



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

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**DESARROLLO DE LÁSER RANDOM DE FIBRA
ÓPTICA MULTI-LONGITUD DE ONDA
CONMUTABLE Y RECONFIGURABLE EN TIEMPO
REAL PARA INTERROGACIÓN REMOTA DE
SENSORES**

Verónica de Miguel Soto

Director: Mikel Bravo Acha

Tutor: Manuel López-Amo

Pamplona, 12 de Septiembre 2014



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

Titulación :

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Título del proyecto:

**DESARROLLO DE LÁSER RANDOM DE FIBRA
ÓPTICA MULTI-LONGITUD DE ONDA
CONMUTABLE Y RECONFIGURABLE EN TIEMPO
REAL PARA INTERROGACIÓN REMOTA DE
SENSORES**

Verónica de Miguel Soto

Director: Mikel Bravo Acha

Tutor: Manuel López-Amo Sainz

Pamplona, 12 de Septiembre 2014

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Manuel López-Amo, por sus ánimos, confianza y todo lo que he aprendido gracias a él antes y durante el proyecto. En segundo lugar, y no por ello menos importante, gracias a Mikel Bravo por sus consejos, ánimos y ayuda, ya que sin él no habría podido sacar el proyecto adelante.

También a mis amigas, Irene, Amanda y Cris, por estar ahí y apoyarme siempre.

Por último, agradecer a mis padres todo el esfuerzo realizado durante estos años para que yo haya llegado donde estoy ahora y a Aitor, gracias por ayudarme y estar siempre a mi lado, pase lo que pase.

Muchas gracias a todos

Verónica

Contenido

Capítulo 1. Fundamentos teóricos	5
1.1. Fibra óptica.....	5
1.1.1. Tipos de fibra óptica.....	5
1.1.1.1. Fibra multimodo.....	6
1.1.1.2. Fibra monomodo.....	6
1.1.2. Fundamentos de la emisión óptica	7
1.1.3. Atenuación en la fibra óptica	9
1.1.4. Efectos no lineales en la fibra.....	11
i) Origen de los efectos no lineales en la fibra óptica	11
ii) Dispersión Raman y Brillouin Estimulada.....	12
iii) Auto modulación de fase, SPM	12
iv) Mezclado de cuatro ondas, FWM	13
1.2. Amplificadores de fibra óptica	13
1.2.1. Tipos de amplificadores de fibra óptica	14
1.2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con Erbio.....	15
1.2.1.2. Amplificadores Raman	16
1.3. Láseres de fibra óptica	18
1.3.1. Ventajas de los láseres de fibra óptica.....	19
1.3.2. Tipos de láseres de fibra.....	20
1.3.3. Diseño de las cavidades de láseres de fibra óptica	20
i) Láseres de fibra dopada con Erbio	21
ii) Láseres de fibra Raman	22
iii) Láseres Random	23
iv) Láseres de fibra multi-longitud de onda	25
1.4. Sensores de fibra óptica.....	26
1.4.1. Redes de difracción de Bragg	28
1.4.1.1. Principio de medida.....	29
i) Deformación.....	29
ii) Temperatura.....	29
1.4.2. Sensores interferométricos.....	30
1.4.2.1. Interferómetro de Sagnac	30

