen los siguientes resultados 1510nm, 5pm y 16001 después de analizar una de las tramas recibidas. Esto significa que los datos recibidos hacen referencia a longitudes de onda desde 1510 hasta 1510nm+(5pm*16000)=1590nm. Con el fin de disminuir el tiempo de procesado, estos valores se guardan directamente en variables de Matlab sin tener que acceder a su valor cada vez.

La información que transporta cada uno de los canales se extrae mediante la función *datos_canales_opt.m*, que tiene como variable de entrada *realdat* (obtenida anteriormente) y como salidas *dat_ch1*, *dat_ch2*, *dat_ch3*, *dat_ch4*, las cuales contienen la información de cada canal por separado.

Para cada canal, la información viene representada por una cadena de 32002 bytes de longitud que, dentro de la cadena principal de datos, se distribuyen de la siguiente forma:

- CH1: bytes 41 hasta el 32042
- CH2: bytes 32063 hasta el 64064

- CH3: bytes 64085 hasta el 96086
- CH4: bytes 96107 hasta el 128108.

Estos datos se guardan en el vector **data_channels**, cuyas dimensiones son 32002x4, donde cada columna representa a uno de los canales. De esta forma se consigue separar el procesamiento de datos para cada canal. Una vez se han obtenido los datos de los canales, se debe crear una estructura para guardar los datos de salida.

```
function [dat_ch1,dat_ch2,dat_ch3,dat_ch4]= datos_canales_opt(realdat)

%% Número de puntos de datos
ndatapoints = 16001;

%% Cadena de datos de los canales. Separamos el procesamiento para cada canal

data_channels = [realdat(41:32042,:)' ; realdat(32063:64064,:)'
;realdat(64085:96086,:)' ;realdat(96107:end,:)' ]';

% Estructura para guardar los datos de salida
real_dat_ch=zeros(size(data_channels,1),ndatapoints);

for j=1:size(data_channels,1)
    data = data_channels(j,:);
    data_bin = dec2bin(data);
    % Vectorizamos el bucle
    i=1:2:2*ndatapoints;
    data_ch = [data_bin(i+1,:) data_bin(i,:)];
    % Conversión de los datos de binario a int16
    real_dat_ch(j,:)=((data_ch-49)*(2.^(size(data_ch,2)-1:-1:0))'-1)/100;
end
dat_ch1 = real_dat_ch(1,:);
dat_ch2 = real_dat_ch(2,:);
dat_ch3 = real_dat_ch(3,:);
dat_ch4 = real_dat_ch(4,:);
end
```

Esta función generó numerosos problemas a la hora de programarla debido a que el formato de los datos recibidos no era el mismo que el del resto de la trama. Además, los bytes vienen representados de manera inversa a la habitual, *LSB first* en lugar de *MSB first*. Es decir, que el byte menos significativo es el primero. Tras varias pruebas, la solución ideada consistió en convertir la cadena de datos de cada canal a binario e invertir el orden de los bytes. Por último, sólo hay que cambiar el formato de los datos a *int16* y dividirlos entre 100, valor por el que son multiplicados antes de ser enviados por el interrogador. Para realizar esta tarea se probó a utilizar varios comandos diferentes, pero las conversiones que se obtenían no eran correctas o, cuando se conseguía que la

conversión funcionase, el tiempo de procesado era mayor que el tiempo de refresco, lo cual era invariable.

Una vez solucionado el problema con el tiempo de procesado, se termina de implementar la función de la siguiente forma:

Se realiza un bucle con cuatro iteraciones, una por canal. En primer lugar, se seleccionan los datos del canal donde el número de iteración indica el número del canal y se convierte en una cadena binaria de datos, obteniéndose como resultado una variable tipo “carácter” (char) de dimensiones 32002x8. Cada fila de este *array*, por lo tanto, corresponde a un byte de los dos que representan a cada dato en longitud de onda. Ya que el byte menos significativo es el primero en recibirse, se debe invertir el orden de forma que se obtiene:



Figura 2.5 Estructura del array básico de datos

Donde *i* es un *array* que posee los números impares del rango 1:32002. Agrupando esta pareja de bytes para cada dato se obtiene finalmente un *array* de 16001x16 de manera que en cada fila ya se tienen los 2 bytes de cada dato en el orden correcto. Para finalizar, solo queda convertir esos datos a la forma entero con signo 16bits con precisión de dos decimales y almacenarlos en las variables de salida *dat_ch[i]*.

2.2.1.3 Procesado de datos

Después de obtener los datos en el formato correcto, siguiendo la estructura presentada en el diagrama de flujo, se continúa con el procesado de dichos datos en la línea de los objetivos anteriormente presentados. Para ello se han implementado varios bloques que van a consistir en el cálculo de la transformada rápida de Fourier (FFT), promediado y detección de picos y valles.

Debe tenerse en cuenta que tanto la FFT como la detección de picos/valles se realizan cada vez que se solicitan los datos, mientras que el promediado se lleva a cabo únicamente si el usuario lo demanda.

i. *FFT*

La función *fft_datos.m*, permite realizar la FFT del espectro proveniente de cada uno de los canales. Tiene como variable de entrada los datos de cada canal y como variables de salida la magnitud y la fase, esta última normalizada entre $\pm\pi$.

```
function [xmag,xpha] = fft_datos(datos)
    xfft = fft(datos); % FFT de los datos
    sxfft = fftshift(xfft); % Centramos la FFT en 0.
    xmag = abs(sxfft); % Magnitud de la FFT.
    xpha = angle(sxfft)/pi; %Fase de la FFT normalizada entre -1 y 1.
end
```

Para una representación más intuitiva de la magnitud y fase de la FFT, se va a representar de forma simétrica centrada en 0. Para ello, después de realizar la FFT, se utilizará el comando *fftshift*, función ya implementada en MATLAB que realiza esta labor.

ii. Promediado

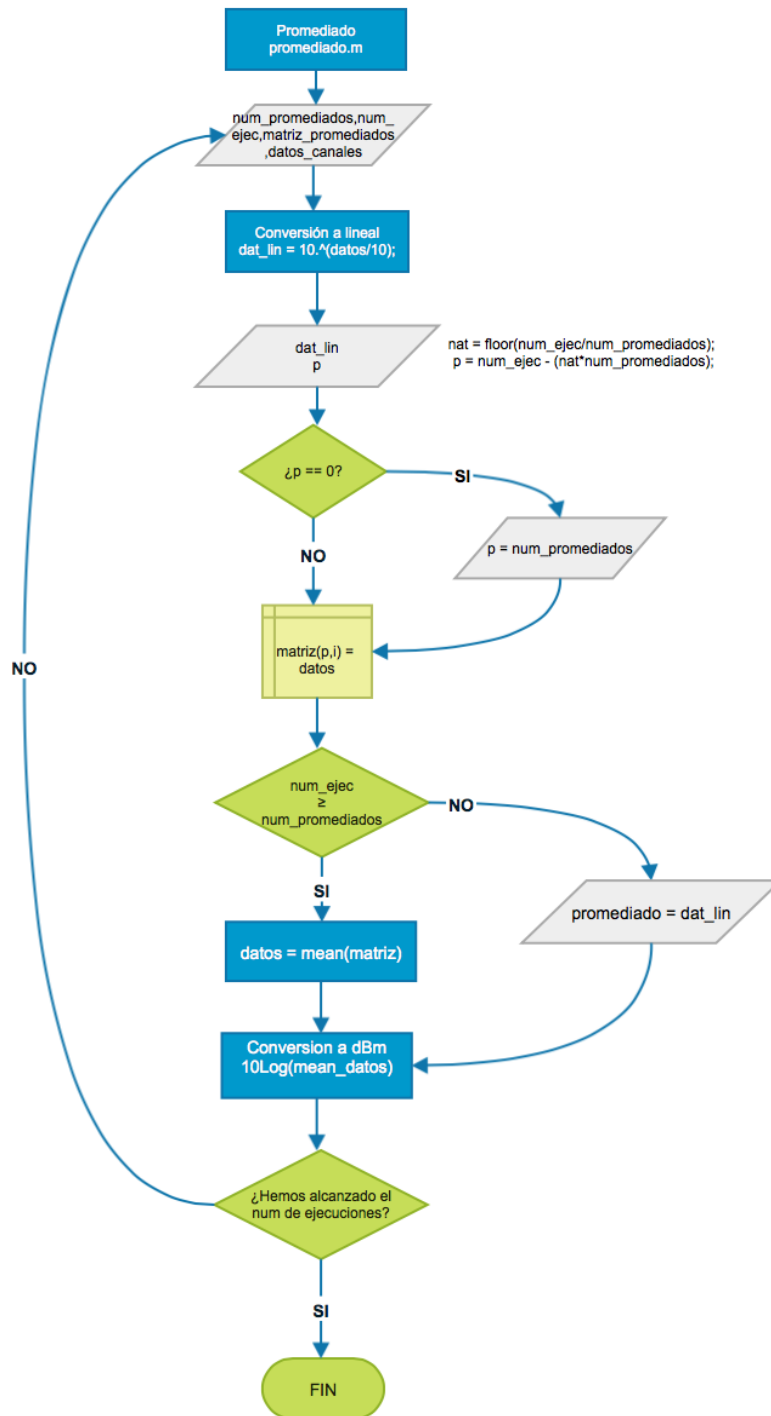


Figura 2.6 - Diagrama de flujo de la función promediados.m

El promediado se utilizará como método para reducir el posible ruido, incrementando así la relación señal-ruido (SNR) de la señal óptica. Para ello, se crea la función

promediados.m (Figura 2.6). Esta función tiene como datos de entrada el número de trazas a promediar, los datos previamente procesados y una matriz auxiliar para contener las trazas a promediar que va a tener como dimensiones *número de promedios* x *número de puntos de los datos*, como se muestra en la Figura 2.7

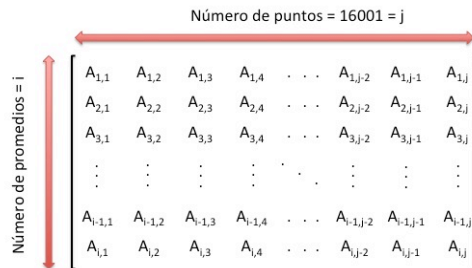


Figura 2.7 - Esquema matriz auxiliar de promediados

Los datos de cada canal vienen representados en potencia (dBm) y, por lo tanto, lo primero que se debe hacer es pasar estos datos a unidades lineales para poder calcular la media de forma correcta.

La función promedio va a actuar de la forma siguiente:

1. En cada ciclo de ejecución en la que se obtiene una traza del interrogador, se rellena una fila de la matriz de promediados.
2. Una vez que el número de ejecuciones es igual al número de promedios (todas las filas de la matriz están ocupadas), se computa el primer promediado.
3. En la siguiente ejecución, se mantienen fijos los datos de todas las filas excepto los de la primera, que serán reemplazados por los de la ejecución actual y se vuelve a realizar la media.
4. En la siguiente ejecución, se reemplaza la segunda de las filas, se hace el promedio con el resto de filas y así sucesivamente hasta alcanzar el número de ejecuciones establecido.

En la Figura 2.8 se muestra un ejemplo que pretende aclarar el funcionamiento y evolución de la matriz de promediados en función del número de ejecuciones realizadas.

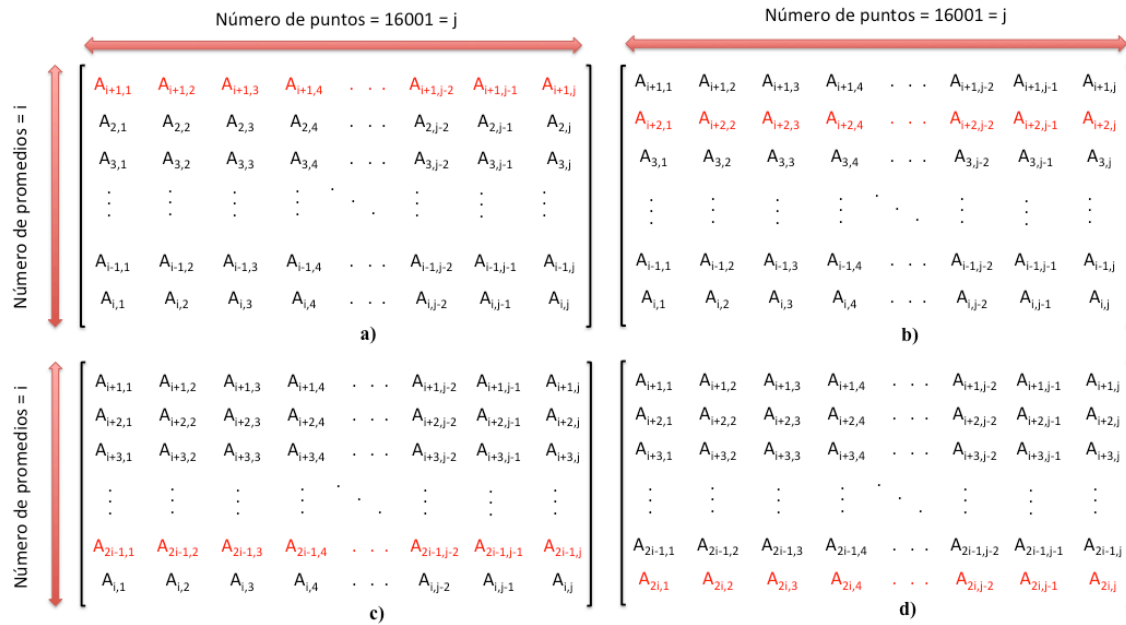


Figura 2.8 - Evolución de la matriz de promediados en función del número de ejecuciones. (a) Número de ejecuciones = Número de promediados + 1 (b) Número de ejecuciones = Número de promediados + 2 (c) Número de ejecuciones = 2*Número de promediados - 1 (d) Número de ejecuciones = 2*Número de promediados

Una vez se ha obtenido la media, únicamente se deben convertir esos datos a dBm mediante el cálculo $10\text{Log}_{10}P_L$.

```
function [promediado,matriz_promediados] =
promediados(num_promediados,num_ejec,matriz_promediados,datos)
    dat_lin = 10.^(datos/10);
    nat = floor(num_ejec/num_promediados);
    p = num_ejec - (nat*num_promediados);
    if p == 0
        p = num_promediados;
    end;
    matriz_promediados(p,:) = dat_lin;
    if num_ejec >= num_promediados
        promediado = 10.*log10(mean(matriz_promediados));
    else
        promediado = datos;
    end;
end
```

iii. Picos y valles

Para detectar los puntos máximos (picos) o mínimos (valles) de manera independiente para cada canal, se utiliza la función *peakfinder.m* ya implementada y disponible en la página web oficial de Matlab¹ cuyo código puede consultarse en el Anexo B. Esta función tiene como variables de entrada los datos, la precisión, el umbral (*threshold*) y el tipo, es decir, si se quiere buscar mínimos o máximos. Como datos de salida se obtienen el índice (posición) en el que se encuentra el pico o valle y el valor del máximo o mínimo en ese punto.

Para adecuar el código original a nuestro programa se ha creado la función *detección_picos.m*, en la cual se asigna el valor de la precisión de detección. Una vez obtenido el índice donde se encuentran el/los máximo/s o mínimo/s, se obtiene la longitud de onda correspondiente.

```
function [wvInds,peakMags]=deteccion_picos(data,tipo,thresh)
    precision = (max(data)-min(data))/2;
    [peakInds,peakMags]= peakfinder(data,precision, thresh, tipo);
    wvInds = zeros(1,length(peakInds));
    for i=1:length(peakInds)
        wvInds(1,i) = 1510 + 0.005*peakInds(i);
    end;
end
```

2.2.1.4 Cierre de conexión

Por último, para realizar el cierre de conexión con el interrogador, se ha creado la función *cerrar_conexion.m*, que tiene como variable de entrada la conexión *tcp-ip* establecida anteriormente.

```
function cerrar_conexion(C)
    fclose(C);
    delete(C);
    clear C;
end
```

¹ <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25500-peakfinder>

Para ello se utiliza el comando *fclose*, que es el encargado de realizar de manera correcta y efectiva el cierre de la conexión. Mientras que la orden *delete* borra la variable *C* y *clear* se encarga de eliminarla del espacio de trabajo liberando la memoria.

2.2.2 Interfaz gráfica

Para una interacción mas amigable con el programa, se ha creado una interfaz gráfica (Figura 2.9) mediante el entorno GUIDE de MATLAB que nos permite visualizar, de forma más intuitiva y en tiempo real, tanto el espectro en longitud de onda como la FFT de cada una de las estructuras ópticas, sensores o redes de sensores que se encuentren conectados a los diferentes canales.

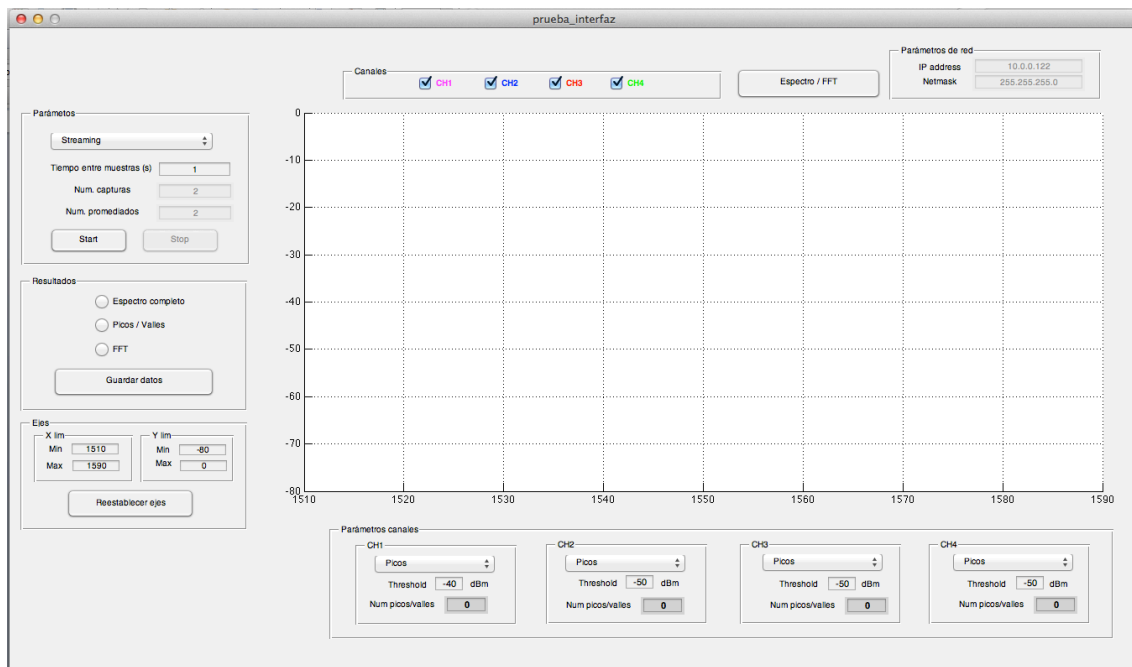


Figura 2.9 - Interfaz gráfica interrogador

2.2.2.1 Opciones

En función de las necesidades del usuario, se distinguen diferentes opciones. El panel de selección se encuentra en la parte superior izquierda de la interfaz. De acuerdo con la

opción seleccionada, se deben introducir los valores de unos u otros parámetros, como se muestra en la Figura 2.10.

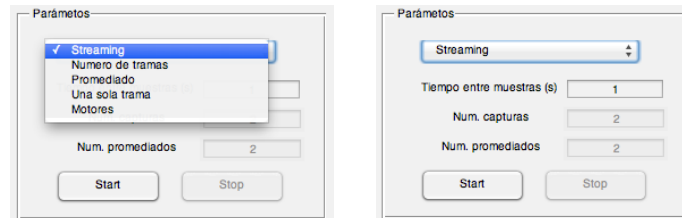


Figura 2.10 - Opciones y parámetros de entrada

A continuación se explica de manera detallada, el funcionamiento de cada una de ellas.

i. Una sola trama

El caso de una sola trama es el caso más simple ya que no se debe introducir ningún parámetro de entrada. Una vez que se ha pulsado el botón “Start”, se inicia la conexión y se obtienen los datos. En este caso, la conexión con el interrogador se cerrará automáticamente una vez hayamos recibido la trama de datos.

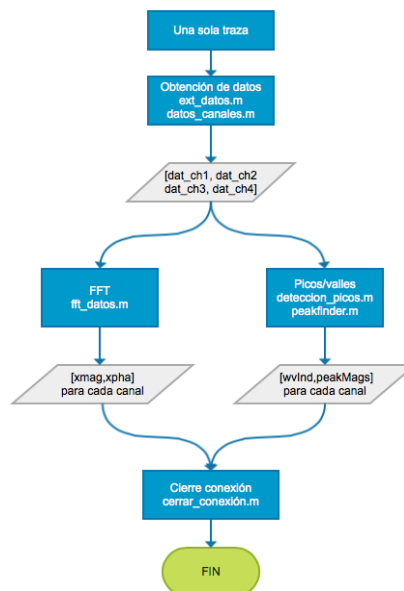


Figura 2.11 - Diagrama de flujo de la opción “Una sola trama”

ii. Streaming

Este mecanismo va a permitir la captura de datos ininterrumpidamente. Estos datos se obtendrán con una frecuencia definida por el usuario. Teniendo en cuenta que la frecuencia de escaneo del interrogador es 1 Hz, el tiempo mínimo entre capturas será de un segundo. En el caso de que se introduzca un valor menor aparecerá un aviso de error. Para implementar el bucle temporal se define un *timer* de manera que este ejecute el bloque “Obtener datos”, a la frecuencia determinada por el usuario.

```
handles.t_plot  
timer('TimerFcn',@(obj,event)captura_ploteo(hObject),'Period',  
handles.t_interval,'ExecutionMode','FixedRate');
```

Una vez que están definidos los parámetros necesarios, al pulsar sobre el botón “Start” se realiza la conexión con el interrogador y el temporizador se inicia llamando a las funciones “obtención de datos” y “procesado” a excepción del promediado, como muestra la Figura 2.12

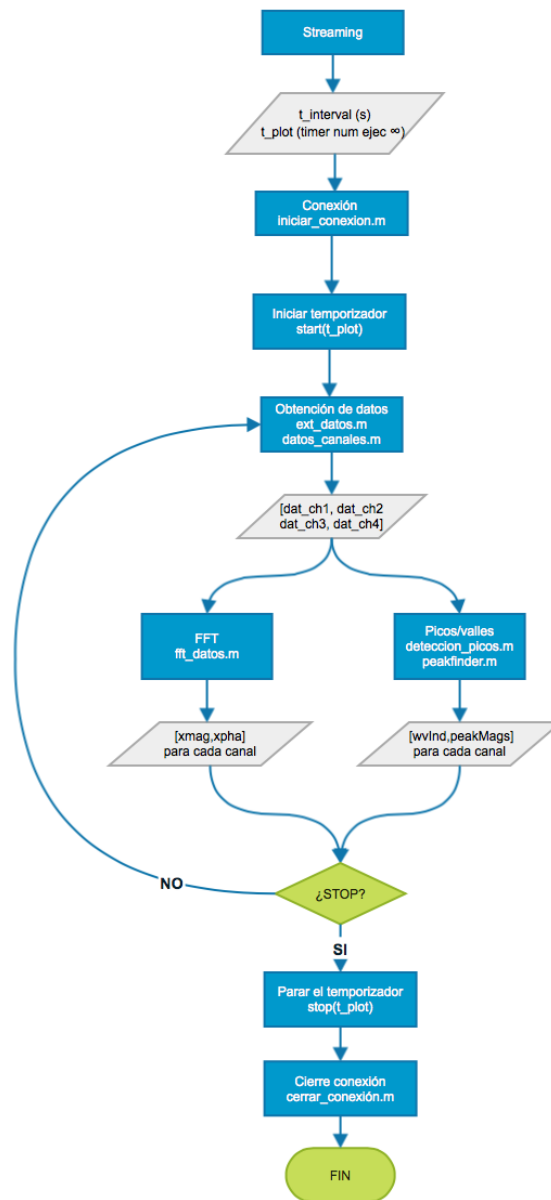


Figura 2.12 - Diagrama de flujo de la función "Streaming"

Por su definición el temporizador puede realizar el bucle indefinidamente, por lo tanto, para salir del mismo se ha añadido un botón de "Stop". Una vez pulsado, se detiene y reinicia el temporizador. Simultáneamente se cerrará la conexión TCP/IP.

iii. Promediado

Como se ha comentado anteriormente, la función promediado se utiliza para reducir el ruido. Tiene dos parámetros de entrada: en este caso, el tiempo y el número de promediados a realizar.