Capítulo 2. Laser conmutable multi-longitud de onda para comunicaciones ópticas y sensores	32
2.1 Introducción	32
2.2 Desarrollo experimental.....	33
2.2.1 Desarrollo del software de control.	35
2.2.1.1 Diseño del programa de ecualización de líneas de emisión.....	36
2.2.1.2 Diseño del programa de eliminación de líneas de emisión.....	40
2.2.1.3 Mejora del programa para la caracterización de la estabilidad.....	42
2.2.1.4. Diseño del programa para conmutar diferentes perfiles.....	43
2.2.1.5. Mejora del programa de caracterización de la curva de emisión láser	44
2.2.2 Láser multi-longitud de onda con fibra DCF.....	46
2.2.2.1 Resultados	46
2.2.3 Láser multi-longitud de onda con fibra SMF	56
2.2.3.2 Resultados	56
2.3 Conclusiones.....	65
Capítulo 3. Red híbrida de sensores FBG e interferométricos interrogada por un láser conmutable multi-longitud de onda de fibra óptica	67
3.1. Introducción	67
3.2. Desarrollo experimental.....	68
3.2.1. Conmutador óptico	68
3.2.1.1. Resultados	70
3.2.2. Red de sensores	71
3.2.3. Conclusiones	77
4. Conclusiones.....	78
5. Referencias.....	80
6. MATERIAL UTILIZADO.....	82
7. ESTUDIO ECONÓMICO	94
ANEXO A.....	98
Anexo B	101
ANEXO C	102

Capítulo 1. Fundamentos teóricos

1.1. Fibra óptica

La fibra óptica es una guía onda cilíndrica dieléctrica fabricada de sílice, plástico u otros materiales con baja atenuación a frecuencias ópticas. Principalmente es utilizada en redes de datos. Las fibras ópticas son guiondas formadas normalmente por una zona central (núcleo) de mayor índice de refracción que la que le rodea (cubierta) y que guían uno o varios modos, dependiendo de las dimensiones del núcleo. La fuente de luz suele ser un diodo láser o un LED.

Las fibras se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a una gran distancia, con velocidades similares a las de radio y superiores a las de cable convencional. Son el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias electromagnéticas. También se utilizan para redes locales, en donde sea necesario aprovechar las ventajas de la fibra óptica sobre otros medios de transmisión.

Su estructura básica se muestra en la Figura 1.1:

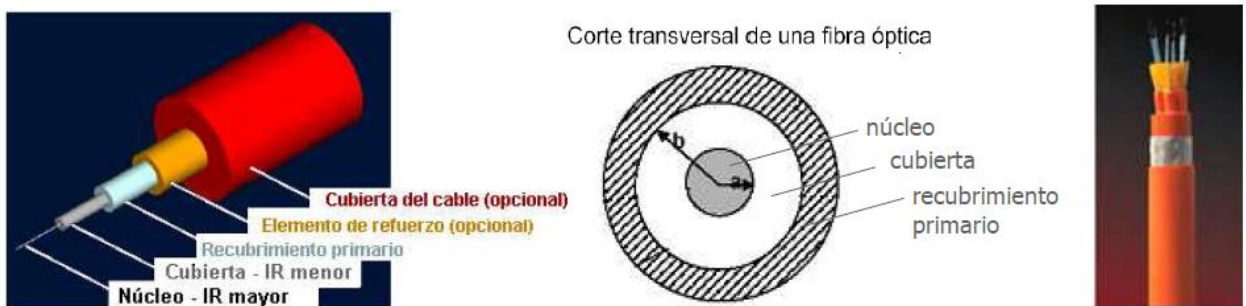


Figura 1.1. Estructura básica de la fibra

1.1.1. Tipos de fibra óptica

La luz en el interior de una fibra se transporta sobre modos de propagación. Y según el número de modos de propagación tendremos dos tipos de fibra óptica: multimodo y monomodo.

1.1.1.1. Fibra multimodo

Una fibra multimodo es aquella en la que la luz excita más de un modo de propagación. Esto supone que cada modo viaja a velocidades diferentes y no llegan todos a la vez. Una fibra multimodo puede tener decenas de modos de propagación de luz. Las fibras multimodo se usan comúnmente en aplicaciones de corta distancia, menores a 2 km, son simples de fabricar y por tanto económicas.