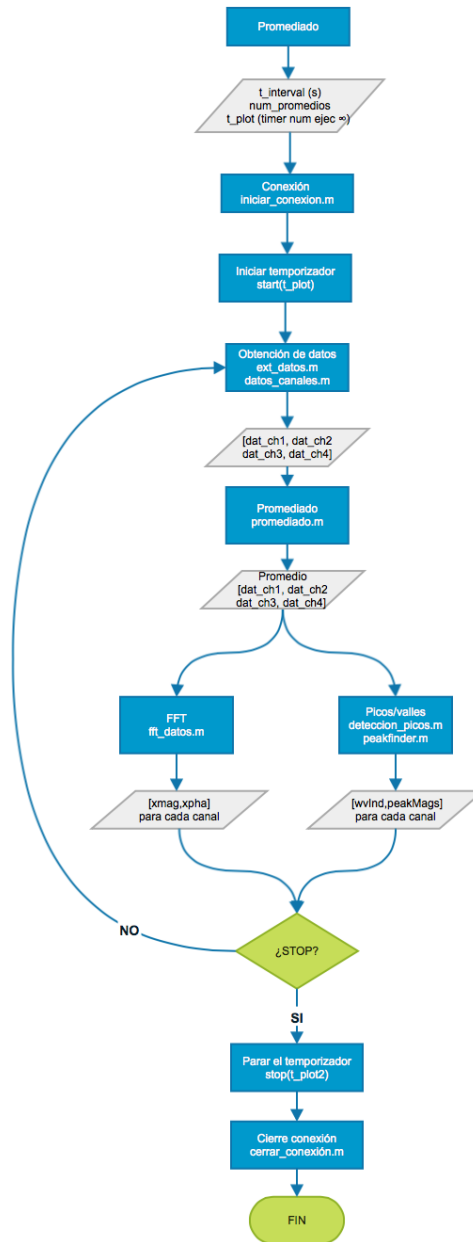


Figura 2.13 - Diagrama de flujo de la opción "Promediado"

Como muestra la Figura 2.13, el funcionamiento es similar al del caso anterior con un temporizador que se actualiza y solicita datos al interrogador. La mayor diferencia se encuentra en que una vez obtenidos los datos, se llama a la función promedio (2.2.1.3ii),

de forma que hasta que no se igualen el número de ejecuciones con el valor del número de promediados, no vamos a obtener la media de los datos. Para detener la ejecución se deberá pulsar botón de “Stop”. Una vez pulsado, se procederá a parar y reiniciar el temporizador (dejando de enviar órdenes al interrogador). A su vez cerraremos la conexión TCP/IP.

iv. *Número determinado de tramas*

En esta opción, los datos de entrada que se introducen son el periodo de refresco del temporizador y el número de tramas que se quiere obtener.

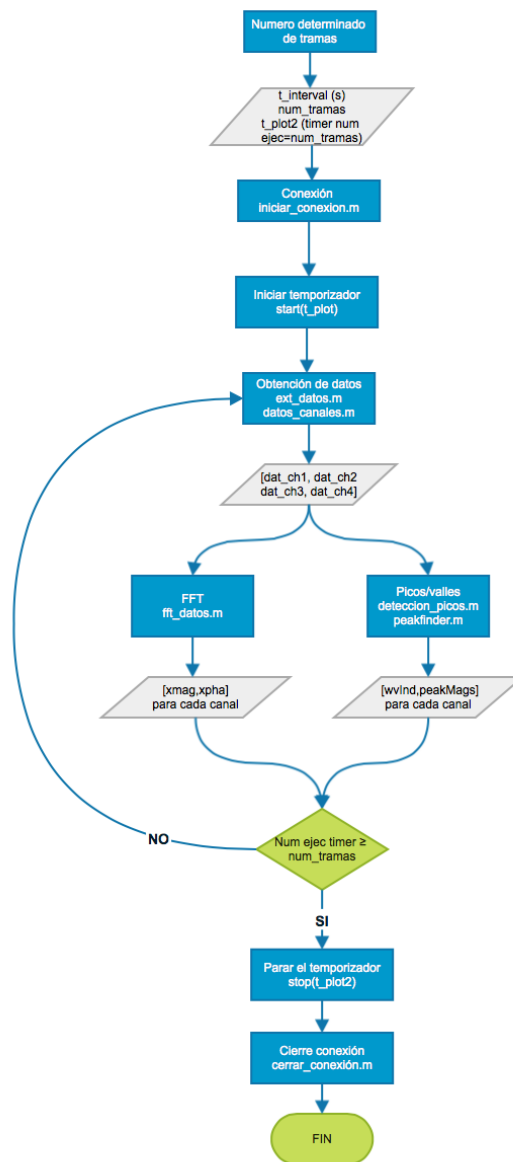


Figura 2.14 - Diagrama de flujo de la opción "Número determinado de tramas"

Para implementar esta función se crea un nuevo temporizador, que va a realizar un número de ejecuciones igual al número de tramas que el usuario desee hacer. El funcionamiento se muestra en la Figura 1.14 y sigue el mismo procedimiento de los casos anteriores. De esta manera al pulsar el botón “Start” se inicia la conexión con el interrogador, simultáneamente el temporizador se activa, y comienza a solicitar datos cada periodo de tiempo determinado por el usuario hasta que se haya alcanzado el número de tramas deseadas. Una vez se ha ejecutado por completo el programa, sin necesidad de pulsar ningún botón, este se detiene y reinicia el temporizador. Posteriormente se cierra la conexión con el interrogador. Conviene destacar que esta funcionalidad resulta de especial utilidad en estudios de estabilidad temporal de redes de sensores.

v. *Motores*

Este módulo es el encargado de controlar los micro-posicionadores mientras se ejecuta en paralelo el programa de control del interrogador. Por esa razón y porque se trata de un módulo aparte, puede considerarse como un programa independiente. Este será estudiado con detalle en el apartado 2.3.

2.2.2.2 *Visualización de datos por pantalla*

Otra de las funciones implementadas en la interfaz se encarga de mostrar los datos en pantalla en tiempo real. Se ejecuta una vez se han obtenido los datos previamente solicitados al interrogador.

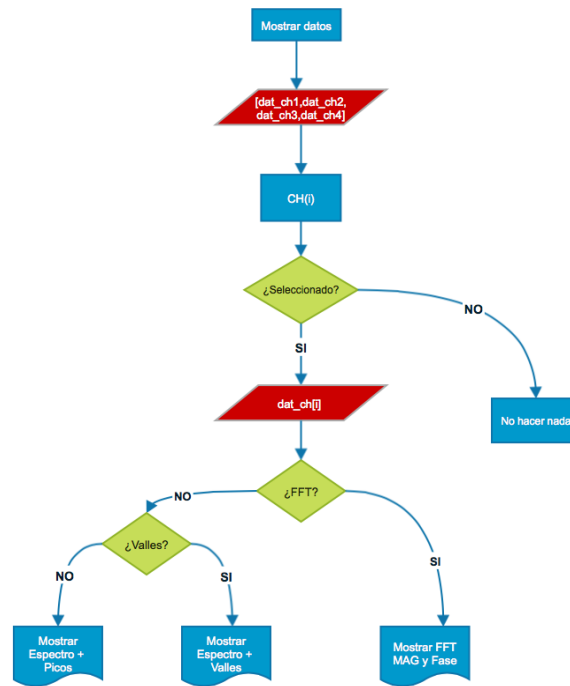


Figura 2.15 - Diagrama de flujo de la función muestra de datos por pantalla

Cada canal podrá ser seleccionado para ser mostrado por pantalla, de forma que una vez se tiene la cadena de datos de todos los canales solo se mostrarán en pantalla los datos de los canales seleccionados. Se da la opción de mostrar el espectro completo en longitud de onda o la FFT (magnitud y fase) de dichos resultados. En el caso de que se muestre el espectro, se va a mostrar simultáneamente los picos o valles de la señal. En la parte inferior se va a poder seleccionar, para cada uno de los canales de manera independiente, si se desea mostrar los picos o los valles de dicha señal, pudiendo introducirse el valor de umbral (*threshold*) que se considere oportuno, como se observa en la Figura 2.16.



Figura 2.16 Panel de selección de picos/valles

También es posible observar con más detalle determinado rango de la señal representada. Para ello se incluye en la parte inferior izquierda de la interfaz un cuadro en el que, para el caso del espectro, permite seleccionar el rango de longitudes de onda y el rango de potencias a visualizar. Lo mismo sucede si está seleccionada la FFT, pudiéndose cambiar el rango del eje de ordenadas y de abscisas. En el caso de la magnitud, comparte el eje de abscisas con la fase, pero en esta última el eje de las ordenadas tendrá un rango fijo entre $\pm\pi$ rad.

2.2.2.3 Almacenamiento de datos

Se ha incluido en la interfaz un bloque que permite guardar los resultados (Figura 2.18) de forma que el usuario pueda tratarlos posteriormente. En la parte central a la izquierda del interfaz aparece un recuadro (Figura 2.17), en el cual se pueden seleccionar tres opciones: Espectro completo, Picos y Valles y FFT. De estas opciones se puede elegir una o varias tal y como se muestra en la figura siguiente:

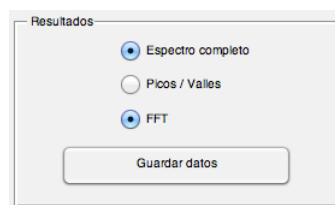


Figura 2.17 - Detalle de las opciones de almacenamiento de los resultados

Una vez pulsado el botón “Guardar datos” se crean cuatro archivos, uno para cada canal (independientemente si está o no seleccionado), por cada una de las opciones seleccionadas. Estos archivos estarán localizados en la carpeta en la que se encuentra el propio programa. Los archivos serán nombrados de la siguiente forma:

- **Espectro** → CH[i]_AAAA_MM_DD_HH_mm.txt
- **FFT** → CH[i]_FFT_AAAA_MM_DD_HH_mm.txt
- **Picos/Valles** → CH[i]_Picos_AAAA_MM_DD_HH_mm.txt

De esta manera en todos se observa el canal al que pertenecen, la fecha y la hora de creación. Para los casos en los que el número de ejecuciones no está predeterminado, será necesario volver a pulsar el botón “Guardar datos” para detener el almacenamiento de datos antes de pulsar el botón “Stop”.

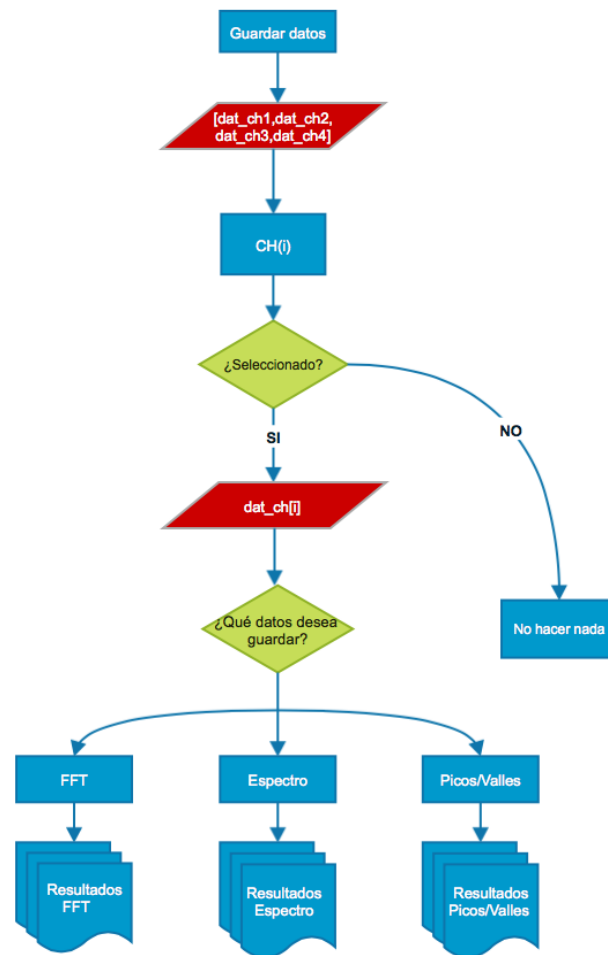


Figura 2.18 - Diagrama de flujo de la función Guardar Datos

2.3 Software para el control de los micro-posicionadores

Tras concluir el programa principal, se propuso desarrollar un software que en paralelo con en anterior permitiese el control de los micro-posicionadores, ya que resulta

interesante para observar como se comportan los sensores (o red de sensores) en tiempo real al ser sometidos a deformaciones, estiramiento o desplazamientos.

2.3.1 Funciones principales

Para poder controlar remotamente los micro-posicionadores, MCAPI (Motion Control Application Programming Interface) se implementa un potente conjunto de funciones y estructuras de datos que se utilizaran en la programación del software. Como MATLAB permite la comunicación con otros lenguajes de programación, se podrá hacer uso de dichas funciones. Para ello se deberán de cargar una serie de librerías, según las funciones que se quieran utilizar. En este caso basta con cargar *mcapi32.dll* y *mcapi.h*, donde el primer archivo corresponde a la librería y el segundo es la cabecera en C que hay que incluir para indicar a MATLAB el lenguaje con el que va a trabajar pudiendo así hacer uso las funciones.

2.3.1.1 Conexión

Antes de poder enviar ninguna orden, se deben cargar las librerías. En este caso se les va a asignar como alias “motores” para poder simplificar la orden cada vez que se hace uso de ellas.

```
function conexion_motores
global m
if libisloaded('motores')
    m = calllib('motores','MCOpen',0,2,0);
else
    loadlibrary mcapi32 mcapi.h alias motores
    m = calllib('motores','MCOpen',0,2,0);
end;
```

Una vez están cargadas las librerías se utiliza la función `MCOpen()` introduciendo los parámetros necesarios iniciaremos la conexión. Si ésta se ha producido correctamente obtendremos como respuesta, *m*, un identificador para el controlador que consistirá en número entero entre 1 y 15, ambos incluidos.

2.3.1.2 Habilitar ejes

Posteriormente, para poder enviar ordenes de movimiento a los micro-posicionadores, se deber habilitar uno o varios ejes haciendo uso de la función `MCEnableAxis()`. Ésta tiene tres parámetros de entrada: el identificador de la conexión `conexión`, `m` y, por último, deberemos introducir el *número del eje o ejes* que se quiera habilitar. Se asignarán valores del 0 al 8 en función del eje a activar donde el cero indica habilitar todos los ejes. En este caso se dispone de dos microprocesadores, por lo tanto sólo podremos activar los ejes 1 y 2. Finalmente, se introduce el valor binario “1” para habilitar dicho eje. En caso contrario, introduciendo el valor binario “0” se desactivará el eje.

```
function activa_eje(ejes)
  global m
  calllib('motores', 'MCEnableAxis', m, ejes, 1);
```

2.3.1.3 Mover motores

Tras haber cargado la configuración, iniciado la conexión y tener activo al menos uno de los ejes se puede comenzar a mandar órdenes de movimiento. Se nos permiten dos tipos de movimiento:

1. Absoluto, mediante la orden `MCMoveAbsolute()`, que con un movimiento permite alcanzar una posición absoluta para un único eje a la vez.

```
function mover_absoluto(ejes, paso)
  global m
  calllib('motores', 'MCMoveAbsolute', m, ejes, paso);
```

2. Relativo, `MCMoveRelative()`, inicia un movimiento de posición relativo para el eje actual o varios ejes a la vez.

```
function mover_relativo(ejes,paso)
    global m
    calllib('motores','MCMoveRelative',m,ejes,paso);
```

Se observa que, para ambos casos, existen tres parámetros de entrada: la conexión, el eje al que queremos mandar la orden de movimiento y el valor del número de pasos que queremos realizar.

2.3.1.4 Obtención de la posición

La función *posiciones.m* permite conocer la posición actual, la posición óptima, la posición destino y el error cometido cada vez que realizamos un movimiento en los microposicionadores. Hay que tener en cuenta que se debe esperar a que el motor se haya detenido (`MCWaitForStop()`) para obtener los valores correctos.

```
function [pTarget,pPosition,pOptimal,pError] = posiciones(ejes)
    global m
    [error,pTarget]=calllib('motores','MCGetTargetEx',m,ejes,1);
    calllib('motores','MCWaitForStop',m,ejes,0);
    [error,pPosition]=calllib('motores','MCGetPositionEx',m,ejes,1);
    [error,pOptimal]=calllib('motores','MCGetOptimalEx',m,ejes,1);
    [error,pError]=calllib('motores','MCGetFollowingError',m,ejes,1);
end
```

Para obtener la información de las posiciones, se utilizan las funciones de la librería:

- “MCGetTargetEx()”: Posición de destino.
- “MCGetPositionEx()”: Posición actual.
- “MCGetOptimalEx()”: Posición óptima.
- “MCGetFollowingError()”: Error cometido, será la diferencia entre la posición actual y la posición óptima.

Todas ellas tienen como parámetros de entrada la conexión establecida, el eje activo en ese momento y el valor inicial de un puntero que va a ir recogiendo las diferentes posiciones del eje especificado.

2.3.2 Interfaz gráfica²

Una vez vistas las funciones principales que formarán el programa, al igual que en el caso anterior, se va a realizar una interfaz gráfica para el programa de control de los micro-posicionadores.

Como ya se ha comentado anteriormente, se trata de un programa independiente, pero también puede ser ejecutado y trabajar en paralelo con la interfaz del interrogador.

Para este proyecto, como se explicará en próximos capítulos, se hará uso de los dos programas funcionando conjuntamente de forma que, mientras se someten los sensores a cierta deformación, se tendrá la posibilidad observar el espectro y la FFT por pantalla, guardar las tramas de datos del espectro en potencia, posición de picos/valles y FFT.

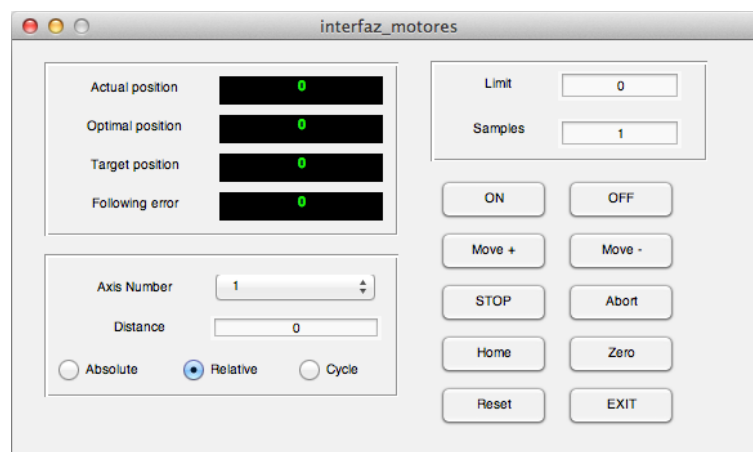


Figura 2.19 – Interfaz gráfico motores

² NOTA: Antes de utilizar el programa de control de los microposicionadores, se debe iniciar el programa VBDemo.exe realizado por la empresa *Precision MicroControl (PMC)* para cargar los parámetros iniciales que se encuentran en el archivo “mcap.ini”, ya que no ha sido posible cargar dicho archivo utilizando MATLAB.

Una vez ejecutada la interfaz, lo primero que se debe hacer es elegir entre las tres opciones permitidas de movimiento. Para las dos primeras, *Absolute* y *Relative*, basta con introducir la distancia a mover y haciendo uso de los botones “Move +” y “Move -” se realizará el movimiento, positivo o negativo. Después de ejecutar el movimiento se actualizan las posiciones y se muestran por pantalla.

Finalmente la opción restante, *Continuo*, permite realizar barridos de movimiento tanto de subida como de bajada. Se deberán introducir 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” que llama a la función correspondiente. 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 cuyo funcionamiento consta de tres pasos:

1. Haciendo uso de la función principal *mover_relativo.m*, se realiza un movimiento relativo del valor del paso introducido por el usuario.
2. Se actualizan las posiciones a las correspondientes después de haber realizado el movimiento (*posiciones.m*)
3. Se comprueba si se ha llegado a la posición límite establecida, si no es así, se vuelve al paso 1. En caso contrario, se detiene, resetea el temporizador y se cierra la conexión con los micro-posicionadores

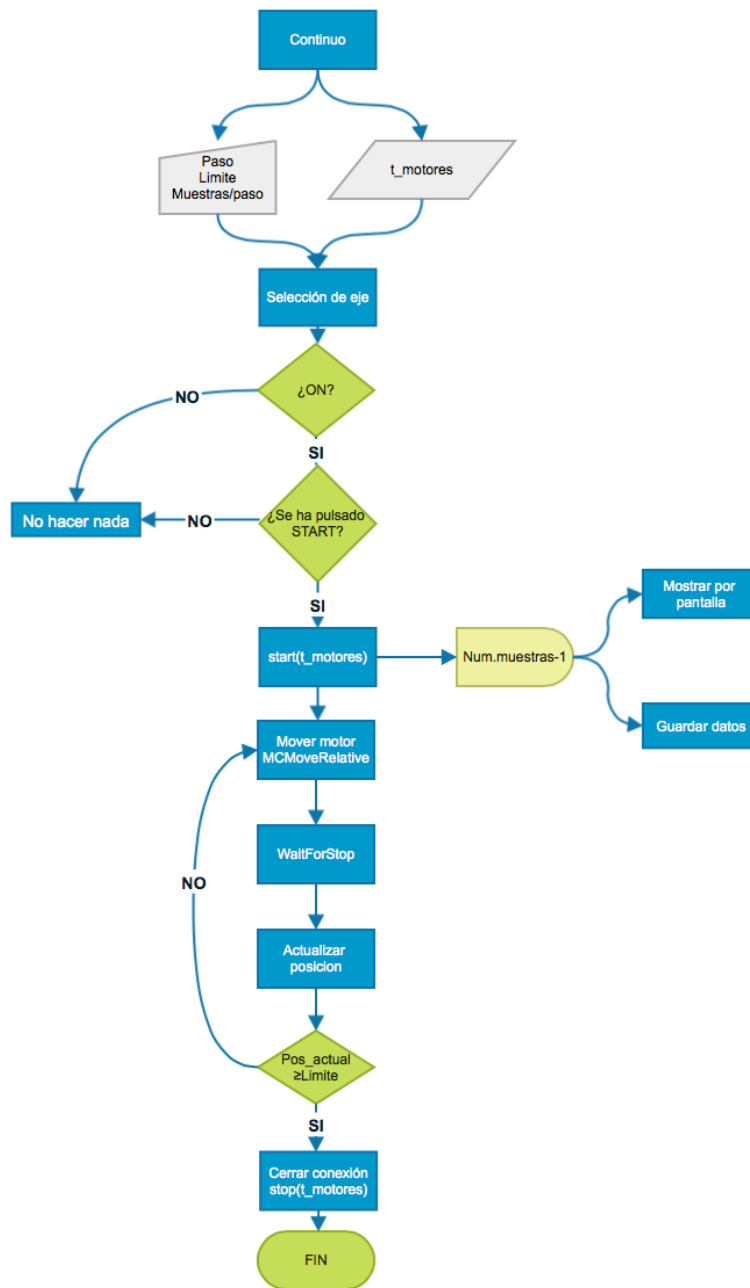


Figura 2.20 - Diagrama de flujo de la función Movimiento Continuo

Puesto que este programa se ejecuta en paralelo junto con el del interrogador, hay que tener en cuenta sus características para un correcto funcionamiento. Por ello se debe asegurar que el tiempo de movimiento del micro-posicionador debe de ser inferior al periodo de muestra por pantalla, generalmente un segundo. Esto se debe a que, cada vez que se realiza un desplazamiento, los resultados se muestran por pantalla en la interfaz

del interrogador, pudiéndose además guardar los datos³ si se encuentra activada esta función. Por tanto, podrían obtenerse resultados erróneos si el movimiento del microprocesador no ha concluido con anterioridad.

Como se observa en la Figura 2.20, se ha introducido un retardo de valor igual al número de muestras por paso menos uno con el fin de poder obtener la información de la primera ejecución antes de que se produzca el movimiento del micro-posicionador. Adicionalmente, como se observa en la Figura 2.19, existen una serie de botones cuyas funcionalidades son las siguientes:

- *Abort*: Mediante la función `MCAbort()` aborta cualquier tipo de movimiento para uno o varios ejes.
- *Stop*: Se encarga de parar uno o varios ejes en uso utilizando los valores de deceleración que se encuentran especificados en el archivo “.ini”. Se ejecuta la función `MCStop()`.
- *Zero*: Se utiliza para poner a cero la posición actual en el eje activo. Para ello se utiliza `MCSetsPosition()`.
- *Home*: Al pulsarlo se vuelve a la posición inicial llamando a la función `MCAbort()`.
- *Reset*: Realiza un reset completo del controlador o de los ejes que no estén activos en ese momento. Para ello se utiliza `MCRreset()`. Será necesario volver a cargar el archivo “mcapi.ini”.
- *Exit*: Cierra la tanto la conexión con los motores, `MCClose()`, como la interfaz del interrogador y deshabilitará todos los ejes.

2.4 Conclusiones

Se ha desarrollado un software que, además de permitir la visualización en tiempo real del espectro en longitud de onda, representa la transformada de Fourier (FFT), tanto en magnitud como en fase. Además de la FFT también incluye otras técnicas de procesamiento de datos como son el promediado y la detección de picos y valles. Adicionalmente, permite el almacenamiento de trazas de datos en archivos para su posterior procesamiento.

³ En los archivos se introducirá una nueva columna en la que se aparecerá representado el valor de la posición actual.

Gracias a esto se consigue ampliar la funcionalidad de un dispositivo comercial que está dirigido principalmente a la interrogación de sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs). De esta manera puede utilizarse de manera sencilla para otro tipo de aplicaciones como la caracterización de estructuras de fibra óptica en reflexión y transmisión, interrogación de otro tipo de sensores, por ejemplo interferómetros, permitiendo, gracias al uso de la FFT y como se presentará en próximos capítulos, la multiplexación de este tipo de sensores gracias a la utilización de nuevas técnicas.

Al programa principal de control del interrogador se le ha añadido un módulo para controlar micro-posicionadores, de forma que puede observarse cómo se comporta el sensor (o red de sensores) en tiempo real ante diferentes estímulos como deformación, curvatura, desplazamiento, etc., observando la variación del espectro y en su FFT.

Capítulo 3 MULTIPLEXACIÓN DE SENSORES DE FIBRA DE CRISTAL FOTÓNICO

3.1 Introducción

La interferencia de la luz en estructuras de fibra óptica se trata de un fenómeno ampliamente utilizado para diferentes aplicaciones tales como el diseño de filtros ópticos para aplicaciones de comunicaciones ópticas [16], de láseres de fibra óptica multi-longitud de onda [17], o en tecnologías de sensores de fibra óptica [18]. Existen varios tipos de estructuras interferométricas como pueden ser la estructura Mach-Zender, Michelson, Fox-Smith, Sagnac y SMS (transiciones monomodo-multimodo-monomodo) entre otras que básicamente, se realizan desplazando la fase entre dos ondas o más ondas que interferirán en un dispositivo óptico, como por ejemplo en un acoplador de fibra, polarizador, fusión entre fibras, etc.

Debido a las diferentes características que presenta cada estructura interferométrica, existen numerosas características que pueden ser utilizadas como parámetros sensores, principalmente se utilizan las variaciones de fase. Comúnmente, la información sobre la fase es medida mediante el seguimiento de un mínimo de la interferencia, o de la variación de intensidad que presenta para un longitud de onda fija. En este último caso, haciendo uso de una fuente de luz de banda estrecha, la cual es modulada cuando se produce una variación en la interferencia [19].

El análisis de las variaciones de fase haciendo uso de la transformada rápida de Fourier (FFT) es una técnica no muy extendida, a pesar de proporcionar un punto de vista diferente sobre la interferencia y, en algunos casos, una información útil y clara para ser utilizada en aplicaciones para sensores. En uno de estos estudios, *D. Barrera et al.* utilizan el análisis FFT para la multiplexación de sensores interferométricos de fibra óptica [20]. En este caso, la interferencia de dos secciones de interferómetros SMS colocados en serie es analizada estudiando los cambios de fase para cada contribución frecuencial debida a la interferencia multimodal.

En este capítulo se proponen dos nuevos esquemas para la multiplexación de interferómetros basados en el análisis mediante el uso de la FFT. Una de las estructuras propone multiplexar dos fibras sensoras de cristal fotónico conectadas en serie en un solo interferómetro mientras que la otra incluye cuatro interferómetros en un mismo acoplador de ocho puertos. Utilizando el interrogador Smartec SM125 junto con el programa presentado en la sección 2.2 se monitorizan los señores mediante el seguimiento de la fase de la FFT para las frecuencias correspondientes a su pico de magnitud. Cada uno de los sensores utilizados está constituidos por una sección de fibra de cristal fotónico altamente birrefringente (HiBi) conectada a un controlador de polarización y a un acoplador configurado en la conocida estructura Sagnac [21],[22]. Estos se han comprobado como sensores de deformación.

El material utilizado para la realización de las pruebas ha sido el siguiente:

- Interrogador SM125 de Micron Optics
- Microposicionadores DCX-PCI100
- 4m de fibra HiBi PM-1550-01 de NKT Photonics
- Controladores de polarización
- Acoplador 4x2
- Atenuador variable
- Fusionadora de fibra óptica v2000 s175 de Fitel

En este capítulo se va a utilizar el *software* implementado para la interrogación de nuevas estructuras de multiplexación de interferómetros de PCF. El tipo de multiplexación que se presenta en estas estructuras no es ninguno de los comunes (en longitud de onda (WDM), temporal (TDM), etc. Sino que para estas estructuras la multiplexación se realiza en frecuencia espacial (frecuencia de la FFT). Para ello en primer lugar estudiaremos el comportamiento de un solo sensor para a continuación proceder a multiplexar cuatro interferómetros en paralelo usando un acoplador 2x8 y por último se multiplexarán dos secciones de PCF en serie en un solo interferómetro.

3.2 Caracterización de un sensor PCF

Inicialmente se ha utilizado un único sensor de 0.5 m de longitud de fibra de cristal fotónico HiBi dentro de un interferómetro de tipo Sagnac para comprobar el correcto funcionamiento del sistema. Para ello se ha hecho uso del interrogador SM125 y del *software* implementado anteriormente. Como se muestra en la Figura 3.1, el interferómetro está formado por un acoplador 50:50 cuyo puerto de entrada 1 está conectado a uno de los cuatro canales del interrogador, y los puertos de salida a un controlador de polarización seguido de 0.5m de PCF formando un lazo cerrado, de forma que la interferencia se genera en el acoplador.

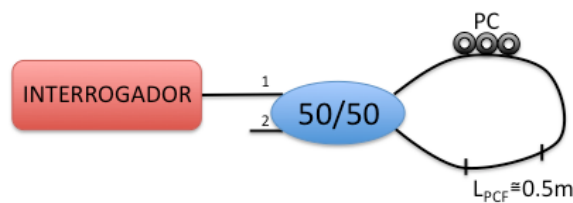


Figura 3.1 – Estructuras esquemática de un sensor interferométrico en estructura Sagnac realizado con 0.5m de PCF HiBi.

El espectro de la interferencia generada se muestra en la Figura 3.9. Se puede decir que esta sigue aproximadamente un patrón $\cos^2(x)$, y tiene una amplitud en potencia de unos 6 dB.

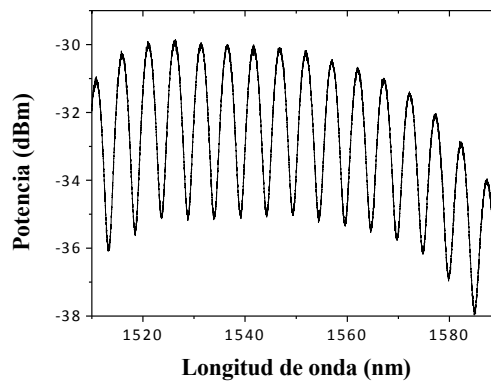


Figura 3.2 - Resultado del espectro en longitud de onda obtenido para el interferómetro de 0.5m de longitud.

Recordando que la transformada de Fourier para la función $\cos^2(x)$ viene representada por:

$$\mathcal{F}[\cos^2(x)] = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega) + \frac{1}{2} \cdot \delta(\omega + \omega_0) \right]$$

donde $\delta(\omega)$ es la delta de Dirac que representa la componente en continua de la señal y $\delta(\omega - \omega_0)$ y $\delta(\omega + \omega_0)$ son dos deltas de Dirac centradas en las frecuencias ω_0 y $-\omega_0$ respectivamente. Para la interferencia obtenida, la FFT tanto en magnitud como en fase queda representada en la Figura 1.3, donde se observa cómo la frecuencia que lo caracteriza ($\pm\omega_0$) está situada en la frecuencia ± 16 . A partir de este punto se tomará siempre el valor de frecuencia positivo puesto que son simétricos en magnitud y anti-simétricos en fase.

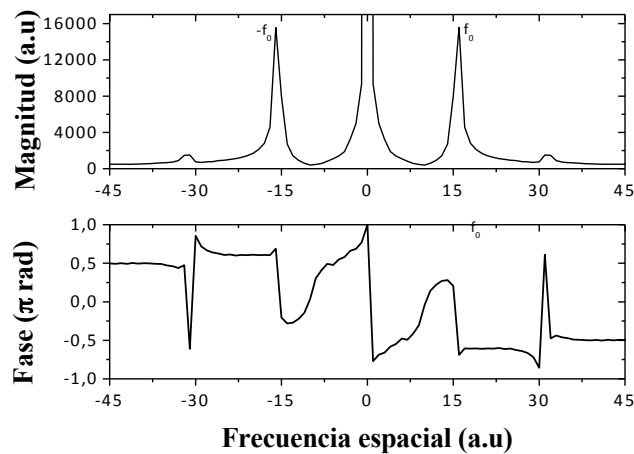


Figura 3.3 - Representación de la magnitud y fase de la FFT obtenidas para el interferómetro de 0.5m.

Hay que destacar que el resultado de la transformada de Fourier es meramente orientativo ya que representa el caso de una señal continua e infinita. Sin embargo en el caso estudiado se trata de una transformada discreta de Fourier de una señal que, además, se encuentra enventanada. La ventana está definida por el rango de trabajo del interrogador (1510-1590 nm) así como por su función de transferencia ya que la respuesta de este no es constante en longitud de onda. En la Figura 3.4 se muestra la función de transferencia del interrogador, que deforma el espectro de interferencia obtenido.

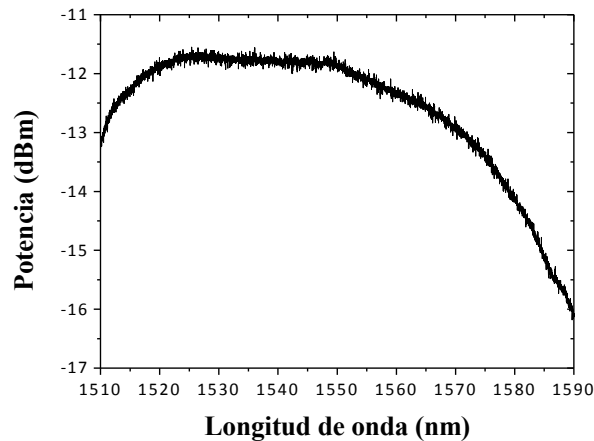


Figura 3.4 - Función de transferencia del interrogador SM125.

Una vez se conoce el espectro de la interferencia y su FFT, se procede a probar el comportamiento del sensor interferométrico al ser sometido a deformación. Para ello, se hace uso de los micro-posicionadores, y utilizando el programa de control de los mismos implementado anteriormente (sección 2.3), se realiza un barrido cada 500 pasos. En primer lugar será un barrido ascendente desde 0 hasta 30000 pasos y posteriormente descendente desde 30000 hasta -5000 pasos. De esta forma se comprueba la correcta recuperación del sensor y ausencia de histéresis.

Teniendo en cuenta que un paso en el micro-posicionador supone un movimiento de 17 nm, que la longitud de fibra en la que se va a aplicar la deformación es de 12.5 cm y sabiendo que un *microstrain* representa la deformación de un micrómetro en un metro de fibra, se calcula la deformación aplicada (en *microstrains*) de la siguiente forma:

$$Deformación_{sensor} = \frac{1}{12.5 \cdot 10^{-2}} = 8 \frac{\mu\epsilon}{\mu m}$$

Como tomamos una medida cada 500 pasos:

$$Deformación \text{ por medida} = 8 \cdot 500 \cdot 17 \cdot 10^{-9} = 68 \mu\epsilon$$

Para estudiar el comportamiento del sensor ante la deformación se va a mostrar la variación de la longitud de onda en un mínimo de interferencia así como el cambio de la fase de la FFT. Para monitorizar los cambios en la fase de la FFT se representa la fase en el punto frecuencial correspondiente al máximo en magnitud (frecuencia 16). Se puede observar que para la fase de la FFT, Figura 3.5, se tiene un comportamiento lineal en función de la deformación aplicada a la fibra y que este no es afectado por las posibles variaciones en la magnitud de la señal. También cabe destacar que no presenta histéresis, el sensor actúa de la misma manera tanto en el caso ascendente (a) como en el descendente (b).

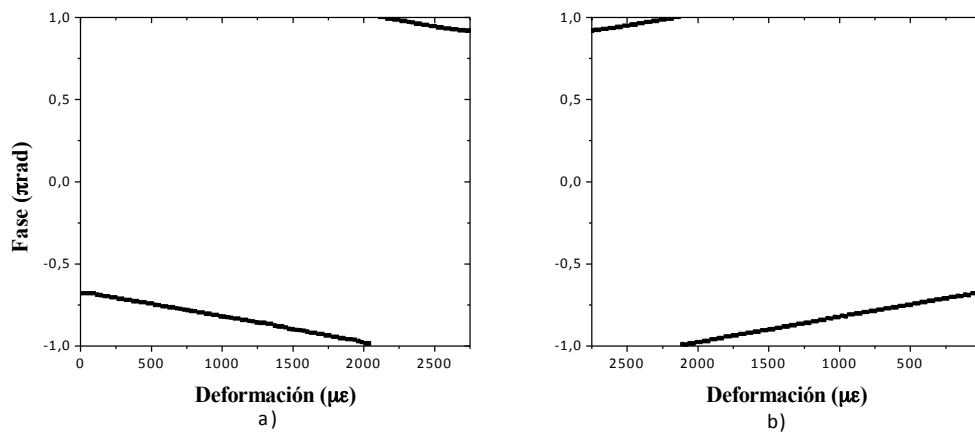


Figura 3.5 - Comportamiento de la fase de la FFT en función de la deformación. a) barrido de deformación ascendente y b) barrido de deformación descendente.

En la Figura 3.6 se observa que, utilizando el método tradicional, siguiendo la variación de la longitud de onda de un mínimo de interferencia, obtenemos también un comportamiento lineal en función de la deformación. Sin embargo, al hacer el ajuste lineal se obtiene un factor de error cuadrático R^2 de 0.991, menor que utilizando el método anterior mediante la FFT (0.99994). También hay que tener en cuenta que con el método tradicional resulta más complicado el seguimiento de la interferencia que en el caso del uso de la FFT en el que solo se tienen que monitorizar los valores que va tomando la fase correspondiente con el pico de magnitud situado en la frecuencia que caracteriza la señal, en este caso la 16.

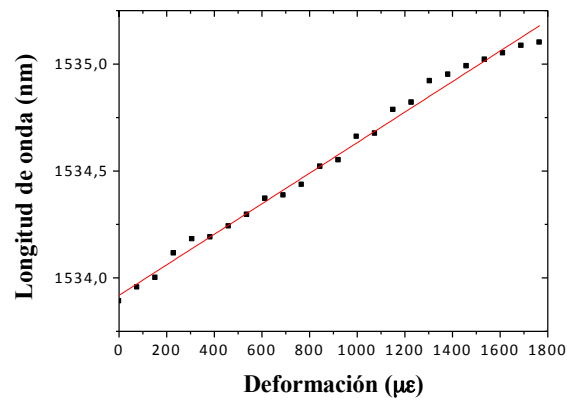


Figura 3.6 - Variación en longitud de onda siguiendo un mínimo de la interferencia resultante del sensor de 0.5m.

3.3 Multiplexación de sensores PCF en paralelo

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento del método de interrogación para un único sensor y se ha visto que la fase de la FFT nos permite caracterizar este tipo de sensores, se procede a la multiplexación de los mismos.

3.3.1 Desarrollo experimental

Para este apartado se realizará la multiplexación de cuatro sensores PCF (0.3, 0.8, 1 y 1.3m de longitud) en paralelo conectados en un lazo cerrado generando interferómetros de tipo Sagnac, utilizando un acoplador 2x8. El esquema del sistema viene representado en la Figura 3.7.

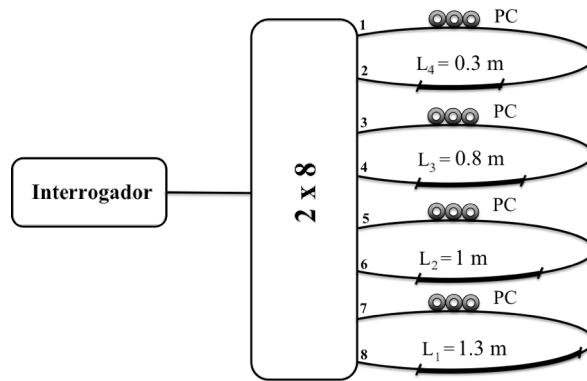


Figura 3.7 - Estructura del montaje multiplexación en paralelo de cuatro sensores PCF mediante un acoplador 2x8.

El espectro de la interferencia resultante se muestra en la Figura 3.8. En este resulta imposible distinguir las componentes de interferencia de cada sensor a simple vista. Por lo tanto en este caso es imposible utilizar el método de interrogación típico de seguimiento de un mínimo de la interferencia para ver su variación en longitud de onda.

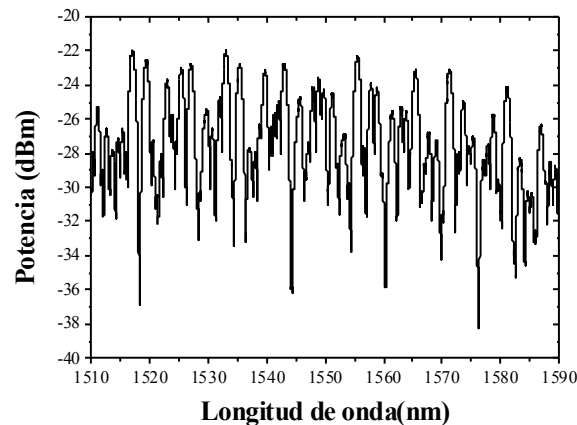


Figura 3.8 – Interferencia total compuesta por las interferencias de cuatro sensores de longitudes 0.3 ,0.8, 1 y1.3m

Debido a la imposibilidad de interrogar esta estructura de multiplexación de sensores PCF con el método de seguimiento de valles, se va a utilizar el método propuesto que consiste en el seguimiento de las variaciones de fase de cada una de las componentes frecuenciales de cada interferencia haciendo uso del análisis FFT. Como se muestra en la figura 1.4, en la magnitud de la FFT resultante se distinguen cuatro picos de frecuencia bien diferenciados, donde cada uno de ellos se corresponde con cada una de las cuatro interferencias (cuatro sensores) que componen la interferencia final (Figura 1.8).

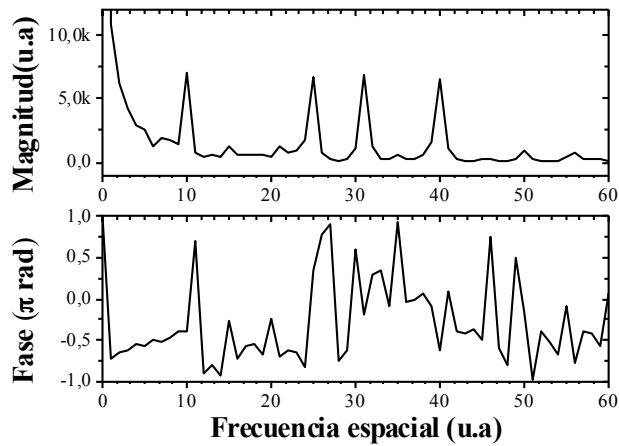


Figura 3.9 - Magnitud y fase de la FFT para la interferencia compuesta por cuatro interferómetros de longitudes 0.3, 0.8, 1 y 1.3m.

Al descomponer la interferencia haciendo uso de la inversa de la FFT y filtrando cada uno de los picos por separado, se obtienen los patrones de interferencia para cada uno de los sensores. Estos quedan representados en la Figura 3.10, en la que se puede ver cómo cada interferencia posee un periodo diferente. El periodo de la interferencia queda determinado por la longitud de la fibra PCF con la que está formado el interferómetro. De esta manera se obtiene que a mayor longitud de PCF menor es el periodo que presenta la interferencia y viceversa.

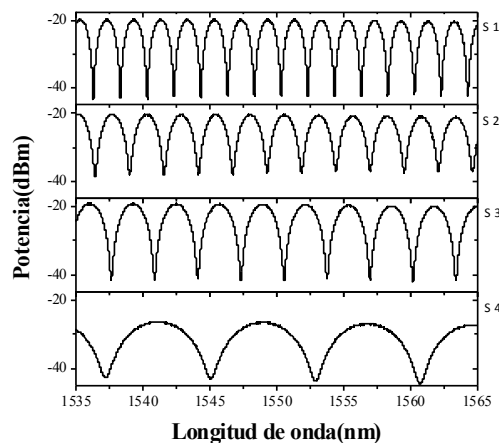


Figura 3.10 - Patrón de interferencia para cada uno de los sensores PCF

La magnitud de la FFT de cada uno de los interferómetros se muestra en la Figura 3.11, en la que la componente frecuencial que caracteriza a cada sensor es mayor cuanto mayor es la longitud de la fibra PCF (a menor periodo mayor es la frecuencia correspondiente). También se puede observar la existencia de batidos extra de baja magnitud a lo largo de la FFT, esto se debe posiblemente a reflexiones parasitas que pueden ser provocadas por imperfecciones a la hora de fusionar la fibra, ya que cabe la posibilidad de que si la PCF se encuentra muy próxima a la zona del arco voltaico, el núcleo puede colapsarse.

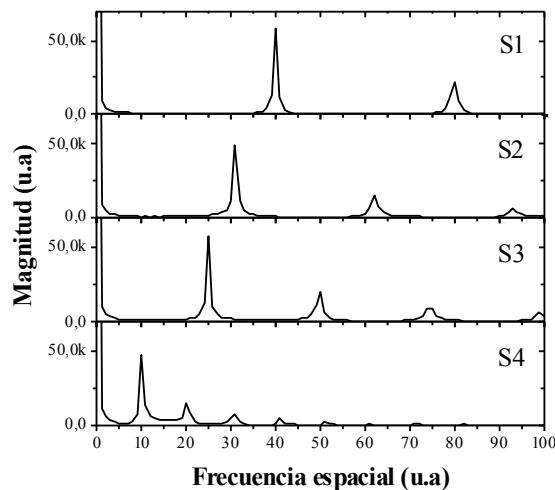


Figura 3.11 - Magnitud de la FFT para cada uno de los sensores PCF

En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de la longitud de cada sensor y las frecuencias de la FFT que los representan.

Sensor	Longitud (m)	Frecuencia espacial (a.u.)
S1	1.3	40
S2	1	31
S3	0.8	25
S4	0.3	10

Tabla 3.1 – Valores de longitud y frecuencia espacial de los cuatro sensores PCF

Al igual que en el apartado anterior, se va a hacer uso de los micro-posicionadores y del programa implementado descrito en el Capítulo 2 , para medir y estudiar de manera precisa el comportamiento de la red de sensores. En este caso se va a realizar un barrido

ascendente y descendente, 0 hasta 35000 pasos y 35000 hasta -5000 pasos (sensor relajado), utilizando incrementos de 250 pasos ($4.25 \mu\text{m}$) y tomando una medida por cada incremento. Teniendo en cuenta la longitud en la que se aplica la deformación y que para cada incremento hacemos un movimiento de $4.25 \mu\text{m}$, se calcula al igual que en el apartado anterior el valor de deformación al que se está sometiendo a cada una de las fibras PCF. En la Tabla 3.2 se muestran los valores calculados para cada uno de los sensores.

Sensor	Longitud (cm)	Deformación por medida ($\mu\epsilon$)
S1	16.6	25.6
S2	21	20.2
S3	15.8	26.9
S4	15.5	27.4

Tabla 3.2 - Valores de deformación para los cuatro sensores PCF

3.3.2 Resultados

Para la realización de las medidas se va a aplicar deformación a uno de los sensores cada vez manteniendo los otros relajados. Esto se va a hacer para cada una de las secciones de fibra, de forma que al final todos los sensores se sometan a deformación. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

3.3.2.1 Comportamiento de la red de sensores

Como se muestra en la Tabla 3.2 la deformación aplicada varía en función de cada uno de los sensores. Dado que para todos ellos se realiza el mismo barrido, existe una pequeña diferencia entre los rangos de deformación totales para cada sensor, aunque para todos ellos queda finalmente un rango que varía entre los 0 y $3000 \mu\epsilon$ como mínimo. Como era de esperar, se consigue un comportamiento claramente lineal para las fases asociadas a la frecuencia correspondiente a cada sensor.

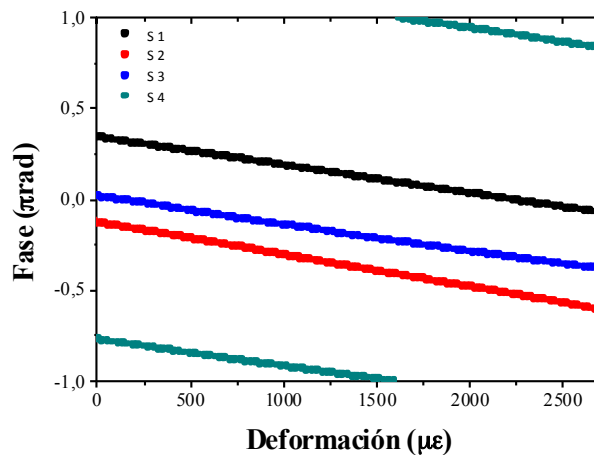


Figura 3.12– Variación de la fase de la FFT en función de la deformación aplicada cuando los cuatro interferómetros están actuando como sensores de deformación.