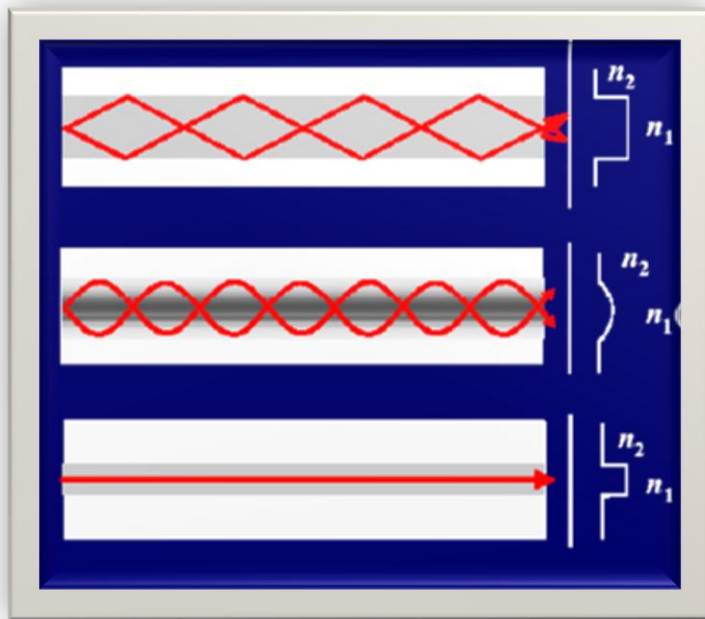
El núcleo de una fibra multimodo tiene un índice de refracción superior, pero del mismo orden de magnitud, que el revestimiento. Debido al gran tamaño del núcleo de una fibra multimodo, es más fácil de conectar y tiene una mayor tolerancia a componentes de menor precisión.

Dependiendo del tipo de índice de refracción del núcleo, tenemos dos tipos de fibra multimodo:

- **Salto de índice:** en este tipo de fibra, el núcleo tiene un índice de refracción constante en toda la sección cilíndrica
- **Índice gradual:** el índice de refracción del núcleo no es constante

1.1.1.2. Fibra monomodo

La fibra monomodo es una fibra óptica en la que sólo se propaga un modo de luz. Se logra reduciendo el diámetro del núcleo de la fibra hasta un tamaño que sólo permite un modo de propagación (8,3 a 10 micras @1550 nm). Su transmisión es paralela al eje de la fibra. A diferencia de las fibras multimodo, las fibras monomodo permiten alcanzar grandes distancias y transmitir a alta velocidad.



Fibra multimodo de índice abrupto

Fibra multimodo de índice gradual

Fibra monomodo

Figura 1.2. Tipos de fibra óptica

1.1.2. Fundamentos de la emisión óptica

Los fenómenos que explican el funcionamiento de los emisores de luz se explican adecuadamente mediante el estudio de las interacciones entre luz-materia, considerando la luz compuesta por una serie de partículas, llamadas fotones. Los fotones tienen masa cero en reposo y transportan energía electromagnética.

La energía de la luz está cuantificada en niveles separados por E , donde E es la energía asociada a un fotón:

$$E = h\nu$$

Siendo h la constante de Planck y ν la frecuencia de la onda asociada al fotón.

También los átomos y moléculas presentan niveles de energía discretos. Pero al unirse para formar estructuras más complejas interactúan y los niveles de energía más altos pasan a formar bandas de energía separadas por bandas de energía prohibidas.

La separación energética entre la última banda llena de electrones (banda de valencia) y la banda superior que estará o no ocupada (banda de conducción) determina las propiedades eléctricas del material, definiéndolo como metal,

semiconductor o aislante. Esta separación se llama banda de gap o banda prohibida.

Figura 1.3.