Sobre los resultados obtenidos se ha calculado la sensibilidad de cada uno de los interferómetros al estar actuando como sensor. Para ello se ha realizado un ajuste lineal para cada uno de los casos, en el que la pendiente de la recta determina la sensibilidad del sensor y el coeficiente de error cuadrático R^2 estipula la precisión del ajuste. En la Tabla 3.3 se presentan ambos resultados para cada sensor:

Sensor	R^2	Sensibilidad del sensor ($\pi\text{rad}/\mu\epsilon$)
S1	0.99995	-1.55×10^{-4}
S2	0.9996	-1.77×10^{-4}
S3	0.9998	-1.42×10^{-4}
S4	0.99982	-1.54×10^{-4}

Tabla 3.3 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en paralelo

Estos resultados confirman la linealidad de la fase para cada uno de los sensores en función de la deformación de estirado. Se puede observar además como todos los sensores poseen un factor R^2 muy próximo al valor máximo 1. Siendo el sensor S₂ el que tiene la mayor sensibilidad ($-1.77 \times 10^{-4} \pi\text{rad}/\mu\epsilon$). A continuación, la Figura 13 muestra la variación de la fase de cada sensor al ser sometido a deformación mientras los otros tres están en posición relajada.

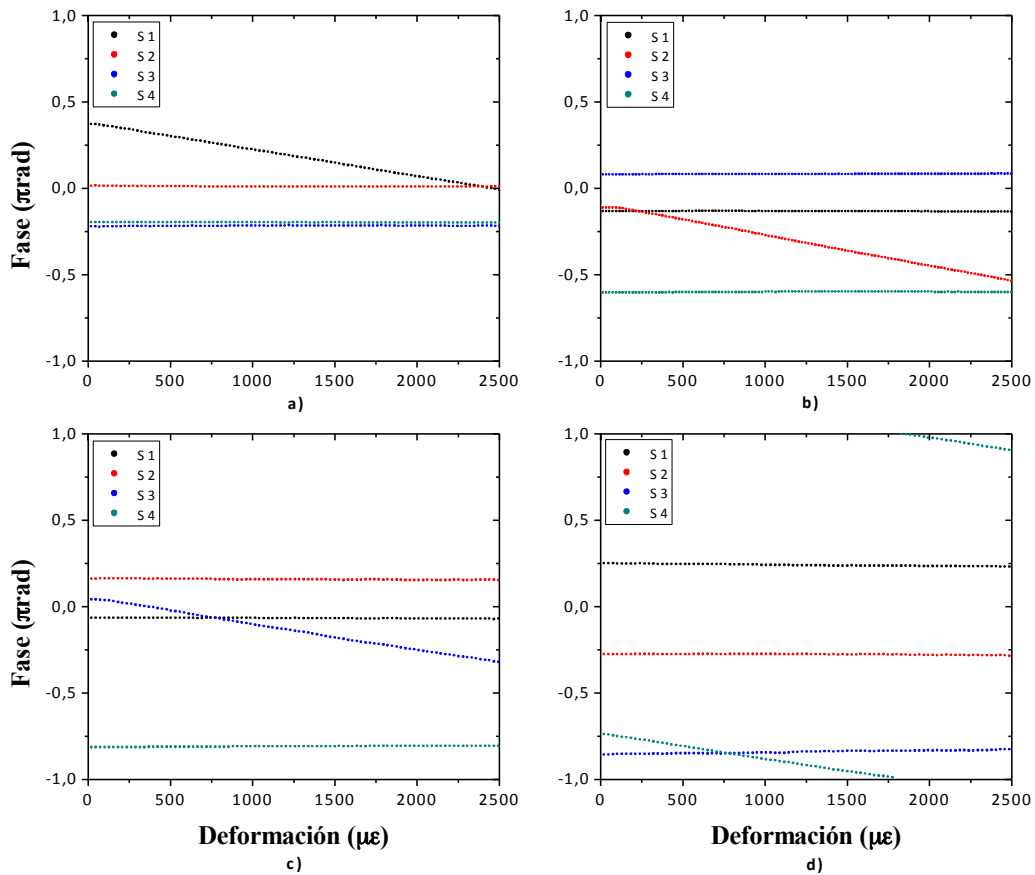


Figura 3.13 - Variación de la fase en función de la deformación aplicada si a) S1 b) S2 c) S3 y d) S4

Se puede ver como para cada uno de los casos solo existe variación de fase para el sensor que está siendo sometido a deformación mientras que para el resto, la fase, se mantiene plana. Por ello, se deduce que los cuatro sensores son independientes y además no existe diafonía entre ellos (*crosstalk*).

Los resultados presentados hasta ahora corresponden al comportamiento de los sensores en el barrido de deformación ascendente. La Figura 3.14 representa la variación de la fase en función de la deformación cuando todos los interferómetros están actuando como sensores en el barrido de deformación descendente.

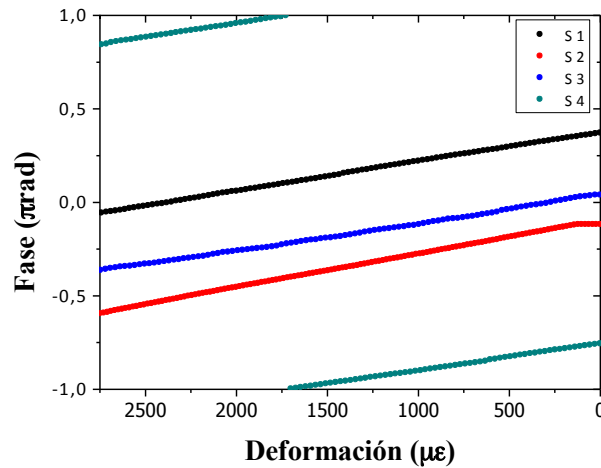


Figura 3.14 - Variación de la fase de la FFT en función de la deformación aplicado cuando los cuatro interferómetros están actuando como sensores para barrido de deformación negativo.

Los resultados obtenidos determinan que el comportamiento es el mismo independientemente del sentido en el que se haga el barrido y por lo tanto se confirma que los sensores no presentan histéresis, como se ha comentado anteriormente en el apartado 3.2.

3.3.2.2 Estabilidad del sistema

Con el fin de estudiar el error existente en las mediciones se realiza un estudio de la estabilidad de la fase del sistema en función del tiempo. Para ello, se estudia la fase de un sensor durante una hora tomando datos cada minuto. Durante este proceso el sensor no se encuentra sometido a deformación. Los resultados se muestran en la Figura 3.15.

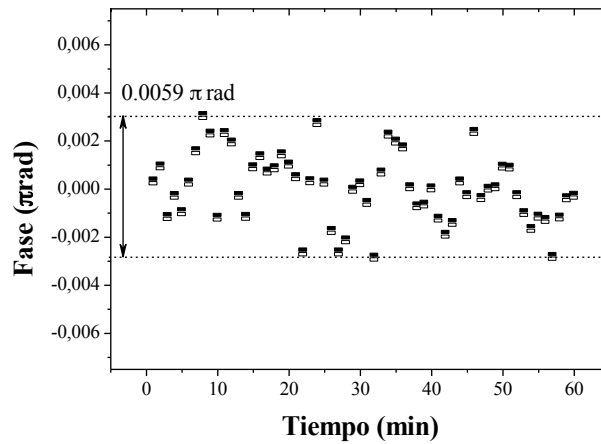


Figura 3.15 - Estabilidad que presenta la estructura de multiplexación de sensores PCF en paralelo.

Se observa como para el sensor el factor de inestabilidad de la fase es de $0.0059 \pi \text{ rad}$ por lo tanto los resultados confirman que se trata de un sistema estable y no existen variaciones de fase ajenas al sistema sensor. A continuación, para calcular el error de la medida se calcula la deformación equivalente al factor de inestabilidad de la fase para cada uno de los cuatro sensores, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$S_{eq}(\mu\epsilon) = \frac{\text{Factor de inestabilidad } (\pi \text{ rad})}{\text{Sensibilidad del sensor } (\pi \text{ rad}/\mu\epsilon)}$$

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados para la deformación equivalente de cada uno de los sensores.

Sensor	Deformación equivalente($\mu\epsilon$)
S1	38.1
S2	33.3
S3	41.5
S4	38.3

Tabla 3.4 - Resumen de los valores obtenidos para la deformación equivalente a la inestabilidad de la fase que presenta el sistema de multiplexación de cuatro sensores PCF en paralelo.

3.4 Multiplexación de dos sensores PCF en serie

Una vez comprobado el correcto funcionamiento para la multiplexación de sensores en paralelo, se procede a realizar la multiplexación de dos sensores en serie.

3.4.1 Desarrollo experimental

Para este apartado se realizará la multiplexación de dos sensores PCF en serie formando un interferómetro Sagnac con un acoplador 50:50. El esquema del sistema viene representado en la Figura 3.16.

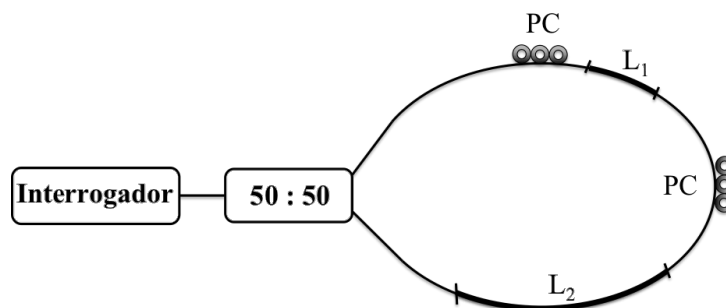


Figura 3.16 – Representación esquemática de la estructura de multiplexación de dos sensores PCF en serie.

Se puede observar que se han colocado dos controladores de polarización (PC) uno entre el acoplador 50:50 y el primer tramo de PCF HiBi y otro entre ambas secciones de PCF. Comenzando por el tramo de longitud L_2 , el primer polarizador tiene como función ajustar los ejes de polarización entre los dos tramos de fibra L_1 y L_2 . Mientras que el segundo se encarga de rotar los ejes de la polarización total con respecto a los ejes polarización de la fuente de luz.

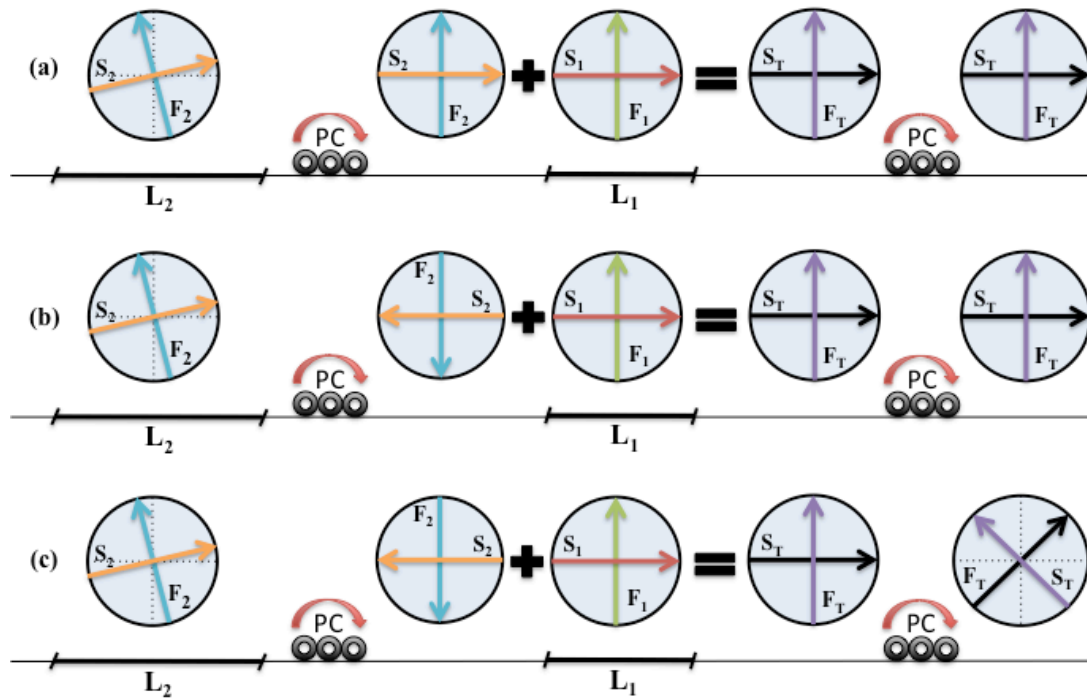


Figura 3.17 – Representación esquemática de las diferentes opciones básicas en las que pueden estar colocados los ejes de polarización para la estructura de multiplexación en serie de interferómetros PCF. a) cuando los ejes de polarización para ambos sensores coinciden entre si y con los ejes de polarización de la fuente de luz b) ejes de polarización en sentido opuesto para entre los sensores pero coinciden con los ejes de polarización de la fuente de luz y c) ejes de polarización en sentido opuesto entre sensores pero girados 45° con respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz.

En la Figura 3.17 se muestran en detalle las tres opciones básicas de posicionamiento de los ejes de polarización. Donde S_2 y F_2 representan los ejes de polarización lento y rápido para la fibra de longitud L_2 , S_1 y F_1 corresponden a los ejes de polarización de la fibra de longitud L_1 y, finalmente, S_T y F_T representan los ejes de polarización lento y rápidos totales. Para facilitar la explicación, se considera que los ejes de polarización para el tramo L_1 están situados siguiendo los ejes de ordenadas y abscisas, al igual que los ejes de polarización que presentan la fuente.

Para la Figura 3.17 a) y b) se considera que ambos tramos de fibra, L_1 y L_2 , estén alineados y actúen como una única fibra cuya longitud total vendrá determinada por la polarización de cada uno de los tramos, de forma que se distinguen dos casos:

- En el caso a) los ejes de polarización S_2 y F_2 al pasar por el primer PC son rotados hasta la posición que presentan los ejes S_1 y F_1 dando como resultado la suma de las componentes de polarización para cada uno de los ejes, $S_T = S_1 + S_2$ y $F_T = F_1 + F_2$. Por lo tanto, representa una longitud de fibra total que corresponderá a la suma de los tramos L_1 y L_2 .
- Para el caso (b) mediante el primer PC se van a situar los ejes del tramo de fibra L_2 en posición opuesta a los que presenta L_1 dando como resultado la resta de las componentes de polarización para cada uno de los ejes, $S_T = |S_2 - S_1|$ y $F_T = |F_2 - F_1|$. Consecuentemente, la longitud de fibra total corresponderá a la resta de los tramos L_2 y L_1 .

La Figura 3.17 c) representa el caso que se quiere conseguir. Dada la posición inicial de los ejes de polarización para el tramo L_2 , mediante el primer PC ajustamos dichos ejes hasta hacerlos coincidir con la posición opuesta de los ejes de polarización del tramo L_1 . Una vez tenemos los ejes de polarización totales, mediante el segundo PC rotamos los ejes de polarización total 45° con respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz. De esta forma que ambas componentes, la rápida y la lenta, tengan la misma aportación.

Por lo tanto, estos tres casos actúan de manera diferente sobre el espectro de la interferencia y consecuentemente sobre la FFT de la misma. Teniendo en cuenta que para los tramos L_1 y L_2 estará representado por las frecuencias f_1 y f_2 respectivamente. Los espectros en magnitud (Figura 3.18) para cada uno de los casos se explican a continuación:

- Caso a), se tiene una longitud total $L_1 + L_2$, como se ha comentado anteriormente, a mayor longitud menor es el periodo de la interferencia y por lo tanto aparecerá una componente frecuencial que será la suma de cada una de las componentes por separado, $f_2 + f_1$.
- Caso b), la longitud total de la fibra es $L_2 - L_1$, por lo que en este caso tendremos un mayor periodo en el espectro de la interferencia lo que implica que la componente frecuencial resultante en la magnitud de la FFT será menor y corresponderá a la resta de cada una de las componentes por separado, $f_2 - f_1$.
- Caso c), se tiene que los ejes de polarización total forman 45° con respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz y como se ha comentado anteriormente,

ambas componentes (S_T y F_T) presentan la misma aportación respecto al eje principal. Como consecuencia van a aparecer en la magnitud de la FFT dos picos frecuenciales de igual magnitud situados uno en la frecuencia f_1 y el otro en la frecuencia f_2 .

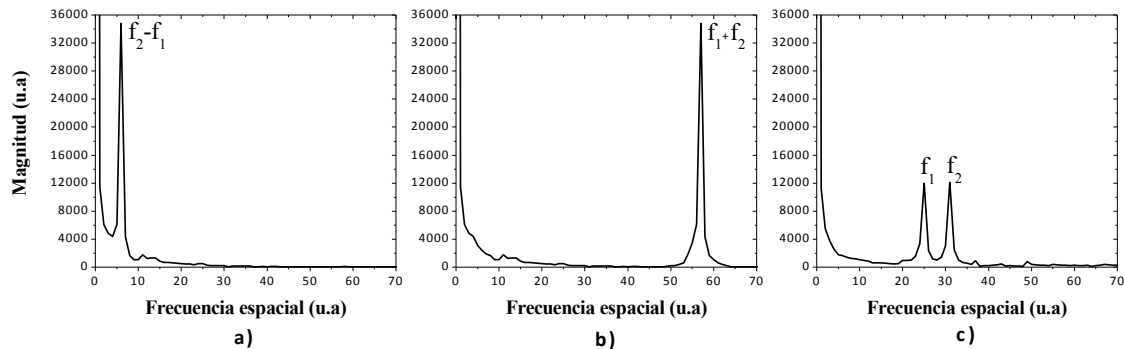


Figura 3.18 - Resultados ideales para las diferentes configuraciones posibles de los ejes de polarización entre dos secciones de fibra PCF y respecto a los ejes de polarización de la fuente de luz. a) todos los ejes coincidentes entre sí, b) posición opuesta entre los ejes entre los sensores con la polarización resultante coincidente con los ejes de polarización de la luz y c) ambos sensores con ejes de polarización coincidentes y polarización resultante de los sensores rotada 45° con respecto a la de la fuente de luz.

Este último caso es el que se va a utilizar aunque debido a la sensibilidad de este tipo de fibra a la polarización y a la poca precisión que se puede conseguir un PC manual, conseguir que los ejes de los dos sensores estuvieran colocados en el ángulo correcto, evitando así las componentes suma y resta de las frecuencias, resultado bastante complicado. De hecho no se consiguió eliminar completamente ninguna de estas componentes.

Al igual que en los apartados anteriores hace uso de los micro-posicionadores y del programa implementado descrito en el Capítulo 2, para medir y estudiar de manera precisa el comportamiento de la red de sensores.

En este caso también se ha realizado un barrido ascendente y descendente tomando el mismo rango que para el apartado anterior, es decir, 0 hasta 35000 y 35000 hasta -5000 (sensor relajado). También se utilizan incrementos de 250 pasos ($4.25\mu\text{m}$) y tomando una muestra por trama. Teniendo en cuenta la longitud en la que se realiza la

deformación y que para cada traza hacemos un movimiento de $4.25\mu\text{m}$, se calcula al igual que en el apartado anterior el valor de los microstrains a los que se está sometiendo cada una de las fibras. En la Tabla 3.5 se especifican los valores para cada uno de los sensores que utilizan.

Longitud del sensor(m)	Longitud sobre la que se aplica la deformación (cm)	Deformación por medida($\mu\epsilon$)
1.3	16.6	25.6
1.0	21	20.2
0.8	15.8	26.9
0.5	12.5	34
0.3	15.5	27.4

Tabla 3.5 - Resumen de las longitudes y deformación por medida de los sensores PCF utilizados.

3.4.2 Resultados

Para la realización de las medidas, se toman combinaciones de dos sensores, de forma que se somete a deformación uno de ellos mientras el otro se encuentra en una posición fija. Se eligieron las siguientes combinaciones de sensores para realizar dichas medidas:

- 0.3 y 1m
- 0.5y 1.3m
- 0.8 y 1.3m

Para todos los casos el sensor de longitud más corta representa L_1 y por lo tanto su componente frecuencial es f_1 , de manera análoga el otro sensor que queda representado por f_2 . Como se ha comentado anteriormente resulta indiferente hacer el estudio de variación de la fase aplicando deformación en sentido positivo o negativo, por lo tanto, aunque se hayan realizado ambos barridos, los resultados que se muestran son los del barrido en sentido positivo.

Los resultados obtenidos para las combinaciones 0.3-1m y 0.8-1.3m pueden consultarse en el 4.4ANEXO C.

3.4.2.1 Sensores 0.5m y 1.3m

Para el primer montaje se toman como sensores los interferómetros donde las longitudes L_1 y L_2 están representadas por los valores 0.5 y 1.3 m respectivamente. En la Tabla 3.6 aparecen representadas las frecuencias espaciales correspondientes a cada uno de los sensores (f_1 y f_2) y las componentes suma y resta (f_3 y f_4 respectivamente) de estas mismas.

f_1	f_2	$f_3=f_2-f_1$	$f_4=f_2+f_1$
16	25	11	41

Tabla 3.6 – Componentes frecuenciales de la magnitud de la FFT para los sensores 0.5 y 1.3m en serie

En este caso, se estudia el comportamiento de la fase en función de la deformación para la situación en la que la interferencia no está sometida a atenuación. Seguido a este estudio, se procederá a introducir un atenuador variable en el montaje, entre la fuente de luz y el CP para simular una situación remota o de altas pérdidas en la red. Con ello se quiere demostrar que, para situaciones en las que con los métodos tradicionales sería imposible hacer una medida, con el análisis FFT es posible. Los resultados obtenidos se muestran en los siguientes sub-apartados.

i. Sin introducir atenuación en la señal de interferencia

El espectro de la interferencia con el que se trabaja se muestra en la Figura 3.19 a). Las componentes frecuenciales de la FFT se representan en la Figura 3.19 b). Se puede observar como la componente “resta” de las frecuencias se ha conseguido eliminar. Sin embargo, aparece una pequeña aportación para la componente “suma”. Como se ha comentado anteriormente, esto se debe a que los ejes de las secciones de fibra L_1 y L_2 no están perfectamente alineados entre ellos o respecto a los ejes de polarización del láser.

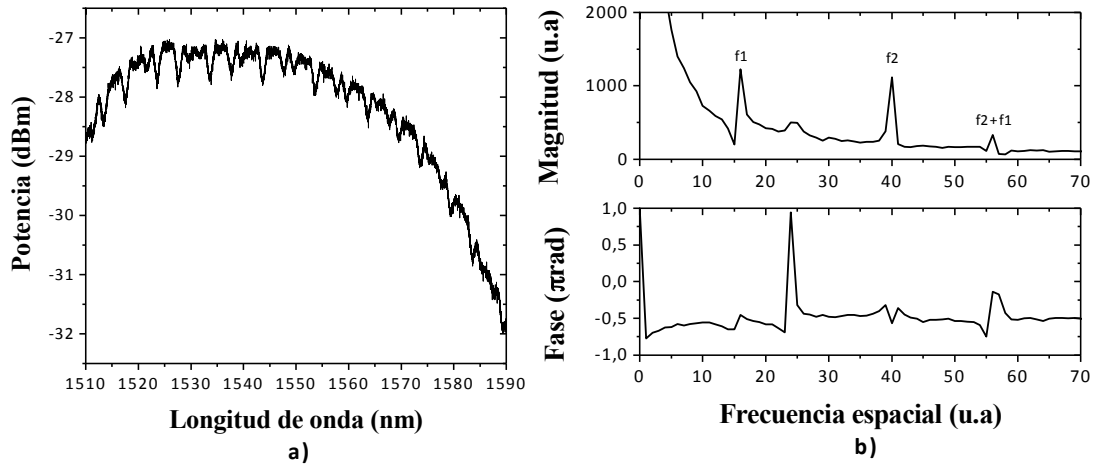


Figura 3.19 - Representación del a) espectro de la interferencia resultante y b) magnitud y fase de la FFT.

En la Figura 3.20 se representan las variaciones de la fase en función de la deformación cuando S1 se somete a deformación y mientras S2 está en posición fija (a) y viceversa (b). Tomando como referencia la Figura 3.20 a) se puede apreciar como la fase para el S1 varía linealmente mientras que la fase para S2 se mantiene plana. Si observamos los cambios de fase para los batidos de frecuencia suma y resta, como era de esperar, la variación de la fase ($\Delta\phi$) correspondiente a f_1+f_2 , está determinada por la suma de variaciones de fase de los sensores S1 y S2 por separado.

$$\Delta\phi(f_1 + f_2) = \Delta\phi(f_1) + \Delta\phi(f_2)$$

De manera análoga sucede para el caso f_2-f_1

$$\Delta\phi(f_2 - f_1) = \Delta\phi(f_2) - \Delta\phi(f_1)$$

Esta es la razón por la que en la Figura 3.20 a) $\Delta\phi(f_1 + f_2) = \Delta\phi(f_1)$ cuando $\Delta\phi(f_2) \approx 0$. De forma equivalente en la Figura 3.20 b), se observa como la fase en la frecuencia $f_2 - f_1$ se comporta de manera inversa a la fase del sensor S2 cuando $\Delta\phi(f_{S1}) \approx 0$.

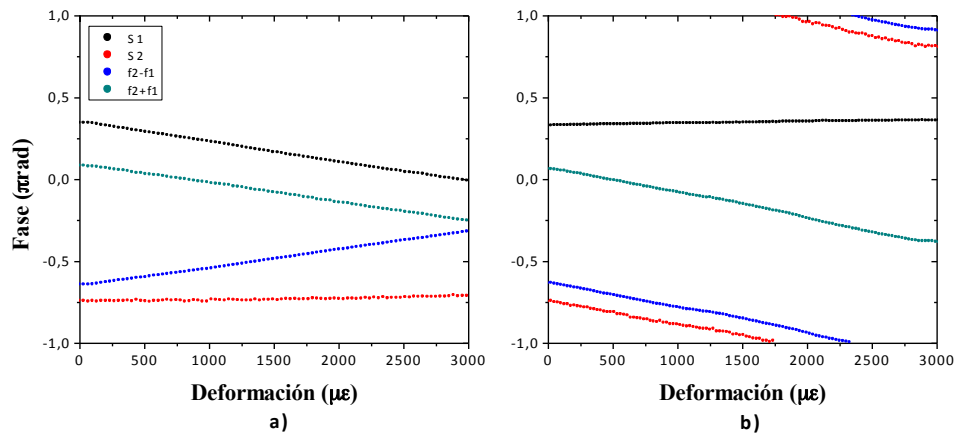


Figura 3.20 - Resultado obtenido para las variaciones de fase de la FFT en función de la deformación cuando a) el sensor S1 está sometido a deformación (0.5m) y b) el sensor S2 (1.3m).

Para calcular las sensibilidades que presenta cada uno de los sensores, se hace uso de los resultados obtenidos (Figura 3.21) para cada interferómetro cuando estos están actuando como sensores.

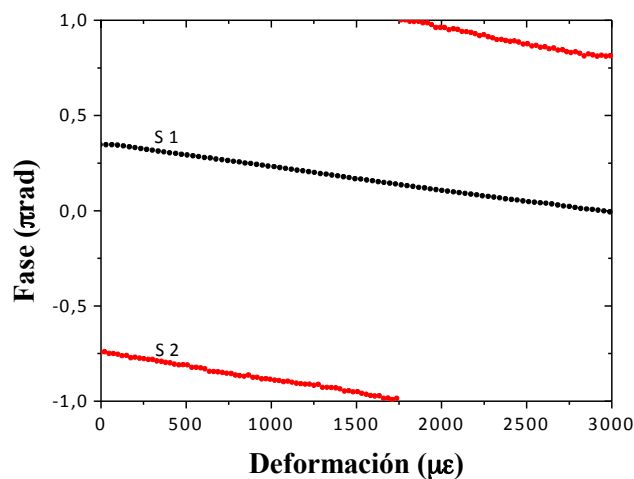


Figura 3.21 - Resultado de la variación de fase de la FFT en función de la deformación cuando los interferómetros S1(0.5m) y S2(1.3m) están actuando como sensores.

Para ello como en el caso de multiplexación en paralelo se ha realizado un ajuste de recta para cada uno de los sensores. Debido a que el sensor S2 presenta un cambio de fase de $-\pi$ a π , cuando la deformación alcanza 1750 $\mu\epsilon$ aproximadamente, se deberá realizar el ajuste en uno de los dos tramos en los que se divide fase. Para este caso se

hizo uso de la recta que oscila entre 0 y 1750 $\mu\epsilon$. Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.7.

Sensor	R ²	Sensibilidad del sensor($\pi\text{rad}/\mu\epsilon$)
S1	0.99872	-1.1×10^{-4}
S2	0.99499	-1.4×10^{-4}

Tabla 3.7- Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.5m y 1.3m.

De los resultados obtenidos se confirma que ambos sensores poseen un factor de determinación próximo a 1, obteniendo 0.99499 en el peor de los casos.

ii. *Introduciendo atenuación en la señal de interferencia*

Para estudiar la independencia de las variaciones de fase en función de la magnitud de la señal, se va a realizar un estudio que consiste en atenuar controladamente la señal que ilumina el sensor y caracterizando la respuesta de los mismos. Para ello, se han realizado dos casos uno introduciendo una atenuación de 9.6dBm y para el otro 19.6dBm.

Al introducir una atenuación de 9.6dBm en la señal, el espectro para la interferencia resultante se muestra en la Figura 3.22, se puede observar como la interferencia es prácticamente inapreciable.

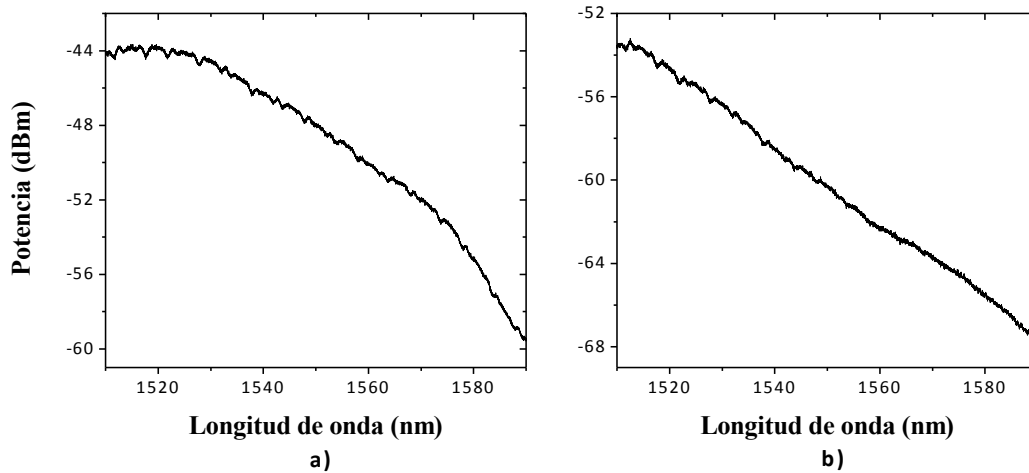


Figura 3.22 - Espectro en longitud de onda resultante al introducir una atenuación de 9.6dBm en la señal de interferencia.

La Figura 3.23 muestra el comportamiento de la fase en función de la deformación aplicada cuando ambos interferómetros se encuentran actuando como sensores.

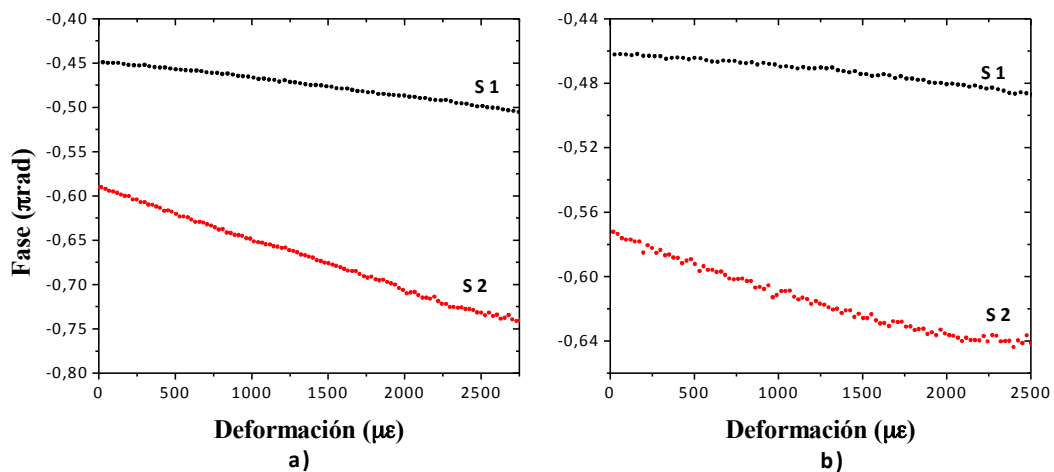


Figura 3.23 - Resultado obtenido para las variaciones de fase cuando ambos interferómetros actúan como sensor en función de la deformación aplicada cuando la señal de entrada se encuentra atenuada 9.6dBm.

Los valores de la sensibilidad y el factor de ajuste obtenidos para cada uno de los sensores y las diferentes atenuaciones se resume en la Tabla 3.8.

Atenuación (dBm)	Sensor	R ²	Sensibilidad del sensor (πrad/με)
9.6	S1	0.99879	-2.15x10 ⁻⁵
	S2	0.9758	-4.90 x10 ⁻⁵
19.6	S1	0.98411	-1.31 x10 ⁻⁵
	S2	0.98725	-3.45 x10 ⁻⁵

Tabla 3.8 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.5m y 1.3m cuando la señal de entrada se encuentra atenuada.

Aunque los valores del error cuadrático, R², son próximos a 1, cabe destacar que la sensibilidad para los sensores se ha reducido en un factor 10 con respecto al caso en el que no se introduce atenuación. Además si se observan los rangos de variación de las fases para cada uno de los sensores y los comparamos con el caso anterior, que presenta un rango de oscilación aproximadamente de π/2 radianes, estos se reducen obteniendo unos valores que oscilan entre 0.05π y 0.1π radianes, para S1 y S2 respectivamente para el caso de 9.6dBm de atenuación. Reduciéndose a 0.01π y 0.06π radianes al aumentar la atenuación a 19.6dBm.

De este estudio se puede concluir que los cambios de fase se comportan de manera lineal en función de la deformación aplicada aunque la potencia que presenta la interferencia sea reducida. Pero al atenuar la señal, el rango de variación de la fase disminuye y por lo tanto también lo hace la sensibilidad del sensor.

3.5 Conclusiones

En este capítulo se han desarrollado y verificado experimentalmente dos nuevas estructuras para la multiplexación de sensores fabricados con fibra de cristal fotónico. La primera de ellas situando cuatro interferómetros en paralelo y la segunda colocándolos en serie dos secciones de fibra PCF para formar un único interferómetro con dos fibras como sensores. Ambas estructuras han sido verificadas haciendo uso del interrogador SM125, los micro-posicionadores y el *software* implementado en el Capítulo 2 , estudiando el comportamiento de los sensores mediante el uso de la FFT.

Una de las principales ventajas de utilizar la FFT como técnica de caracterización de sensores interferométricos es que no existe una dependencia entre la magnitud de la interferencia y la medida debido a que la información se encuentra en la fase de la FFT. Además, el uso de la FFT permite una mayor precisión que el método tradicional debido a que simplemente se tiene que seguir la variación de la fase en la frecuencia característica de cada sensor. Los resultados obtenidos confirman la linealidad de la fase en función de la deformación obteniendo valores de R^2 próximos a uno para todos los casos estudiados. Además, para valores pequeños de interferencia, aunque la linealidad de la fase se mantiene, la sensibilidad del sensor disminuye. Aún así, se han propuesto y comprobado experimentalmente dos métodos para la multiplexación de sensores interferométricos basados en fibras de cristal fotónico en tiempo real, presentando nuevas alternativas para superar uno de los principales problemas de los sensores interferométricos y sensores basados en fibras de cristal fotónico, que es la multiplexación de varios sensores en una misma red.

Capítulo 4 Red híbrida de sensores FBG e interferométricos interrogada por un láser conmutable multi-longitud de onda de fibra óptica

4.1 Introducción

Los sistemas de sensores de fibra óptica requieren del uso de diferentes fuentes de luz para la interrogación de las distintas tecnologías y aplicaciones de sensores. En los últimos años los láseres multi-longitud de onda de fibra óptica (MWFL *multi-wavelength fibre lasers*) han adquirido mucho interés debido a su gran potencial en aplicaciones como sistemas de comunicaciones basados en multiplexación de longitud de onda (WDM), espectroscopía de alta resolución, monitorización de sensores de fibra óptica, entre otros[23].

Recientemente, diferentes estudios del efecto de la retro-realimentación distribuida “random” (RDF) en fibra óptica ha atraído la atención de la comunidad científica lo que ha desembocado en un nuevo tipo de cavidades laser [24]–[26]. Estos son conocidos como láseres *random*, que están basados en la mencionada retroalimentación positiva de la dispersión Rayleigh la cual está distribuida a lo largo de la fibra. La característica fundamental de este tipo de láseres es que el espejo está formado por la fibra en si sin la necesidad de espejos *ad hoc*. Además, estos láseres pueden utilizarse para la interrogación de sensores al combinar sensores FBG con un espejo distribuido, estructuras interferométricas, sensores basados en modulación de intensidad... [27], [28], [29].

En este capítulo se va a utilizar un sistema de interrogación versátil basado en una fuente de luz MWFL totalmente conmutable en tiempo real y asistida por un espejo distribuido. El láser se utiliza para interrogar una red de sensores multiplexada remota formada por dos tipos de sensores. Por un lado, la red esta formada por siete sensores interferométricos basados en modulación de intensidad y, por el otro, una red de once sensores FBG basados en la modulación de la longitud de onda. Ambas redes son

interrogadas simultáneamente en una misma red haciendo uso de una misma fuente de luz.

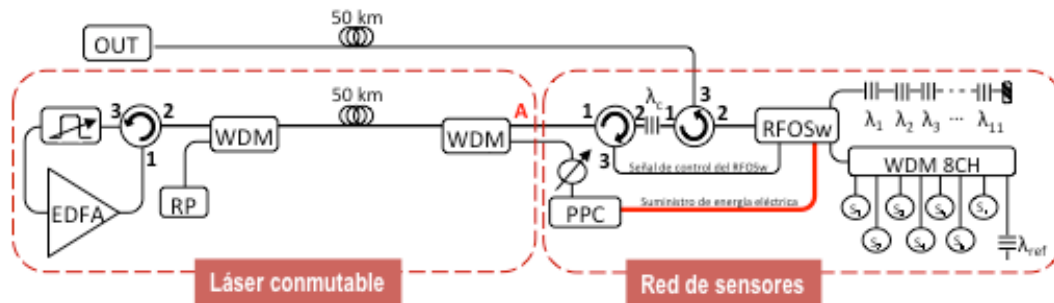


Figura .1 – Estructura del montaje experimental del MWFL conmutable y las redes de sensores

El material utilizado para la realización de los experimentos presentados en este capítulo ha sido el siguiente:

- Láser de bombeo Raman IPG RLD-3k-1445
- Amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA) Photonetics 3624-BT-13
- Finisar WaveShaper 1000S
- Interrogador SM125 MicronOptics
- Convertidor fotovoltaico de potencia PCC9LW de JBL
- Microposicionadores DCX-PCI100
- WDM 2x8
- Circuladores de tres puertos
- 2 carretes de 50 km de fibra SMF28
- 1.5m de fibra HiBi PM-1550-01 de NKT Photonics
- Controlador de polarización
- Colección de 11 sensores FBG 1540nm-1552nm separación 1.2nm
- FBG sintonizable

4.2 *Desarrollo experimental*

El montaje experimental esta dividido en dos bloques bien diferenciados como se muestra en la Figura .1. El primero, corresponde a la fuente de luz conmutable y el segundo, representa la propuesta de la red de sensores a medir.

4.2.1 *Fuente de luz MWFL conmutable*

El láser se basa en una cavidad lineal compuesta por dos espejos, uno distribuido formado por un carrete de 50 km de fibra óptica monomodo estándar SMF28 que actúa también como canal de comunicación y el otro, un espejo en fibra óptica basado en un circulador [30]. Este último espejo tiene como función filtrar la cavidad de manera que permite seleccionar el perfil espectral del MWFL conmutable y reconfigurable. Con el fin de realizar esta función se ha hecho uso de un filtro sintonizable programable (*WaveShaper 1000S de la empresa Finisar*). Para obtener un espectro más ancho de emisión del láser, se incluye un amplificador de fibra óptica dopada con Erblio (EDFA), en lugar de utilizar únicamente el láser de bombeo Raman.

El funcionamiento del MWFL conmutable es el siguiente: El circulador que esta actuando como espejo recibe la luz reflejada del espejo distribuido por el puerto 2. Una vez que la luz se encuentra en el interior del anillo, entre los puertos 1 y 3, es filtrada por el filtro programable y amplificada por el EDFA. Posteriormente, la luz pasa por el puerto 1 hacia el espejo distribuido. El correcto funcionamiento de la estructura depende de este espejo reconfigurable. El filtro programable tiene la capacidad de crear perfiles pre-configurados con una resolución de 8 pm para la banda C de comunicaciones (1527.4 – 1567.4 nm) proporcionando una precisión en la atenuación de 0.01 dB en un rango de 35 dB. Para lograr el láser MWFL se establece una secuencia de filtros paso banda en forma de peine. Las siguientes características del láser fueron estudiadas. El número máximo de líneas de emisión, el ancho de banda de cada línea y la separación entre estas. Asimismo se ha desarrollado un programa a medida para controlar el filtro programable.

En las Figuras 1.2 y 1.3 se presentan el número máximo de líneas de emisión conseguidas para separaciones coincidentes con las rejillas de 100 y 200 GHz contempladas en las especificaciones de la ITU y una muestra de la reconfigurabilidad del sistema ilustrando dos ejemplos aleatorios de perfiles de emisión.

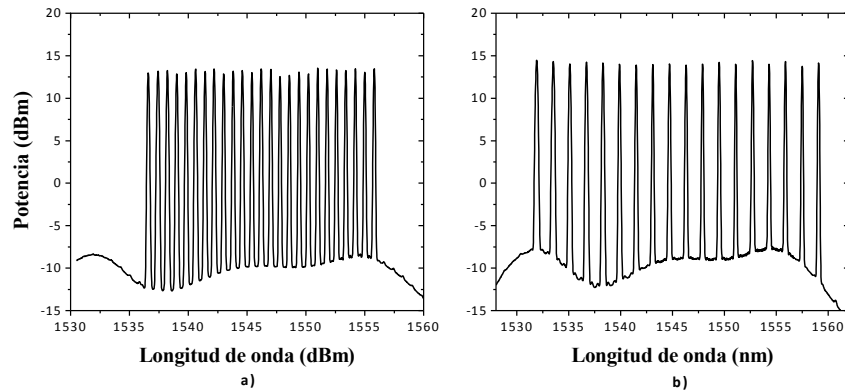


Figura 4.2 - a) Número máximo de líneas de emisión de 100 GHz de separación y b) Número máximo de líneas de emisión de 200 GHz de separación para el sistema MWFL conmutado propuesto.

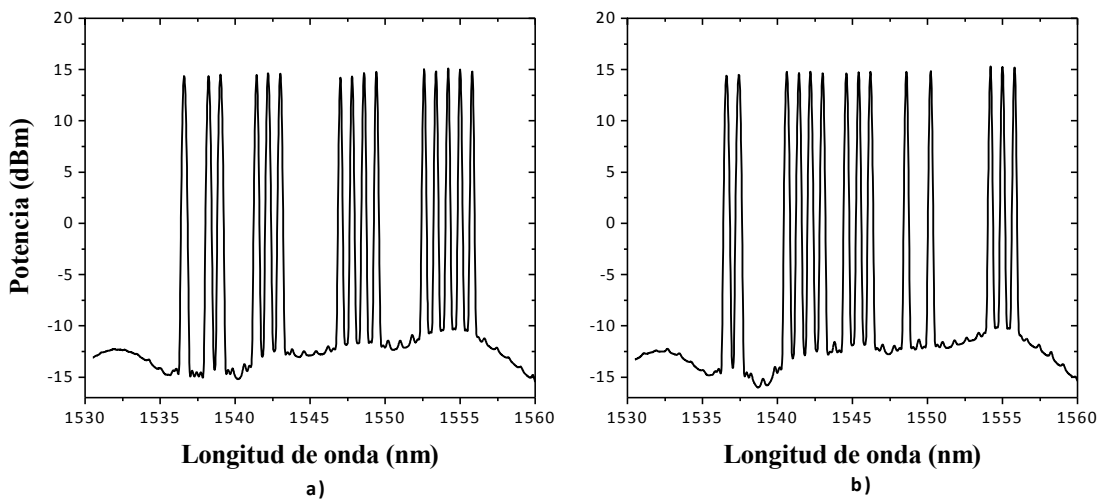


Figura 4.3 - Selección aleatoria de las líneas de emisión para el sistema MWFL conmutado propuesto.

La Figura 4.4 a) muestra la evolución de potencia del láser en función de la potencia de bombeo Raman. Podemos observar como cuando la potencia Raman se encuentra entre 0 y 0.6 W se está produciendo emisión espontánea, por lo que el la fuente de luz actúa como un LED. Mientras que a partir de 0.6 y hasta 1.6 W se produce emisión

estimulada por lo que la emisión corresponde a un láser. En la Figura 4.4 b) se presenta la estabilidad del láser MWFL en función del tiempo. Este parámetro, en el caso que aquí se presenta, interesa que sea lo más estable posible ya que es determinante a la hora de medir sensores de intensidad.

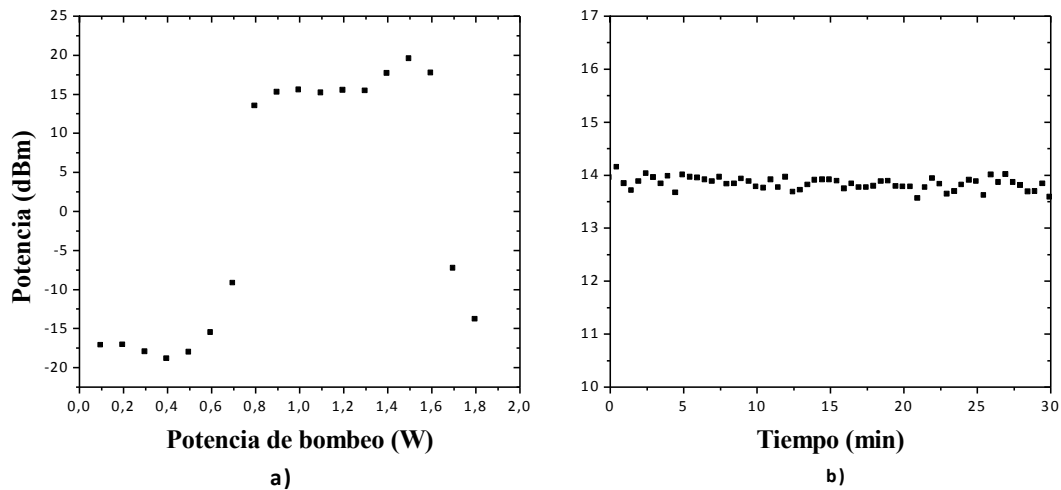


Figura 4.4 -. a) Evolución de la potencia del láser vs. la potencia de bombeo Raman y b) estabilidad de una de las líneas de emisión a lo largo de 30 minutos medido cada 30 segundos.

4.2.2 Red híbrida de sensores interferométricos y FBG

La Figura 1.1 muestra en la parte derecha la red híbrida de multiplexación de sensores remota utilizada. Dentro de esta red se han propuesto dos subredes de sensores basadas en diferentes modos de operación. Por un lado tenemos una red de multiplexación de siete sensores interferométricos de cristal fotónico (PCF) para la medida de deformación y, por el otro, un *array* de once sensores FBG que varían su longitud de onda de operación en función de la temperatura y la deformación.

i. Red de sensores FBG

La red está formada por un conjunto de once sensores FBG multiplexados en serie (Figura 4.5) que abarcan desde 1540 nm hasta 1552 nm con una separación entre ellos de 1.2 nm.

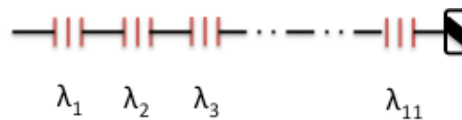


Figura 4.5 – Esquema de la red de sensores de 11 FBG dispuestos en serie.

Debido a que el espectro de ganancia en la parte central es mayor que en los laterales, para conseguir un espectro lo más plano posible, los FBGs suelen situarse alternando los de mayor longitud de onda con los de menor longitud de onda. Consecuentemente, la disposición en longitud de onda (comenzando por el sensor más cercano a la fuente de luz) queda de la siguiente manera:

1552, 1540, 1550.8, 1541.2, 1549.6, 1542.4, 1548.4, 1543.6, 1547.2, 1544.8 y 1546 nm

Los picos de reflexión de los FBG han de poseer una potencia similar, aunque para este montaje no resulta tan importante debido a que la señal va a ser ecualizada mediante la utilización del *Wave Shaper*. Para encontrar la solución óptima, se ha hecho uso del interrogador SM125 de Micron Optics y de la interfaz creada (véase el apartado 2.2.2) que permite ver la variación del espectro en tiempo real. Se ha obtenido el resultado que se presenta en la Figura 4.6.