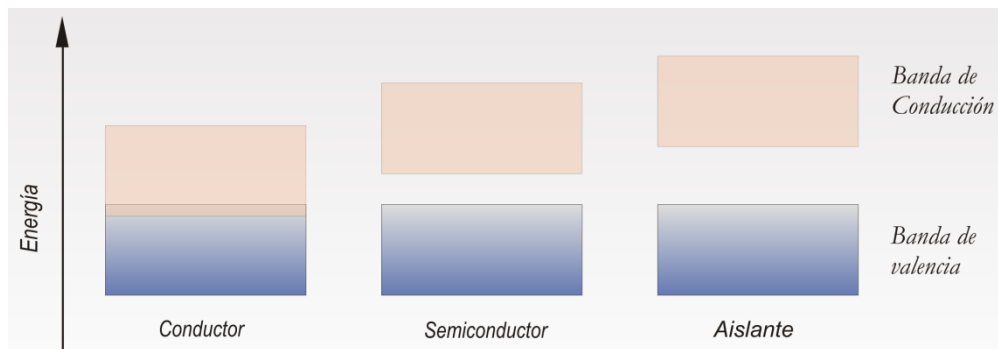


Figura 1.3. Representación de las bandas de energía de los diferentes tipos de material

Como se observa en la Figura 1.3., las bandas de conducción y valencia están solapadas para el caso de los metales y muy separadas energéticamente para el caso de los aislantes. Los semiconductores, como es el silicio, tienen la banda de conducción y valencia separadas pero próximas, por lo que se producen interacciones entre ambas.

La interacción entre fotones y materia en los semiconductores se explica con tres mecanismos básicos, Figura 1.4:

- **Absorción:** Un fotón incide en el material. La energía del fotón es absorbida por el material, que queda en estado de mayor energía. Un electrón pasa de la banda de valencia a la de conducción
- **Emisión espontánea:** un electrón pasa de la banda de conducción a la banda de valencia, donde se recombina con un hueco. El sistema pasa a un estado de menor energía. Se genera un fotón de fase y dirección de propagación arbitrarias.
- **Emisión estimulada:** Un fotón incide en el material. Un electrón pasa de la banda de conducción a la banda de valencia, donde se recombina con un hueco. Se genera un fotón de fase y dirección de propagación idénticas al incidente.

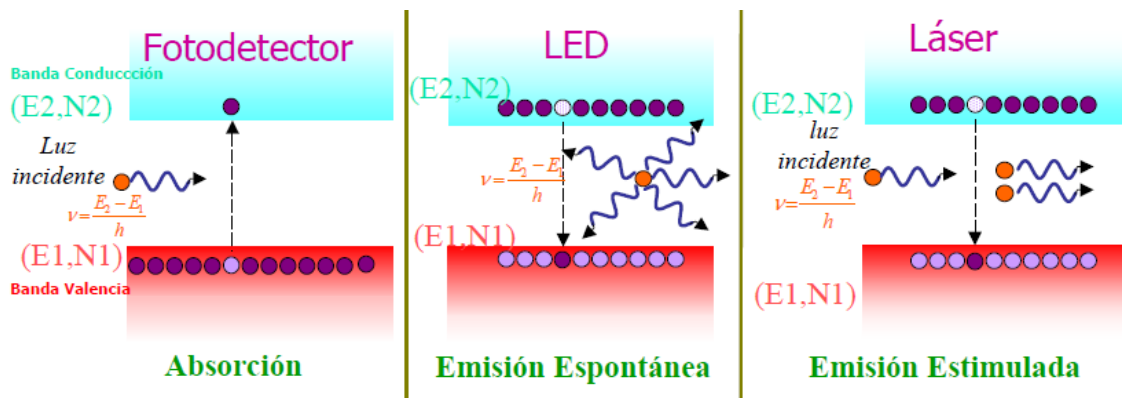


Figura 1.4. Mecanismos de interacción en semiconductores

1.1.3. Atenuación en la fibra óptica

Los principales mecanismos de atenuación de la fibra vienen resumidos en la Tabla 1.1:

Absorción de los materiales		Dispersión espacial (scattering)		Curvaturas y otros
Intrínseca (sílice y dopantes)	Extrínseca (iones OH e impurezas metálicas)	Lineal (Rayleigh y Mie)	No lineal (Brillouin y Raman)	Evitables