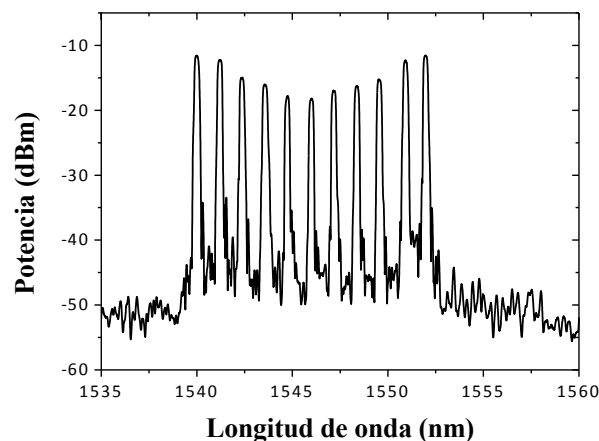


Figura 4.6 - Espectro de la red de 11 sensores FBG medido con el interrogador de sensores.

ii. Red de sensores PCF

Para la realización de esta red de sensores se hace uso un multiplexor divisor en longitud de onda (WDM) de ocho canales (de 1536.61 hasta 1547.72nm coincidiendo

con la rejilla de 200 GHz de la especificación de la ITU). Antes de realizar el conexionado de la red de sensores PCF se caracterizó el espectro de los multiplexores para asegurar que entre los canales no haya una diferencia significativa de potencia, es decir, que el espectro sea lo más plano posible.

Para ello, se conectó el WDM de modo que los cuatro primeros canales quedan conectados a un acoplador 4x2 y los cuatro restantes a otro acoplador 4x2 diferente. Para comprobar el espectro obtenido se utilizó el interrogador. Para ello, se conectó la entrada del WDM a uno de los canales (canal dos en el caso de estudiado) y una de las dos salidas de cada uno de los acopladores a otros dos canales diferentes tal y como muestra el esquema de la Figura 4.7.

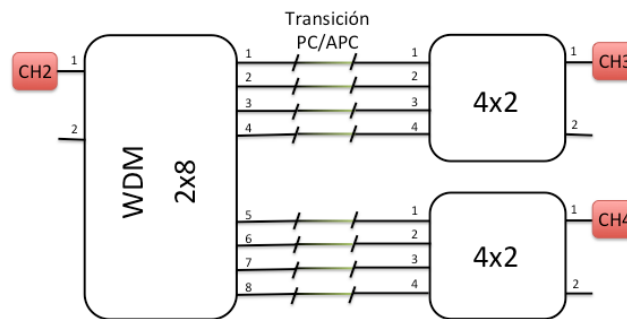


Figura 4.7 - Esquema para la caracterización de los canales del WDM

En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos en los que. Se observa que entre los cuatro canales más altos (longitud de onda más pequeña) existe una diferencia de potencia máxima de 1dBm, mientras que en otro bloque de cuatro canales la diferencia máxima es de 0.5dBm aproximadamente.

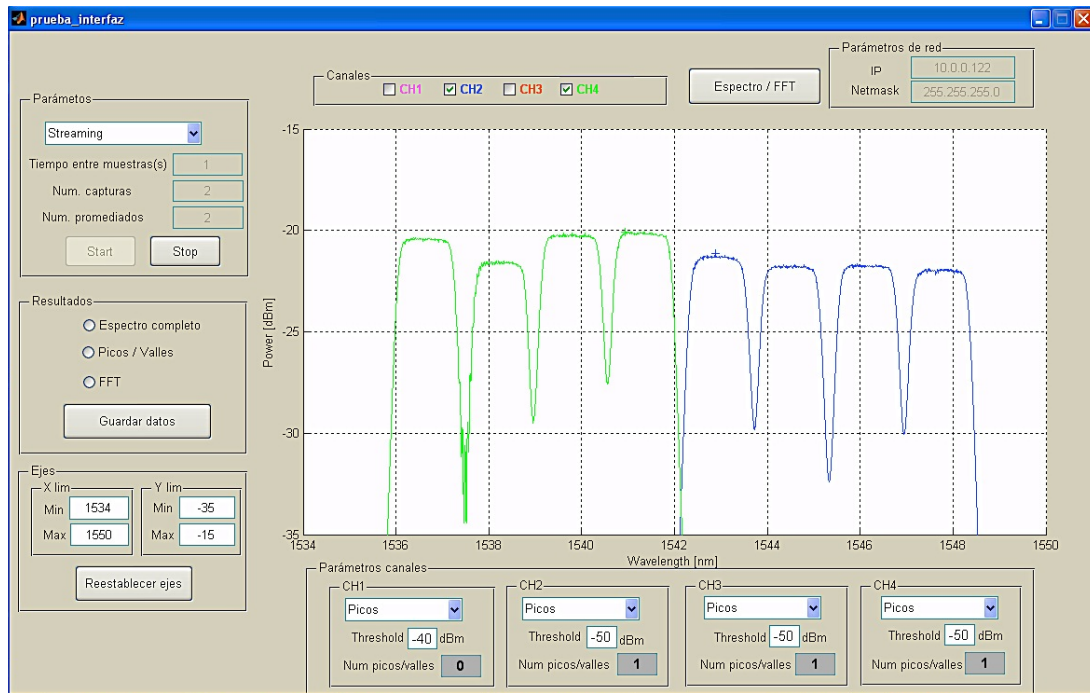


Figura 4.8 – Espectro de los canales WDM visto con el software desarrollado para el interrogador de sensores FBG.

Una vez se ha comprobado que el espectro del WDM es prácticamente plano, se fabricaron los sensores de cristal fotónico. Estos consisten en aproximadamente 1.5 m de fibra PCF altamente birrefringente (HiBi) colocada en el interior de una estructura tipo Sagnac (véase la Figura 4.9).

La red esta formada por siete sensores que se conectan al WDM de ocho canales. El canal restante se utilizó como referencia mediante el uso de un FBG que refleje un valor de potencia constante. Este permite corregir los valores de potencia obtenidos en el resto de sensores en caso de existir alguna variación de potencia del sistema.

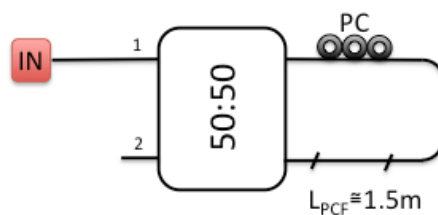


Figura 4.9 - Estructura esquemática del sensor interferométrico PCF

Para simular esta red, en lugar de fabricar los siete sensores debido al alto coste material, se utilizó un único sensor que se intercambiaba entre los diferentes canales del

WDM, a excepción del octavo que, como se ha dicho anteriormente, estará ocupado por el FBG de referencia. En la Figura 4.10 se muestra el caso en el que el sensor se encuentra situado en el séptimo canal del WDM. La misma operación se repetirá de manera análoga para el resto de canales. Aunque se dispone de un único sensor, la estructura compuesta por los dos acopladores 2x4 simula una reflexión constante producida por el resto de sensores.

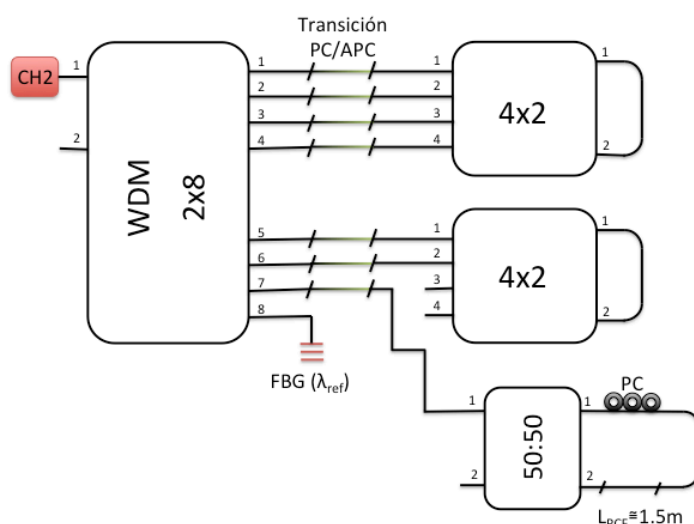


Figura 4.10 - Esquema de la red de sensores interferométricos cuando el sensor de test esta situado en el canal 7 del WDM

El principio de funcionamiento de los sensores interferométricos es como sigue. Cuando la fibra es sometida a deformaciones la birrefringencia de la fibra varia, por tanto la fase. Como se ha visto en el capítulo 1, la interferencia entonces se desplaza en longitud de onda. Como cada uno de los sensores se ilumina por una longitud de onda fija creada por el laser conmutable, el desplazamiento de esta interferencia envolvente modula la intensidad reflejada de cada uno de los sensores de manera proporcional a la deformación ejercida. Este comportamiento se puede observar gráficamente en la Figura 4.11, donde la curva representada con color negro muestra la interferencia en el estado inicial, es decir, sin ser sometida a estiramiento. El resto de curvas representan la interferencia inicial sometida a diferentes tensiones, de forma que cuanto mayor es la tensión aplicada mayor es el desplazamiento en longitud de onda provocado. Por lo tanto, si centramos cada una de las líneas de emisión de los sensores en la parte lineal de la interferencia, esta será modulada proporcionalmente.

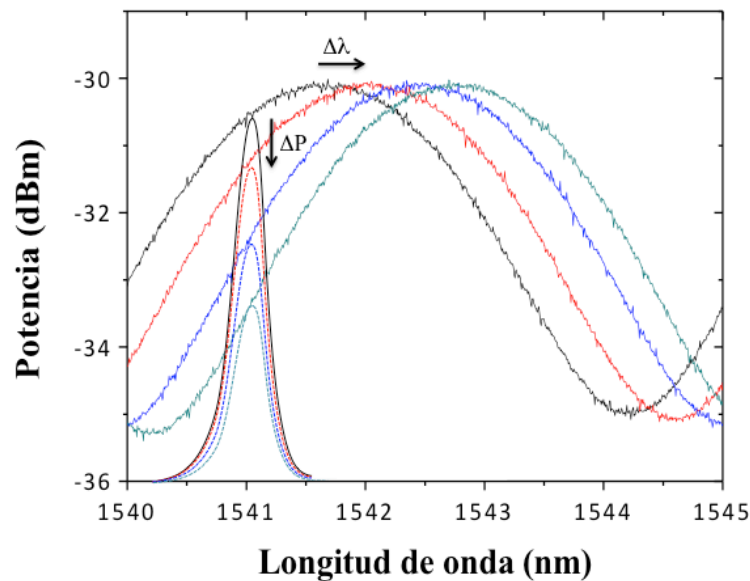


Figura 4.11 - Variación de fase del espectro de la interferencia de un sensor en longitud de onda al ser sometida a deformación y como afecta a la potencia de una longitud de onda fija que interroga la estructura.

Debido a que la interferencia presenta una forma equivalente al coseno cuadrado, en esta existe una pendiente de bajada y una de subida. Por ello se debe establecer un rango de medida para el sensor, bien sea en la pendiente de subida o en la de bajada.

iii. Proceso de selección de la red de sensores

En la Figura 4.12 se muestra como ambas subredes se encuentran conectadas a un conmutador remoto de fibra óptica alimentado por luz (RFOSw) [7]. Para alimentarlo se utiliza una célula fotovoltaica (PPC) que transforma 125 mW del excedente de bombeo Raman en 35mW de potencia eléctrica. El residuo del bombeo Raman se recoge del espejo distribuido mediante un WDM 1445/1550 y se atenúa debido a que este es superior a los 125 mW necesarios y puede dañar el PPC.

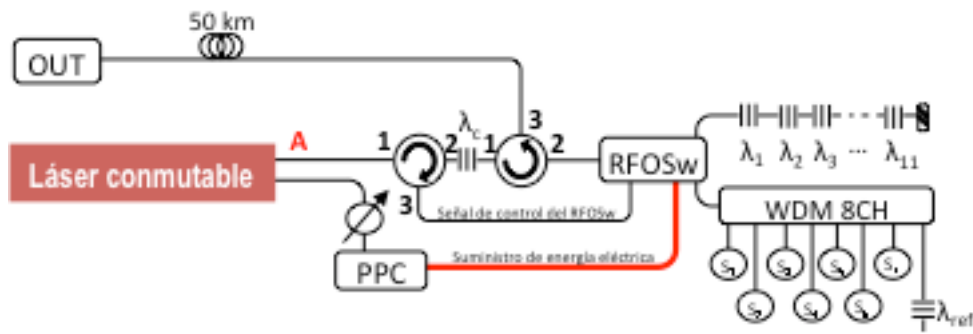


Figura 4.12 Representación esquemática del bloque correspondiente a las redes de sensores.

Asimismo, el RFOSw es el encargado de seleccionar de forma alternativa cada una de las subredes, haciendo uso de una señal de control la cual es filtrada por el FBG λ_c y es recirculada por puerto 3 del primer circulador como se muestra en la Figura 4.12. De esta forma cuando la señal este activa (ON) se selecciona la red de sensores PCF, en caso contrario, se selecciona la red de FBGs.

El espectro del láser para interrogar esta red de sensores PCF se muestra en la Figura 4.13. Para este caso, el espectro de emisión enviado esta constituido por ocho líneas de emisión donde cada una de ellas corresponde a uno de los ocho canales del WDM y una novena separada de ellas que corresponde con la señal de control situada en 1554.13 nm y coincide con la longitud de onda de operación del FBG de control λ_c .

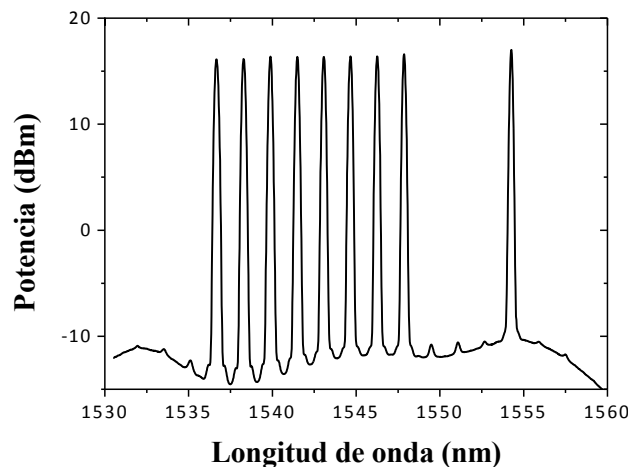


Figura 4.13 - a) Configuración del MWFL para la interrogación de la red de sensores PCF de intensidad..

Cuando la señal de control está desactivada el conmutador selecciona la red de sensores FBG. En este caso, el láser conmutable realiza un barrido en longitud de onda con una resolución de 0.1 nm. Cuando la longitud de onda de emisión corresponde con la longitud de onda de Bragg de cada uno de los once FBGs posibles, se obtendrá una reflexión medida en el OSA. La Figura 4.14 representa varias líneas de emisión de un barrido del laser.

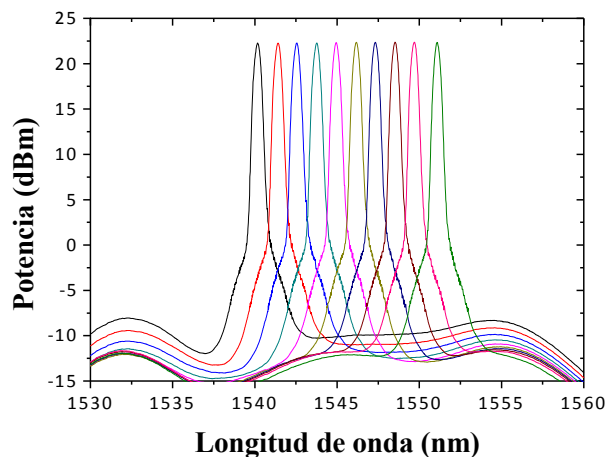


Figura 4.14 – Composición del barrido en longitud de onda para una única línea de emisión

Como puede verse en la Figura 4.12 la salida del láser multi-línea se conecta a través del puerto “A” a la red de sensores. El segundo circulador tiene como objetivo iluminar el RFOSw y recoger la información del sensor dirigiéndola a través del carrete de 50 km de fibra hacia la salida del sistema. El carrete de 50 km de retorno, en paralelo con los 50 km del espejo distribuido, hacen de esta propuesta un sistema un remoto, donde la cabecera activa de control está situada a 50 km de la red de sensores que, a su vez, no requiere alimentación eléctrica adicional.

4.3 Resultados

La Figura 4.15 y la Figura 4.16 muestran la caracterización de los sensores para cada una de las redes. La Figura 4.15 a) muestra el comportamiento de dos sensores de intensidad mientras el primero se mantiene estable. Los resultados confirman el correcto

funcionamiento de la red de multiplexación y una operación libre de diafonías (*crosstalk*). Para comprobar si los sensores son independientes y no hay diafonía entre ellos se deja uno sin estresar mientras el resto es sometido a deformación. En la Figura 4.15 a) se observa como el sensor 1 se encuentra estable mientras los sensores 2 y 3 están siendo sometidos a deformación quedando demostrada la independencia entre ellos.

En la Figura 4.15 b) se representa la respuesta del sensor cuando es sometido a una prueba de rotura para obtener el rango de medida máximo para estos sensores. En este caso se observa como la modulación de intensidad del láser reconstruye el patrón de interferencia.

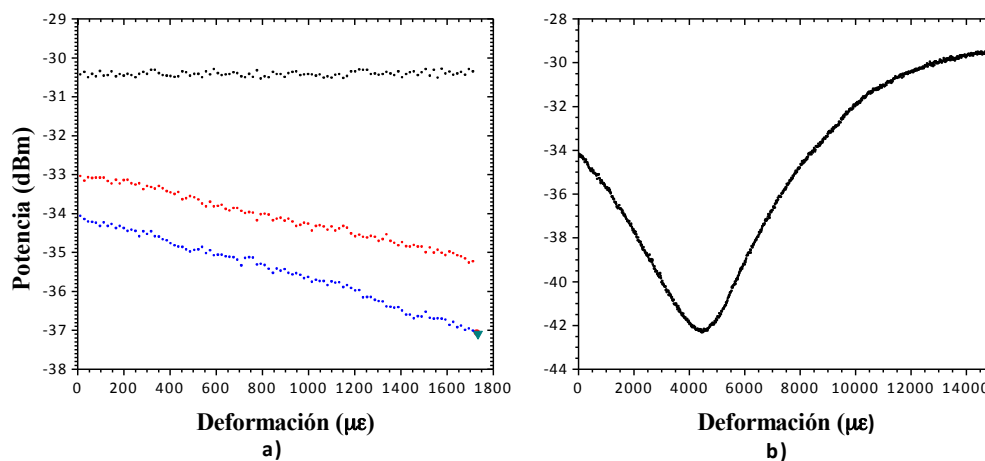


Figura 4.15 – a) Comportamiento de dos sensores PCF de intensidad cuando el primero no está sometido a tensión.
 b) Respuesta del sensor.

Finalmente, los resultados obtenidos para la red de sensores FBG se muestran en la Figura 4.16 que ilustra la reconstrucción de la respuesta de la red de FBG después del barrido del láser, mostrando el resultado de mayor intensidad obtenido para cada sensor FBG.

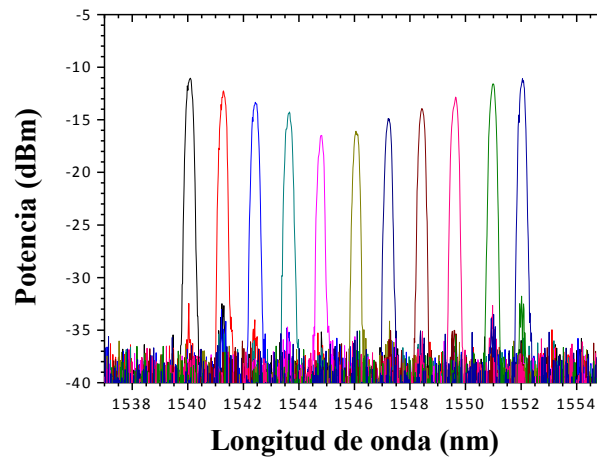


Figura 4.16 - Reconstrucción de la respuesta de la red de sensores FBG

4.4 Conclusiones

Se ha desarrollado y demostrado experimentalmente una nueva técnica de interrogación de sensores mediante un láser de fibra multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real. Queda demostrado el potencial de la estructura láser para crear diferentes configuraciones con una gran estabilidad, gran ancho de banda ancha y alta potencia de salida (~15-20dBm). Por otro lado, el MWFL propuesto parece encajar en aplicaciones de comunicaciones ópticas así como en la interrogación de redes multiplexadas de sensores de fibra óptica como se ha demostrado. También se ha demostrado el funcionamiento remoto del sistema a 50 km de distancia como una unidad de interrogación para diferentes tecnologías de sensores de fibra óptica como son:

- Sensores basados en la modulación de intensidad: En este caso se han utilizado siete interferómetros Sagnac con fibra de cristal fotónico.
- Sensores basados en modulación de longitud de onda: Se ha demostrado el correcto funcionamiento del sistema utilizando 11 FBG.

Por otro lado, esta técnica permite la multiplexación de tantas redes de sensores como puertos de salida tenga el switch óptico remoto. Como la señal de control ha sido generada por el MWFL conmutable el cambio de espectro láser implica también la selección de puerto RFOSw. Debido a la utilización del bombeo residual Raman para la

alimentación del conmutador óptico, es posible la interrogación remota del sistema a larga distancia, al no requerirse alimentación *in situ* para la conmutación, ni para la red de sensores.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Durante este proyecto “Desarrollo en MATLAB de un software para el interrogador SM125 de redes de difracción de Bragg en fibra y aplicación en redes de sensores de fibra óptica”, se distinguen dos partes bien diferenciadas. La primera, consiste en el desarrollo de dos programas en MATLAB y la segunda, aplicación del *software* para diferentes redes de multiplexación de sensores en fibra.

En primer lugar, se ha desarrollado un *software* en MATLAB para controlar el dispositivo comercial de interrogación de sensores en fibra, SM125 de Micron Optics. Este programa permite la captura y representación de datos en tiempo real así como el almacenamiento de las trazas recibidas para un posible post-procesado. También se han implementado nuevas funciones de procesado como son el promediado y la transformada rápida de Fourier (FFT) en tiempo real. Con estas nuevas características se mejoran las prestaciones que presenta el software de fábrica, desarrollado en LabView. De esta se consigue ampliar la funcionalidad de un dispositivo que en un principio estaba enfocado a la interrogación de estructuras basadas en redes de difracción de Bragg. Por tanto, gracias a estas opciones, el interrogador SM125 puede utilizarse de manera sencilla para otro tipo de aplicaciones como la interrogación de otro tipo de estructuras de multiplexación de sensores, como por ejemplo los interferométricos.

A continuación se implementó un software para el control de los micro-posicionadores de Ealing. Este puede actuar como programa independiente o como parte del programa desarrollado para el interrogador, de manera que al utilizarlo en paralelo con este programa se puede estudiar el comportamiento de los sensores cuando estos son sometidos a deformación, con una precisión de nanómetros .

Sin embargo, pese a todas las mejoras implementadas, existen ciertas líneas de futura mejora:

- El interrogador presenta una función de transferencia que no es plana en todo el espectro, por lo que, tras caracterizarse podría corregirse para mejorar la respuesta.
- Para la interfaz del interrogador, sería interesante implementar una función que permita la detección de picos de magnitud de la FFT, pudiendo realizar un seguimiento en tiempo real de la fase.

- En el caso de la interfaz de control de los micro-posicionadores, actualmente es necesario ejecutar el software de fábrica para cargar los parámetros iniciales que permiten el movimiento de los micro-posicionadores. En un futuro aumentaría la simplicidad de uso la carga automática de estos parámetros por el propio programa.

Adicionalmente, una vez desarrollado el *software* se ha comprobado su correcto funcionamiento en dos aplicaciones prácticas.

Para la primera se fabricaron cinco sensores interferométricos de fibra de cristal fotónico altamente birrefringente dispuestos en estructura Sagnac. Este tipo de sensores presentan una gran dificultad a la hora de ser multiplexados ya que las respuestas cosenoidales de cada interferómetro se suman en el espectro óptico, resultando indistinguibles. Durante esta parte, se han desarrollado dos nuevas estructuras de multiplexación de sensores interferométricos de PCF, una de ellas conectando cuatro sensores Sagnac en paralelo y la otra se conectando dos secciones de fibra PCF en serie en un mismo interferómetro. Se ha estudiado el comportamiento de estas estructuras, al ser sometidos los sensores a deformación, utilizando los micro-posicionadores. De esta manera se han medido la respuesta de los sensores mediante el uso de una técnica poco extendida como es la FFT. Más concretamente utilizando la información presente en la fase de la FFT. Una de las principales ventajas de utilizar la FFT como técnica de caracterización de sensores interferométricos es que no existe una dependencia entre la magnitud de la interferencia y la fase, que es donde se encuentra la información. Además, el uso de la FFT permite un seguimiento más preciso del sensor que el método tradicional, que consiste en seguir la variación de la longitud de onda en un máximo o mínimo de la interferencia.. Sin embargo, con el uso de la FFT la resolución es mayor debido a que simplemente se tiene que monitorizar la variación de la fase en la frecuencia característica de cada sensor. Como resultado se ha obtenido que la fase sigue un comportamiento lineal (valores de R^2 próximos a 1) en función de la deformación para ambas configuraciones.

Cabe destacar que es la primera vez que se interrogan sensores para este tipo de estructuras de multiplexación de interferómetros en tiempo real. En estudios anteriores de uso de la FFT para interrogación de este tipo de sensores se realizaba mediante post-

procesado. Los resultados generados en este estudio han sido recogidos en el artículo “*Real-Time FFT analysis for interferometric sensors multiplexing*” que ha sido enviado para su publicación a la revista “*Journal Lightwave Technology*”.

De esta forma queda un campo abierto para futuras líneas de investigación:

- Debido a la existencia de batidos secundarios de los interferómetros en la magnitud de la FFT, sería interesante realizar un estudio del número máximo de sensores posibles que pueden ser multiplexados al mismo tiempo. Se debería tener en cuenta la potencia así como que las longitudes de los sensores no pueden ser múltiplos enteros entre sí. En caso de ser así los batidos principales de estos se situarían sobre batidos secundarios de otros sensores y por lo tanto podría existir *crosstalk*.
- Ampliar a tres el número de sensores dispuestos en serie. Realizando un estudio de las todas posibles combinaciones de las componentes frecuenciales que pueden aparecer en la FFT.
- La multiplexación de sensores interferométricos PCF en reflexión, en el que se dispondrían un número determinado de sensores en serie colocando al final de la red un espejo para formar un interferómetro.

En cuanto a la segunda verificación práctica del programa, se caracterizaron dos redes de sensores con el interrogador SM125. Una compuesta por once sensores FBG multiplexados en serie y la otra una red de sensores interferométricos multiplexada en longitud de onda. Ambas redes fueron interrogadas de forma novedosa mediante la utilización de un láser de fibra multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real desarrollado por el grupo de comunicaciones ópticas. Este estudio ha sido recogido en el artículo “*Fully switchable multi-wavelength fiber laser based interrogator system for remote and versatile fiber optic sensors multiplexing structures*”, presentado en el “*23th International Conference on Optical Fibre Sensors*”. Adicionalmente se está preparando una versión extendida que será publicada en la revista “*Journal Lightwave Technology*”.

MATERIAL UTILIZADO

Interrogador de redes de difracción de Bragg (FBG)



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

Servo Motor Control Module EncoderDriver™



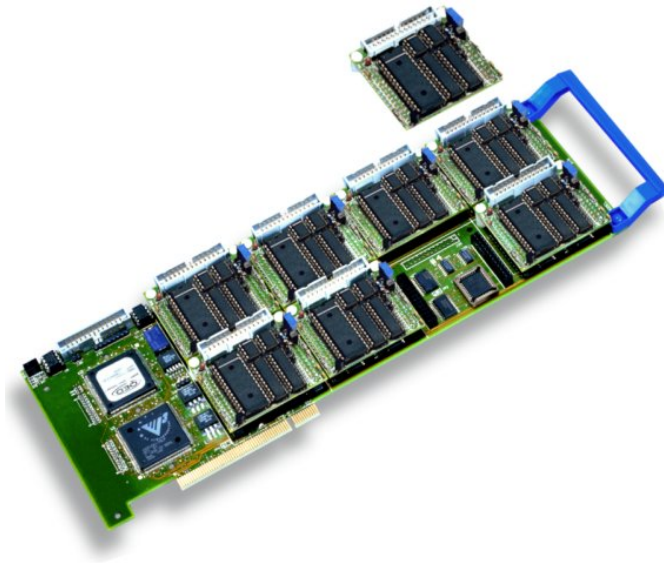
MARCA PMC

MODELO DCX-MC110

ESPECIFICACIONES

<i>Modos de operación</i>	Posición, Velocidad
<i>Filtro de control</i>	3.3KHz PID, precisión de 32bit
<i>Perfiles de velocidad</i>	Trapezoidal
<i>Salida</i>	+12V @500mA, 8-bit
<i>Posición Feedback</i>	0.1
<i>Alimentación del codificador</i>	+5 o +12 VDC
<i>Entradas del codificador</i>	Diferencial 7 hasta +7 VDC) o TTL
<i>Entradas (TTL)</i>	Limites +/-
<i>Salida (TTL)</i>	Amplificador habilitado

Tarjeta de control EncoderDriver™



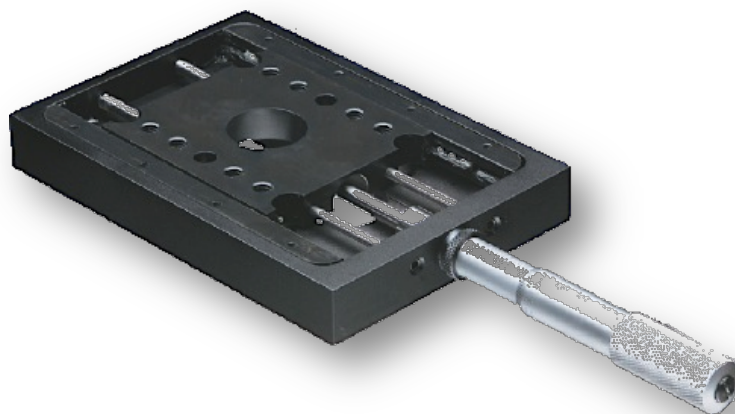
MARCA PMC

MODELO DCX-PCI110

ESPECIFICACIONES

<i>Capacidad de operación</i>	1-8 Encoder Drivers
<i>Corriente máxima motor</i>	500mA
<i>Entrada del codificador</i>	TTL
<i>Interfaz</i>	IBM PC PCI
<i>Apertura numérica</i>	0.1
<i>Voltaje de operación</i>	+5V 200mA +12V 50mA +corriente del motor +12V 50mA

Micro-posicionador de línea



MARCA Ealing
MODELO 61-0329

ESPECIFICACIONES

<i>Rango de medida</i>	50mm
<i>Precisión de seguimiento</i>	4 μm
<i>Precisión de lectura</i>	10 μm
<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

Actuador Lineal EncoderDriver™



MARCA Ealing
MODELO 37-9693

ESPECIFICACIONES

<i>Capacidad de operación</i>	0.5
<i>Velocidad max. Motor (rpm)</i>	12.000
<i>Relación de cabezal de engranajes</i>	485:1
<i>Velocidad lineal máxima (mm/min)</i>	12
<i>Velocidad mínima (mm/min)</i>	0.03
<i>Resolución (µm)</i>	0.02
<i>Voltaje nominal del motor(VDC)</i>	12
<i>Potencia máxima de salida(W)</i>	0.3
<i>Carga axial máx. recomendada(kg)</i>	10
<i>Reacción</i>	6
<i>Número de vueltas por revolución</i>	60
<i>Número de vueltas por mm viajado</i>	58.200
<i>Repetitividad unidireccional (µm)</i>	0.1
<i>Peso(g)</i>	50

Láser Raman



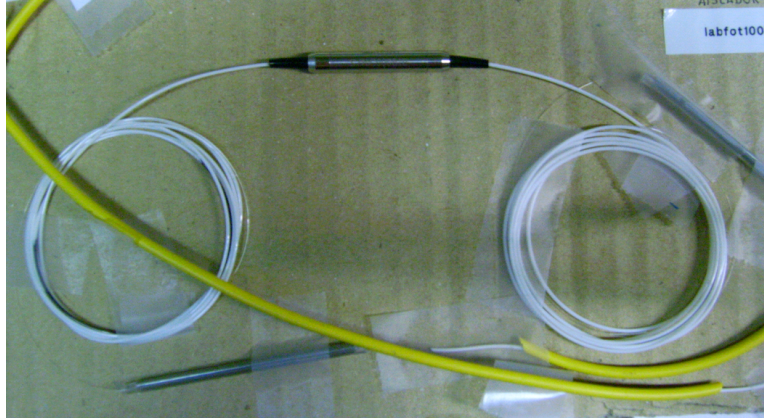
MARCA IPG Fibertech

MODELO RLD-3K-1445

ESPECIFICACIONES

<i>Modo de operación</i>	CW
<i>Polarización</i>	Aleatoria
<i>Longitud de onda de emisión</i>	1445 nm
<i>Potencia máxima</i>	3.2 W
<i>Ancho espectral 3dB</i>	0.5 nm (min), 2.5 nm (máx)
<i>Supresión de lóbulo lateral</i>	45dB

Aislador Raman



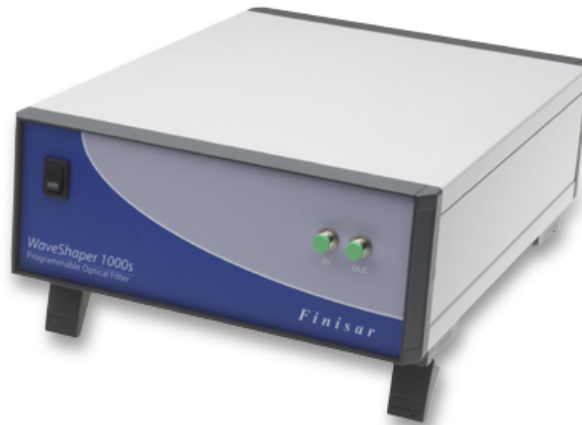
Este aislador, aunque no se ha incluido en el esquema del montaje está situado siempre a la salida del láser Raman para evitar que por error una señal pueda regresar reflejada al láser, pudiendo dañarlo.

MARCA OPNETI

ESPECIFICACIONES

<i>Pérdidas de inserción de -5°C a 70°C</i>	0.5dB
<i>Aislamiento a 23°C</i>	28dB
<i>Max potencia óptica</i>	4W

WaveShaper



MARCA Finisar

MODELO 1000S

ESPECIFICACIONES

Model		1000S	1000S/L	1000S/X
Operating Frequency Range		191.250 THz to 196.275 THz (1527.4 nm to 1567.5 nm)	186.35 THz to 191.0 THz (1569.6 nm - 1608.7 nm)	187.275 THz to 196.275 THz (1527.4 nm - 1600.8 nm)
Loss and Dispersion (Note 2)	Insertion Loss (incl. connectors)	6.5 dB (typ. 4.5 dB)		
	Insertion Loss Non-Uniformity	0.7 dB (typ. 0.5 dB)	0.7 dB (typ. 0.5 dB) (Note 1)	1 dB (typ.)
	Polarization Dependent Loss (PDL)	0.7 dB (typ. 0.2 dB)		1 dB (typ.)
	Return Loss	> 25 dB		
	Group Delay Ripple	< ± 0.75 ps		
	First-Order PMD (DGD)	< 0.5 ps (typ. < 0.25 ps)		
Filter Control (Note 2)	Chromatic Dispersion	< ±10 ps/nm		
	Filter Shape	Arbitrary		
	Filter Bandwidth	10 GHz to 5 THz	10 GHz to 4.65 THz	20 GHz to 9 THz
	Center Frequency Setting Resolution	1 GHz (8 pm)		
	Center Frequency Setting Accuracy	± 2.5 GHz		± 5 GHz
	Bandwidth Setting Resolution	1 GHz (8 pm)		
	Bandwidth Setting Accuracy	± 5 GHz		± 10 GHz
	Bandwidth Setting Repeatability	± 2.5 GHz		
	Group Delay Control Range	- 25 ps to + 25 ps		- 15 ps to + 15 ps
	Settling Time	500 ms		
Attenuation Control	Attenuation Control Range	0 - 35 dB		
	Attenuation Setting Resolution	0.01 dB		
	Attenuation Setting Accuracy	±1.0 dB from 0-10 dB, ±10 % from 10-30 dB		
Mechanical, Electrical and Environmental	Maximum Total Input Optical Power	+ 27 dBm		
	Max Optical Power per 50 GHz channel	+ 13 dBm		
	Port Configuration	1 x 1, bidirectional		
	Operating Temperature	15 °C to 35 °C		
	Operating Humidity	10 % to 90 %		
	Operating Voltage	100 V to 240 V		
	Power Consumption	< 50 VA		
	Communications Interface	USB 2.0		
	Connector Type	FC/APC, FC/UPC		
	Size	241 x 88 x 316 mm ³ (Rack Mount units: 269 x 88 x 316 mm ³)		
Weight	3.8 kg			

Notes: 1. Specification is valid over the Frequency Range of 187.0 to 191.0 THz. From 186.35 to 187.0 THz the Insertion Loss Non-Uniformity is <1.0 dB max.
 2. Measured over 60 GHz passband on a 100 GHz flat-top filter unless specified.

Amplificador de fibra dopada con Erbio (EDFA)



MARCA MPB
MODELO P21

ESPECIFICACIONES

<i>Rango típico de operación</i>	1525-1565nm
<i>Saturación potencia de salida</i>	>26 dBm

- Aislador de entrada y salida.
- Baja figura de ruido.

Fusionadora de fibra óptica



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

Redes de difracción de Bragg (FBGs)



MARCA oeMARKET

ESPECIFICACIONES

<i>Longitud de onda de central</i>	1530-1560nm
<i>Ancho de banda 3dB</i>	0.1-0.5nm
<i>Precisión de la longitud de onda central</i>	+/-0.3nm
<i>Reflectividad</i>	0.05_0.95
<i>Pérdidas de inserción</i>	0.1-0.2dB

WDM 8 canales



MARCA AFOP
MODELO 200G-MUX

ESPECIFICACIONES

<i>Longitud de onda de operación)</i>	1528-1563nm
<i>Directividad</i>	>55dB
<i>Pérdidas de retorno</i>	>50dB
<i>Máxima potencia óptica</i>	< 5 dB
<i>Temperatura de operación</i>	-40°C hasta 75°C

Acoplador 50:50



MARCA TELNET

MODELO WIC 2x2

ESPECIFICACIONES

Puerto 1

PA (50%)

3.56dB

PB (50%)

3.57dB

Puerto 2

PB (50%)

3.67dB

PA (50%)

3.33dB

Estabilidad con la polarización

<0.15dB

Directividad

>55dB

Pérdidas de inserción

Atenuador variable

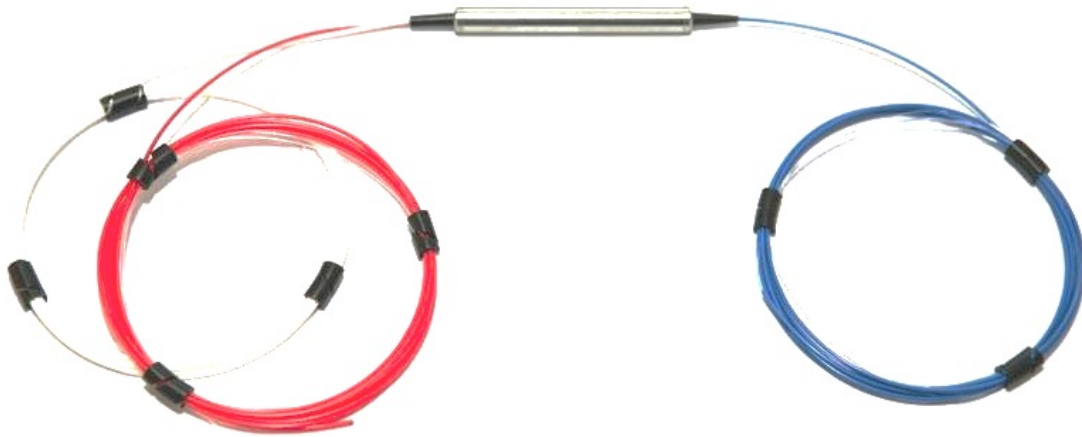


MARCA TELNET

ESPECIFICACIONES

<i>Longitud de onda de operación</i>	1.310 nm / 1.550 nm
<i>Rango de atenuación</i>	> 35 dB
<i>Resolución</i>	0.01dB < x < 0.25 dB
<i>Pérdidas de retorno</i>	< -70 dB o según conectorización
<i>Pérdidas de inserción</i>	< 0.75 dB (sin conectorizar)
<i>Temperatura de operación</i>	-40 °C a -80 °C

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

Fibra de cristal fotónico HiBi (PCF)



Crystal Fibre • aeroLASE • Koheras • SuperK

PM-1550

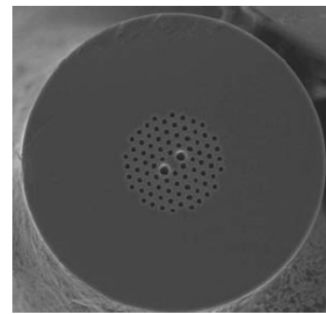
Single mode polarization-maintaining fiber with short beat length



- Low loss fiber from 600 to 1700 nm
- Single mode at all wavelengths
- Polarization Maintaining
- Radiation hard pure silica fiber
- Wavelength independent MFD

The Pm-1550 has a strong form-birefringence and is optimized to create a short beat length between the polarizations.

Furthermore it has reduced bend-induced coupling between polarization states, an improved polarization extinction ratio, and is 30 times less temperature sensitive than conventional Hi-Bi fiber.

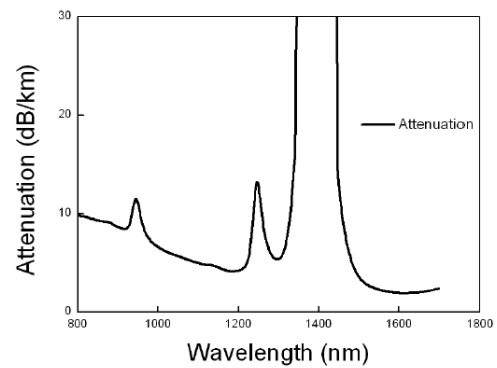


Applications

- Sensors
- Gyroscopes
- Interferometers

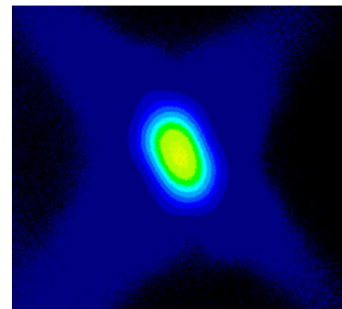
Optical properties at 1550 nm	
Single mode	Yes
Attenuation	< 2 dB/km
Mode field diameter (1/e ²)	6.8/4.3 ± 0.5 μm
Mode field ellipticity	1.5
Beat length (typical)	< 4 mm
DGD	2.25 ± 0.25 ns /km
PER	> 18dB
Chromatic dispersion	55 ± 5 ps/nm/km

Typical spectral attenuation



Physical properties	
Core diameter	6.6/4.3 ± 0.5 μm
Outer cladding diameter, OD	125 ± 5 μm
Coating diameter	230 ± 10 μm
Core and cladding material	Pure silica
Coating material, single layer	Acrylate
Coating concentricity	< 10 μm
Proof test level	0.33 %

Near field image



PM-1550-120402

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	6	9.000
Asesor Doctor	600	6	3.600

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	9.000	4.860	13.860
Asesor Doctor	6.000	3.240	9.240
			23.100 €

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	6	2.500
OSA Advantest Q8384	278	6	1.668
Láser Raman IPG RLD-3-1445	280	1	280
Micro-posicionador PMC	48	2	96
Encoder Driver Linear actuator	138	2	276
Encoder Driver Control Card	170	1	170
Fusionadora Fitel s175 v2000	350	1	350
WaveShaper Finisar 1000S	200	1	200
EDFA MPB P21	270	3	810
Carrete 50 km SMF	100	2	200
			6.550 €

Material adquirido

Este es el detalle el material adquirido.

Equipo	Coste (€)	Cantidad	TOTAL (€)
Aislador Raman OPNETI	1500	1	1.500
Circulador LZX CR-3-145	480	3	1.440
WDM 1445/1550 Comcore	45	1	45
WDM 8CH	586	1	586
Acopladores 50:50 Telnet	30	2	60
FBG sintonizable AOS	205	1	205
FBG	100	11	1100
PCF HiBi NKT Photonics	50	5	250
Control de polarización	170	4	680
Atenuador variable	100	1	100
			5.966€

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	23.100 €
Material alquilado	6.550 €
Material adquirido	5.966 €
Presupuesto de ejecución	35.616 €
Beneficio industrial (10%)	3.562 €
Presupuesto sin IVA	39.178 €
IVA (21%)	8.227 €
TOTAL	47.405 €

Por tanto el coste final del proyecto asciende a un total de cuarenta y siete mil cuatrocientos cinco euros.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Ortigosa-Blanch, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, J. Arriaga, B. J. Mangan, T. A. Birks, and P. S. J. Russell, “Highly birefringent photonic crystal fibers,” *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 18, pp. 1325–1327, Sep. 2000.
- [2] J. C. Knight, J. Broeng, T. A. Birks, and P. S. J. Russell, “Photonic Band Gap Guidance in Optical Fibers,” *Science*, vol. 282, no. 5393, pp. 1476–1478, Nov. 1998.
- [3] B. Lee, “Review of the present status of optical fiber sensors,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 57–79, Apr. 2003.
- [4] 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.
- [5] B. Culshaw, “Optical Fiber Sensor Technologies: Opportunities and - Perhaps - Pitfalls,” *J. Light. Technol.*, vol. 22, no. 1, p. 39, Jan. 2004.
- [6] K. O. Hill and G. Meltz, “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview,” *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1263–1276, 1997.
- [7] A. Othonos, “Fiber bragg gratings,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 68, no. 12, pp. 4309–4341, 1997.
- [8] A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick, M. LeBlanc, K. P. Koo, C. G. Askins, M. A. Putnam, and E. J. Friebele, “Fiber grating sensors,” *J. Light. Technol.*, vol. 15, no. 8, pp. 1442–1463, 1997.
- [9] Y.-J. Rao, “Fiber Bragg grating sensors: principles and applications,” in *Optical Fiber Sensor Technology*, K. T. V. Grattan and B. T. Meggitt, Eds. Springer US, 1998, pp. 355–379.
- [10] X. Shu, Y. Liu, D. Zhao, B. Gwandu, F. Floreani, L. Zhang, and I. Bennion, “Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement,” *Opt. Lett.*, vol. 27, no. 9, pp. 701–703, May 2002.
- [11] J. L. Santos, O. Frazão, J. M. Baptista, P. A. S. Jorge, I. Dias, F. M. Araújo, and L. A. Ferreira, “Optical Fibre Sensing Networks,” 2009.
- [12] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, *Fiber Optic Sensors, Second Edition*. CRC Press, 2008.
- [13] Y. Zhao and Y. Liao, “Discrimination methods and demodulation techniques for fiber Bragg grating sensors,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 1–18, Jan. 2004.

- [14] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta, and D. K. Bhattacharya, “Fibre Bragg gratings in structural health monitoring—Present status and applications,” *Sens. Actuators Phys.*, vol. 147, no. 1, pp. 150–164, Sep. 2008.
- [15] MICRON OPTICS, *User Guide Optical sensing Instrumentation & Software|ENLIGHT*. 2012.
- [16] X. Fang, H. Ji, C. T. Allen, K. Demarest, and L. Pelz, “A compound high-order polarization-independent birefringence filter using Sagnac interferometers,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 458–460, Apr. 1997.
- [17] A. M. R. Pinto, M. Bravo, M. Fernandez-Vallejo, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, and K. Schuster, “Suspended-core fiber Sagnac combined dual-random mirror Raman fiber laser,” *Opt. Express*, vol. 19, no. 12, pp. 11906–11915, Jun. 2011.
- [18] M. Bravo, A. M. R. Pinto, M. Lopez-Amo, J. Kobelke, and K. Schuster, “High precision micro-displacement fiber sensor through a suspended-core Sagnac interferometer,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 2, pp. 202–204, 2012.
- [19] O. Frazão, J. M. T. Baptista, and J. L. Santos, “Recent Advances in High-Birefringence Fiber Loop Mirror,” *Sensors*, vol. 7, no. 11, pp. 2970–2983, Nov. 2007.
- [20] D. Barrera, J. Villatoro, V. P. Finazzi, G. A. Cárdenas-Sevilla, V. P. Minkovich, S. Sales, and V. Pruneri, “Low-Loss Photonic Crystal Fiber Interferometers for Sensor Networks,” *J. Light. Technol.*, vol. 28, no. 24, pp. 3542–3547, Dec. 2010.
- [21] B. Culshaw, “The optical fibre Sagnac interferometer: an overview of its principles and applications,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 1, p. R1, Jan. 2006.
- [22] D. B. Mortimore, “Fiber loop reflectors,” *J. Light. Technol.*, vol. 6, no. 7, pp. 1217–1224, Jul. 1988.
- [23] S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, D. V. Churkin, S. I. Kablukov, J. D. Ania-Castañón, V. Karalekas, and E. V. Podivilov, “Random distributed feedback fibre laser,” *Nat. Photonics*, vol. 4, no. 4, pp. 231–235, Apr. 2010.
- [24] E. Achaerandio, S. Jarabo, S. Abad, and M. Lopez-Amo, “New WDM amplified network for optical sensor multiplexing,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 12, pp. 1644–1646, Dec. 1999.
- [25] A. E. El-Taher, M. Alcon-Camas, S. A. Babin, P. Harper, J. D. Ania-Castañón, and S. K. Turitsyn, “Dual-wavelength, ultralong Raman laser with Rayleigh-scattering feedback,” *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 7, pp. 1100–1102, Apr. 2010.