Tabla 1.1. Mecanismos de atenuación

La **dispersión espacial lineal** está provocada por fluctuaciones microscópicas del material y, por tanto, del índice de refracción de la fibra (inhomogeneidades) producidas durante el proceso de fabricación. Suponen una atenuación de la señal óptica debido a la transferencia lineal/ proporcional de la potencia óptica guiada a otros modos. Diferenciamos dos tipos, ilustrados en la Figura 1.5:

- **Dispersión Rayleigh:** provocada por fluctuaciones del índice de refracción causadas en el proceso de enfriamiento de la sílice y de dimensiones microscópicas.

Este fenómeno se produce cuando la luz choca en su camino con partículas extrañas al medio material, cuyo diámetro es considerado mucho menor que la longitud de onda de la señal óptica, provocando que el rayo incidente se disperse en muchas direcciones. La atenuación provocada por este tipo de dispersión es inversamente proporcional a la longitud de onda elevada a la cuarta, es decir, la pérdida por Rayleigh disminuye a medida que aumenta la longitud de onda. Es un fenómeno omnidireccional.

- **Dispersión Mie:** provocada por irregularidades óptica en la fibra (en el interfaz núcleo-cubierta, variaciones del diámetro del núcleo, etc.) de dimensiones similares a la longitud de onda. Es una dispersión principalmente que ocurre en copropagación y que es despreciable hoy en día.



Figura 1.5. Dispersión omnidireccional Rayleigh y dispersión Mie

La **dispersión espacial no lineal** está presente con densidades de potencia elevadas en el núcleo de la fibra. Diferenciamos dos tipos:

- **Dispersión Brillouin:** provocada por la modulación de la luz debida a vibraciones de las moléculas por efecto térmico. Se produce un fonón a frecuencias acústicas y la luz dispersada aparece a otras frecuencias ópticas por encima y debajo de la señal dispersada.
- **Dispersión Raman:** es un tipo de dispersión de la luz, en la cual la frecuencia de la luz cambia cuando esta es dispersada. La variación de frecuencia ocurre cuando la energía de un fotón dispersado es absorbida por una molécula, sus átomos se excitan y entran en vibración. La mayoría de las moléculas están inicialmente en un estado de baja energía, pero debido a la agitación o vibración algunas moléculas pasan a un estado

energético superior, un estado de excitación. El proceso de dispersión es el proceso por el cual un fotón incidente lleva a una molécula a un estado de excitación virtual. Como la molécula no puede permanecer en este estado virtual, cae a un nivel de energía menor y emite un fotón. Si esta molécula cayese en el mismo nivel en el que estaba antes de la excitación, se tendría **dispersión Rayleigh** y no habría variación en la frecuencia del fotón emitido, pero sí que se observaría un cambio en la dirección de propagación, ya que los fotones se dispersan en todas direcciones.

Si la molécula cae en un nivel de energía diferente, la energía del fotón emitido debe ser diferente a la energía del fotón incidente para cumplir con la conservación de la energía, lo que se traduce en una diferencia de frecuencia entre el fotón emitido e incidente. Este proceso se denomina **dispersión Raman**. La frecuencia puede disminuir (dando lugar a líneas de Stokes en el espectro) o disminuir (líneas anti-Stokes) dependiendo si la molécula comienza en un estado de baja energía o en un estado de excitación.

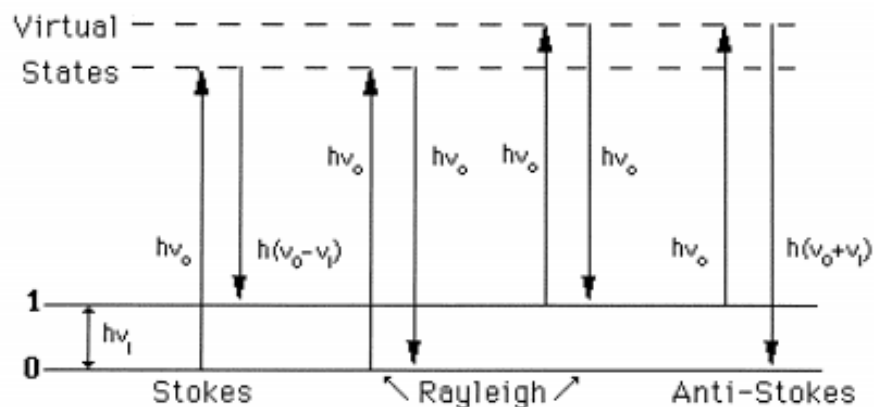


Figura 1.6. Representación de las transiciones de energía producidas en la dispersión Rayleigh y en la dispersión Raman (Stokes y Anti-Sotkes)

1.1.4. Efectos no lineales en la fibra

i) Origen de los efectos no lineales en la fibra óptica

Cada vez se emplean fuentes de mayor potencia, así como amplificadores ópticos, lo que provoca que la densidad de potencia en el núcleo de la fibra óptica sea elevada, ya que es de dimensiones reducidas. Además, cuando se transmite a alta

velocidad, los pulsos de luz son muy cortos y con alta potencia de pico. Todo esto provoca que se excite el régimen no lineal. En el **régimen lineal**:

- La potencia de salida es proporcional a la potencia de entrada
- El cambio de fase es proporcional al índice de refracción efectivo
- No se generan nuevas longitudes de onda

Por el contrario, en el **régimen no lineal**:

- La potencia de salida no es proporcional a la potencia de entrada, existe una atenuación extra
- Cambio de fase no es proporcional al índice de refracción
- Si se generan nuevas longitudes de onda y las distintas longitudes de onda interactúan entre sí, ocasionando diafonía y distorsión.

ii) **Dispersión Raman y Brillouin Estimulada**

La dispersión produce un trasvase de potencia desde el modo guiado al campo difundido, lo que se traduce en pérdidas adicionales en la fibra. Si es de naturaleza lineal, la luz dispersada es de la misma frecuencia que la luz incidente en la fibra. Sin embargo, en la dispersión no lineal se produce una interacción de la luz con fonones (vibraciones moleculares de la sílice). La luz dispersada es de menor energía y por lo tanto de menor frecuencia que la incidente.

En el caso de dispersión Raman se generan fonones ópticos a frecuencias del orden de 13 Thz menores que la luz incidente y en el caso de dispersión Brillouin se generan fonones acústicos a ambos lados de la luz incidente y con una anchura del orden de 20 Mhz. Esto último provoca un ensanchamiento del pulso incidente y por lo tanto una disminución de su eficiencia en potencia.

iii) **Auto modulación de fase, SPM**

Este efecto no lineal de la fibra se debe al **Efecto Kerr**: el índice de refracción que experimenta el modo fundamental en una fibra depende débilmente de la potencia que transporta. Debido a esto, cuando un pulso de suficiente potencia se

propaga por la fibra experimenta un cambio de fase proporcional a dicha potencia, es decir, no cambia el módulo de la señal pero sí su fase instantánea.

iv) Mezclado de cuatro ondas, FWM

En sistemas de multiplexación en longitud de onda WDM, el efecto Kerr anteriormente mencionado hace que se generen nuevas ondas ópticas a frecuencias suma o resta de tres componentes de un sistema con muchas portadoras ópticas. Esta energía transferida a nuevas longitudes de onda se traduce en una pérdida de potencia en los canales transmitidos y en diafonía.

En general, los efectos no lineales provocan un deterioro de la calidad de la señal transmitida y obliga a limitar, bien la potencia de emisión o el número de canales multiplexados en longitud de onda.