- [26] R. A. Perez-Herrera, M. Fernandez-Vallejo, S. Diaz, M. Angeles Quintela, M. Lopez-Amo, and J. M. López-Higuera, “Stability comparison of two quadruple-wavelength switchable erbium-doped fiber lasers,” *Opt. Fiber Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 205–211, Aug. 2010.
- [27] M. Fernandez-Vallejo, M. Bravo, and M. Lopez-Amo, “Ultra-Long Laser Systems for Remote Fiber Bragg Gratings Arrays Interrogation,” *Photonics Technol. Lett. IEEE*, vol. 25, no. 14, pp. 1362–1364, 2013.
- [28] M. Fernandez-Vallejo, S. Rota-Rodrigo, and M. Lopez-Amo, “Remote (250 km) fiber Bragg grating multiplexing system,” *Sensors*, vol. 11, no. 9, pp. 8711–8720, 2011.
- [29] M. Bravo, M. A. Erro, J. M. Algueta, S. Diaz, and M. Lopez-Amo, “Remote fiber optic switch powered by light for robust interrogation of fiber Bragg grating sensor networks,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 24, no. 9, p. 094021, Sep. 2013.
- [30] V. DeMiguel-Soto, M. Bravo, and M. Lopez-Amo, “Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 7, p. 2020, Apr. 2014.

ANEXO A Estructura de la cadena de datos del interrogador SM125

Entry	Byte Offset	Atomic Size (bytes)	Total Size (bytes)	Description
Size of Main Header	0	4 (U32)	4	The size of the Main Header. In this version it is set to 20.
Protocol Version	4	4 (U32)	4	Current version of the definition of this response structure.
Number of DUTs	8	4 (U32)	4	Number of DUTs this response contains
Reserved	12	4 (U32)	4	Reserved for future use.
Counter	16	4 (U32)	4	A sequential counter for the data set that the instrument has processed internally.
Size of Sub Header 1	20	4 (U32)	4	The size of the Sub Header
Min Wavelength	24	4 (U32)	4	Wavelength of the first data point, multiplied by 10000. Default value is either 15100000 (1510.0 nm) or 15200000 (1520.0 nm).
Wavelength Increment	28	4 (U32)	4	Wavelength distance between each data point, multiplied by 10000. Default value is 50 (5 pm).
Number of Data Points (nPoints)	32	4 (U32)	4	Number of data points for this DUT. Default value is either 10001 or 16001.
DUT number	36	4 (U32)	4	The number of the DUT that this data belongs to (1 – 16).
Data	40	2 (U16)	2*nPoints	The actual data for each wavelength sampled. Every data point value is multiplied by 100.
Size of Sub Header 2	40 + 2*nPoints	4 (U32)	4	The size of the Sub Header
Min Wavelength	44 + 2*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength of the first data point, multiplied by 10000. Default value is either 15100000 (1510.0 nm) or 15200000 (1520.0 nm).
Wavelength Increment	48 + 2*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength distance between each data point, multiplied by 10000. Default value is 50 (5 pm).
Number of Data Points (nPoints)	52 + 2*nPoints	4 (U32)	4	Number of data points for this DUT. Default value is either 10001 or 16001.
DUT number	56 + 2*nPoints	4 (U32)	4	The number of the DUT that this data belongs to (1 – 16).
Data	60 + 2*nPoints	2 (U16)	2*nPoints	The actual data for each wavelength sampled. Every data point value is multiplied by 100.
Size of Sub Header 3	80 + 4*nPoints	4 (U32)	4	The size of the Sub Header
Min Wavelength	84 + 4*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength of the first data point, multiplied by 10000. Default value is either 15100000 (1510.0 nm) or 15200000 (1520.0 nm).
Wavelength Increment	88 + 4*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength distance between each data point, multiplied by 10000. Default value is 50 (5 pm).
Number of Data Points (nPoints)	92 + 4*nPoints	4 (U32)	4	Number of data points for this DUT. Default value is either 10001 or 16001.
DUT number	96 + 4*nPoints	4 (U32)	4	The number of the DUT that this data belongs to (1 – 16).
Data	100 + 4*nPoints	2 (U16)	2*nPoints	The actual data for each wavelength sampled. Every data point value is multiplied by 100.
Size of Sub Header 4	100 + 6*nPoints	4 (U32)	4	The size of the Sub Header
Min Wavelength	104 + 6*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength of the first data point, multiplied by 10000. Default value is either 15100000 (1510.0 nm) or 15200000 (1520.0 nm).
Wavelength Increment	108 + 6*nPoints	4 (U32)	4	Wavelength distance between each data point, multiplied by 10000. Default value is 50 (5 pm).
Number of Data Points (nPoints)	112 + 6*nPoints	4 (U32)	4	Number of data points for this DUT. Default value is either 10001 or 16001.
DUT number	116 + 6*nPoints	4 (U32)	4	The number of the DUT that this data belongs to (1 – 16).
Data	120 + 6*nPoints	2 (U16)	2*nPoints	The actual data for each wavelength sampled. Every data point value is multiplied by 100.

ANEXO B **Código de la función detección de picos**
(*peakfinder.m*)


```

function [peakInds,peakMags]= peakfinder(x0, sel, thresh, extrema)
%PEAKFINDER Noise tolerant fast peak finding algorithm
% INPUTS:
%   x0 - A real vector from the maxima will be found (required)
%   sel - The amount above surrounding data for a peak to be
%         identified (default = (max(x0)-min(x0))/4). Larger values mean
%         the algorithm is more selective in finding peaks.
%   thresh - A threshold value which peaks must be larger than to be
%            maxima or smaller than to be minima.
%   extrema - 1 if maxima are desired, -1 if minima are desired
%             (default = maxima, 1)
% OUTPUTS:
%   peakLoc - The indicies of the identified peaks in x0
%   peakMag - The magnitude of the identified peaks
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0) returns the indicies of local maxima that
% are at least 1/4 the range of the data above surrounding data.
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel) returns the indicies of local maxima
% that are at least sel above surrounding data.
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh) returns the indicies of local
% maxima that are at least sel above surrounding data and larger
% (smaller) than thresh if you are finding maxima (minima).
%
% [peakLoc] = peakfinder(x0,sel,thresh,extrema) returns the maxima of the
% data if extrema > 0 and the minima of the data if extrema < 0
%
% [peakLoc, peakMag] = peakfinder(x0,...) returns the indicies of the
% local maxima as well as the magnitudes of those maxima
%
% If called with no output the identified maxima will be plotted along
% with the input data.
%
% Note: If repeated values are found the first is identified as the peak
%
% Copyright Nathanael C. Yoder 2011 (nyoder@gmail.com)

% Perform error checking and set defaults if not passed in
error(nargchk(1,4,nargin,'struct'));
error(nargoutchk(0,2,nargout,'struct'));

s = size(x0);
flipData = s(1) < s(2);
len0 = numel(x0);
if len0 ~= s(1) && len0 ~= s(2)
    error('PEAKFINDER:Input','The input data must be a vector')
elseif isempty(x0)
    varargout = {[],[]};
    return;
end
if ~isreal(x0)
    warning('PEAKFINDER:NotReal','Absolute value of data will be used')
    x0 = abs(x0);
end

if nargin < 2 || isempty(sel)
    sel = (max(x0)-min(x0))/4;
elseif ~isnumeric(sel) || ~isreal(sel)
    sel = (max(x0)-min(x0))/4;
    warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
        'The selectivity must be a real scalar. A selectivity of %.4g will be
used',sel)
elseif numel(sel) > 1
    warning('PEAKFINDER:InvalidSel',...
        'The selectivity must be a scalar. The first selectivity value in the
vector will be used.')
    sel = sel(1);
end

```

```

if nargin < 3 || isempty(thresh)
    thresh = [];
elseif ~isnumeric(thresh) || ~isreal(thresh)
    thresh = [];
    warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
        'The threshold must be a real scalar. No threshold will be used.')
elseif numel(thresh) > 1
    thresh = thresh(1);
    warning('PEAKFINDER:InvalidThreshold',...
        'The threshold must be a scalar. The first threshold value in the vector
will be used.')
end

if nargin < 4 || isempty(extrema)
    extrema = 1;
else
    extrema = sign(extrema(1)); % Should only be 1 or -1 but make sure
    if extrema == 0
        error('PEAKFINDER:ZeroMaxima','Either 1 (for maxima) or -1 (for minima) must
be input for extrema');
    end
end

x0 = extrema*x0(:); % Make it so we are finding maxima regardless
thresh = thresh*extrema; % Adjust threshold according to extrema.
dx0 = diff(x0); % Find derivative
dx0(dx0 == 0) = -eps; % This is so we find the first of repeated values
ind = find(dx0(1:end-1).*dx0(2:end) < 0)+1; % Find where the derivative changes sign

% Include endpoints in potential peaks and valleys
x = [x0(1);x0(ind);x0(end)];
ind = [1;ind;len0];

% x only has the peaks, valleys, and endpoints
len = numel(x);
minMag = min(x);

if len > 2 % Function with peaks and valleys

    % Set initial parameters for loop
    tempMag = minMag;
    foundPeak = false;
    leftMin = minMag;

    % Deal with first point a little differently since tacked it on
    % Calculate the sign of the derivative since we tacked the first point
    % on it does not necessarily alternate like the rest.
    signDx = sign(diff(x(1:3)));
    if signDx(1) <= 0 % The first point is larger or equal to the second
        ii = 0;
        if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
            x(2) = [];
            ind(2) = [];
            len = len-1;
        end
    else % First point is smaller than the second
        ii = 1;
        if signDx(1) == signDx(2) % Want alternating signs
            x(1) = [];
            ind(1) = [];
            len = len-1;
        end
    end
end
% Preallocate max number of maxima
maxPeaks = ceil(len/2);
peakLoc = zeros(maxPeaks,1);
peakMag = zeros(maxPeaks,1);
cInd = 1;

```

```

% Loop through extrema which should be peaks and then valleys
while ii < len
    ii = ii+1; % This is a peak
    % Reset peak finding if we had a peak and the next peak is bigger
    % than the last or the left min was small enough to reset.
    if foundPeak
        tempMag = minMag;
        foundPeak = false;
    end
% Make sure we don't iterate past the length of our vector
    if ii == len
        break; % We assign the last point differently out of the loop
    end

    % Found new peak that was larger than temp mag and selectivity larger
    % than the minimum to its left.
    if x(ii) > tempMag && x(ii) > leftMin + sel
        tempLoc = ii;
        tempMag = x(ii);
    end

    ii = ii+1; % Move onto the valley
    % Come down at least sel from peak
    if ~foundPeak && tempMag > sel + x(ii)
        foundPeak = true; % We have found a peak
        leftMin = x(ii);
        peakLoc(cInd) = tempLoc; % Add peak to index
        peakMag(cInd) = tempMag;
        cInd = cInd+1;
    elseif x(ii) < leftMin % New left minima
        leftMin = x(ii);
    end
end

% Check end point
if x(end) > tempMag && x(end) > leftMin + sel
    peakLoc(cInd) = len;
    peakMag(cInd) = x(end);
    cInd = cInd + 1;
elseif ~foundPeak && tempMag > minMag % Check if we still need to add the last
point
    peakLoc(cInd) = tempLoc;
    peakMag(cInd) = tempMag;
    cInd = cInd + 1;
end

% Create output
peakInds = ind(peakLoc(1:cInd-1));
peakMags = peakMag(1:cInd-1);
else % This is a monotone function where an endpoint is the only peak
    [peakMags,xInd] = max(x);
    if peakMags > minMag + sel
        peakInds = ind(xInd);
    else
        peakMags = [];
        peakInds = [];
    end
end

% Apply threshold value. Since always finding maxima it will always be
% larger than the thresh.
if ~isempty(thresh)
    m = peakMags>thresh;
    peakInds = peakInds(m);
    peakMags = peakMags(m);
end
% Rotate data if needed
if flipData
    peakMags = peakMags.';
    peakInds = peakInds.';
end
end

```


**ANEXO C Resultados obtenidos para la estructura
de multiplexación en serie de sensores PCF para
las combinaciones 0.3 - 1m y 0.8 - 1.3m**

Sensores 0.8m y 1.3m

Para este montaje se han tomado como sensores el de longitud 0.8m y el de 1.3m, donde se considera que $L_1=0.8m$ y por lo tanto $L_2=1.3m$. En la Figura C.1 se presenta el espectro de la interferencia resultante.

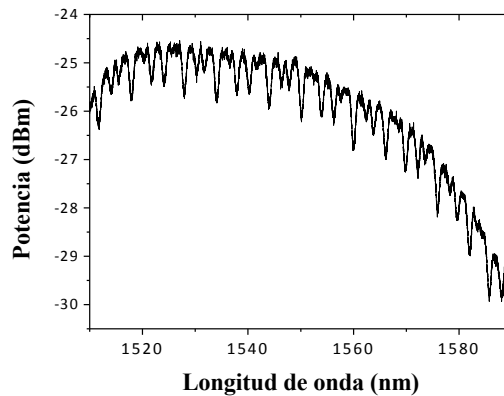


Figura C.1 - Representación del espectro en longitud de onda resultante para los interferómetros de longitud 0.8 y 1.3m.

La FFT tanto en magnitud como en fase se representa en la Figura C.2. Se puede observar la aparición de la componente frecuencial suma sin embargo se ha conseguido eliminar totalmente la componente resta.

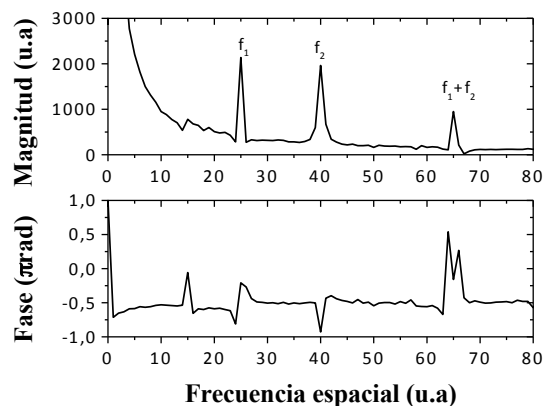


Figura C.2 - Representación de la magnitud y fase de la FFT para la interferencia resultante al situar los interferómetros de longitud 0.8 y 1.3m.

En la Tabla C.1 aparecen representados los valores de las frecuencias espaciales correspondientes a cada uno de los sensores y las componentes suma y resta de estas mismas.

f_1	f_2	$f_3=f_2-f_1$	$f_4=f_2+f_1$
25	40	15	65

Tabla C.1 - Componentes frecuenciales de la magnitud de la FFT para los sensores 0.8 y 1.3m en serie

Como se ha comentado anteriormente, el procedimiento de medida consiste en someter una de las dos secciones de fibra a deformación mientras la otra esta en estado normal. En la Figura C.3 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los sensores. Al igual que en el caso anterior, se obtiene como la variación de fase para el caso de f_2+f_1 corresponde a la suma de las variaciones de fase del sensor de longitud L_1 mas las variaciones de fase que se encuentran en el sensor de longitud L_2 .

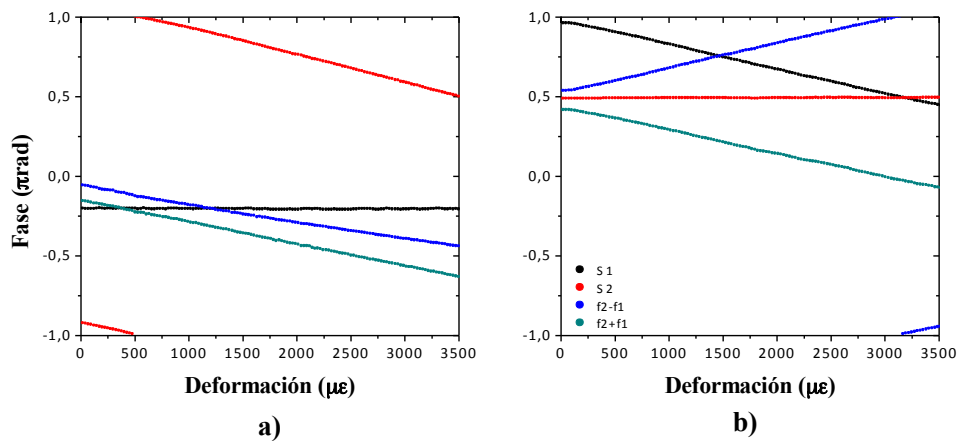


Figura C.3 - Resultado obtenido para las variaciones de fase de la FFT en función de la deformación cuando a) el sensor S1 está sometido a deformación (0.8m) y b) el sensor S2 (1.3m).

En la Figura C.4 están representadas las variaciones de fase en función de la deformación cuando ambos interferómetros están actuando como sensores.

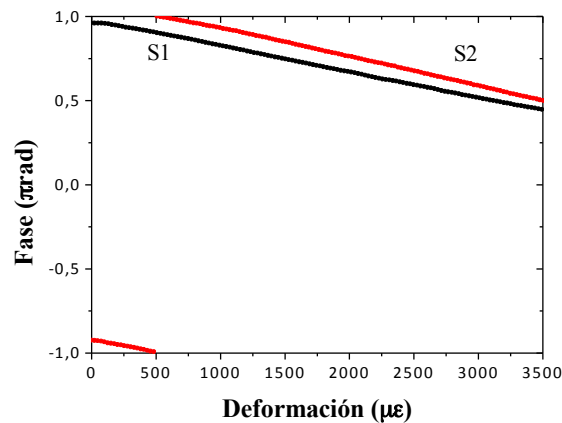


Figura C.4 - Resultado de la variación de fase de la FFT en función de la deformación cuando los interferómetros S1(0.8m) y S2(1.3m) están actuando como sensores.

A partir de los resultados obtenidos se ha estudiado la sensibilidad de cada uno de los interferómetros al estar actuando como sensor. Para ello, al igual que en apartados anteriores, se ha realizado un ajuste de recta para cada uno de los casos. En la Tabla C.2 se presentan ambos resultados para cada sensor:

Sensor	R ²	Sensibilidad del sensor(πrad/με)
S1	0.99977	-1.53 x10 ⁻⁴
S2	0.99951	-1.71 x10 ⁻⁴

Tabla C.2 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.8m y 1.3m.

Estos resultados determinan que la fase tiene un comportamiento lineal en función de la deformación. Presentando para ambos sensores un R² próximo a 1. Asimismo se observa como el S1 presenta una sensibilidad mayor que S2.

Sensores 0.3m y 1m

Finalmente, se han tomado como sensores el de longitud 0.3m y el de 1m, donde se considera que L₁=0.3m entonces L₂=1m. En la Tabla C.3 aparecen representadas las frecuencias espaciales correspondientes a cada uno de los sensores además de las componentes suma y resta de estas mismas.

f_1	f_2	$f_3=f_2-f_1$	$f_4=f_2+f_1$
10	31	21	41

Tabla C.3 - Componentes frecuenciales de la magnitud de la FFT para los sensores 0.3 y 1m en serie

El espectro de la interferencia resultante se muestra en la Figura C.5.

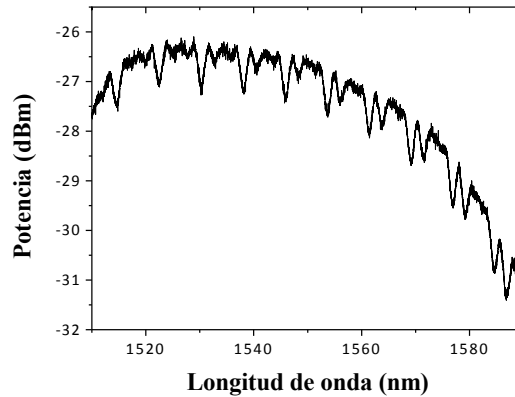


Figura C.5 - Representación del espectro en longitud de onda resultante para los interferómetros de longitud 0.3 y 1m.

En la magnitud de la FFT, Figura C.6, se puede observar como mediante los controladores de polarización se ha conseguido alinear las fibras de forma que la componente resta no aparece mientras que la componente de la suma de frecuencias tiene una pequeña aportación, cuyo valor de amplitud es aproximadamente la cuarta parte de las componentes principales.

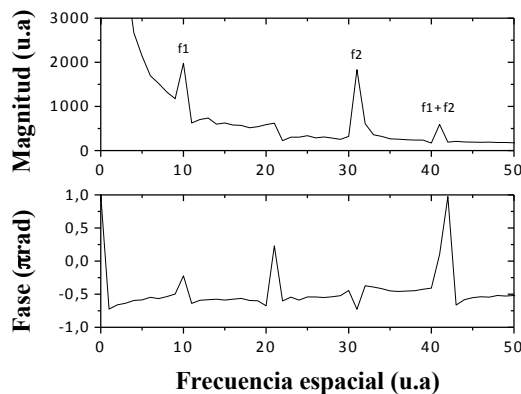


Figura C.6 - Representación de la magnitud y fase de la FFT para la interferencia resultante al situar los interferómetros de longitud 0.3 y 1m en serie.

Como en los casos anteriores, se obtiene cómo la variación de fase para el caso de f_2+f_1 corresponde a la suma de las variaciones de fase del sensor de longitud L_1 mas las variaciones de fase que se encuentran en el sensor de longitud L_2 (Figura C.7 a) y b))

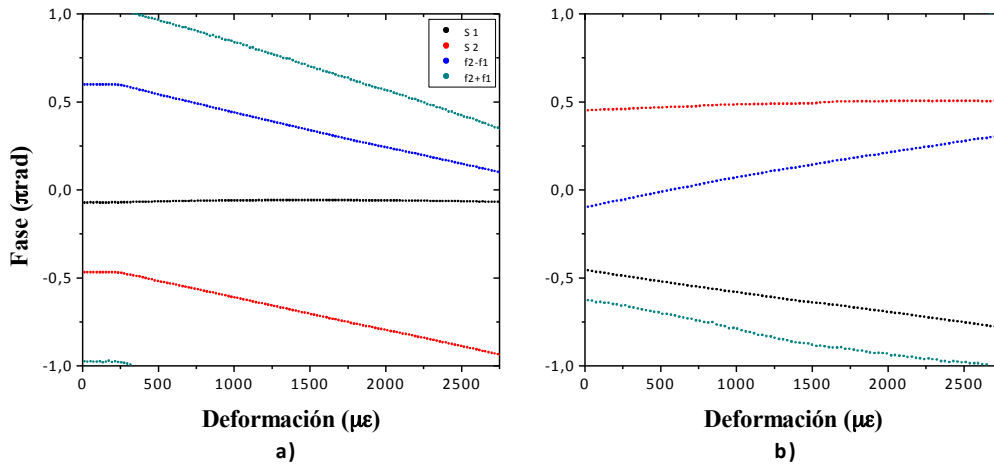


Figura C.7 - Resultado obtenido para las variaciones de fase de la FFT en función de la deformación cuando a) el sensor S1 está sometido a deformación (0.3m) y b) el sensor S2 (1m).

En la Figura C.8 están representadas las variaciones de fase en función de la deformación cuando ambos interferómetros están actuando como sensor. Como para el resto de casos, se ha estudiado de la sensibilidad de cada uno de los interferómetros al estar actuando como sensor, haciendo uso de un ajuste de recta.

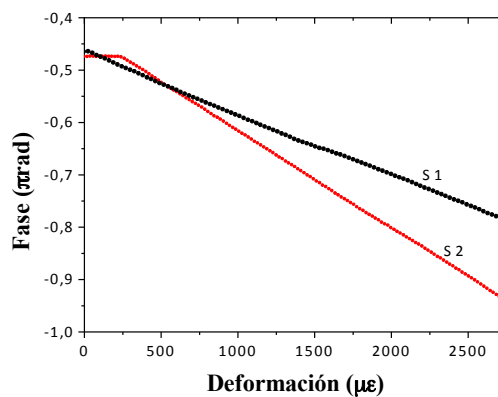


Figura C.8 - Resultado de la variación de fase de la FFT en función de la deformación cuando los interferómetros S1(0.3m) y S2(1m) están actuando como sensores.

En la Tabla C.4 se presentan los resultados para ambos sensores.

Sensor	R ²	Sensibilidad del sensor (μrad/με)
S1	0.99955	-1.17 x10 ⁻⁴
S2	0.99995	-1.85 x10 ⁻⁴

Tabla C.4 - Resumen de los resultados obtenidos del error cuadrático y la sensibilidad del sensor, para la estructura de multiplexación de sensores interferométricos de PCF en serie para los sensores de 0.3m y 1m.

ANEXO D Publicaciones