1.2. Amplificadores de fibra óptica

Un amplificador óptico puede definirse como un dispositivo que aumenta la potencia de una señal óptica directamente, es decir, sin reconvertir la señal al dominio eléctrico. Los amplificadores de fibra óptica son simples y se componen principalmente de tres elementos: fibra amplificadora de longitud suficiente, un láser de bombeo y un acoplador en longitud de onda WDM (el cual combina la señal de bombeo y la señal amplificada). La utilización de un segundo láser de bombeo es opcional.

El fenómeno físico por el cual se produce la amplificación es la emisión estimulada anunciada por Albert Einstein en 1917. Los fotones generados en el proceso de la emisión estimulada tienen las mismas características que los fotones estimulantes, lo cual hace imposible distinguir entre unos y otros. Por esta razón, un haz de luz puede ser amplificado cuando atraviesa un medio material donde predomina la emisión estimulada frente a la absorción. Para cumplir con esta condición, los átomos del material deben ser excitados por lo que se denomina energía de bombeo, parte de la cual se transfiere al haz de luz amplificado.

Los amplificadores ópticos son elementos esenciales en redes de telecomunicaciones de fibra óptica avanzadas. Permiten compensar las pérdidas que

introducen los diferentes componentes así como la propia fibra y, de esta manera, mejorar la capacidad global de la red y la transmisión a mayores distancias.

La amplificación óptica ha tenido un gran impacto en aplicaciones que utilizan fibra óptica. Actualmente, estos amplificadores no solo son útiles en comunicaciones ópticas, sino que también se emplean en procesos en los que es necesario aumentar la potencia de ciertas señales, como es el caso de las redes de sensores.

La evolución de la tecnología de los amplificadores ópticos ha sido esencial en el rápido desarrollo de los sistemas WDM. Permite que se modifique la velocidad de transmisión sin cambiar el equipamiento completo del enlace y alcanzando distancias mayores. Además, estos dispositivos tienen una gran ventaja, y es que pueden amplificar diferentes longitudes de onda de forma simultánea, lo cual es muy importante en sistemas WDM. En resumen, los amplificadores ópticos pueden utilizarse como repetidores para cubrir distancias de cientos de kilómetros evitando así la utilización de los clásicos repetidores y permitiendo multiplexación en longitud de onda.

Finalmente, los amplificadores ópticos son elementos indispensables en las redes de comunicaciones por su gran capacidad y gran ancho de banda. A pesar de sus ventajas, los amplificadores ópticos presentan varios retos a mejorar en cuanto a diseño y operación. Los primeros que se diseñaron eran relativamente simples pero ahora contienen sub-sistemas complejos con componentes avanzados y software de control.

1.2.1. Tipos de amplificadores de fibra óptica

Los amplificadores de fibra óptica se diferencian por su mecanismo de operación: emisión estimulada entre los estados resonantes, procesos no resonantes denominados dispersión estimulada de la luz e interacción paramétrica entre las ondas guiadas utilizando procesos no lineales como el mezclado de cuatro ondas (Four Wave Mixing, FWM). La principal diferencia entre ellos es que en los amplificadores basados en la emisión estimulada necesitan que el núcleo de la fibra este dopado con algún material especial, como son los EDFAs (Erbium Dopped Fiber Amplifiers, amplificadores de fibra dopada con erbio), mientras que aquellos basados en el

scattering o dispersión estimulada no lo necesitan, como son los amplificadores Raman y Brillouin.

1.2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con Erblio

Los EDFAs son los preferidos para utilizarlos en redes por su gran versatilidad, anchos de banda de ganancia útiles, gran eficiencia de bombeo, ruido intrínseco bajo y escasa dependencia de su ganancia con la polarización de la luz. Son amplificadores ópticos que consisten en una fibra monomodo cuyo núcleo se ha dopado con Erblio. La ganancia se consigue con emisión estimulada (véase 2.2). Para conseguir esta ganancia, se bombea la fibra con luz a 980 nm y la zona de amplificación se extiende entre 1525-1565 nm, un ancho de banda de amplificación de 40 nm, véase Figura 1.7. Por lo tanto, los EDFAs pueden ser utilizados en sistemas WDM (2.1) si las longitudes de onda utilizadas entran dentro de ese rango. Sin embargo, la ganancia no es plana en todo el ancho de banda y se deben utilizar técnicas si se desea hacer más plana y uniforme esta ganancia.

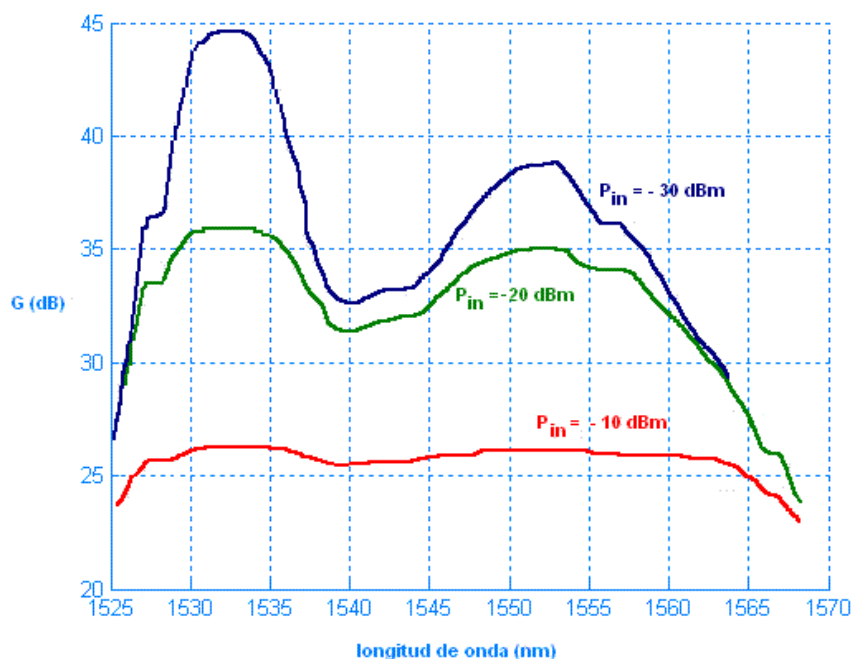
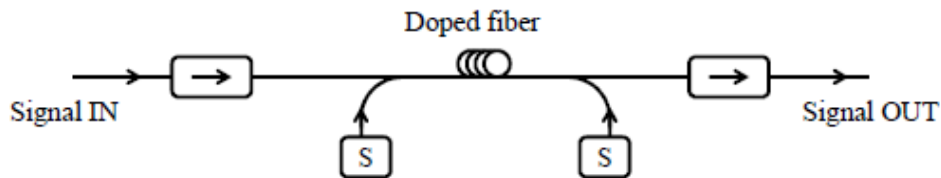


Figura 1.7. Espectro de ganancia de un EDFA para diferentes potencias de entrada

Un esquema típico de un amplificador de fibra dopada se muestra en la Figura 1.8. La luz emitida por el láser de bombeo se acopla a una fibra con un multiplexor en longitud de onda que mezcla la señal de bombeo y la señal de potencia. El esquema de

bombeo puede ser unidireccional o bidireccional. En el caso de que sea unidireccional, hay dos opciones: co-propagación o contra-propagación. El primer caso es menos ruidoso y el segundo más eficiente en cuanto a ganancia, con lo que se elegirá uno u otro en función de la situación concreta en la que se utilice.



1.8. Esquema de un amplificador de fibra dopada

Las prestaciones del EDFA varían en función de la intensidad de la señal de entrada, así como en función de otros parámetros. El amplificador trabaja con altas ganancias si la potencia de entrada es baja y en baja ganancia si la potencia de entrada lo está saturando.

Los EDFAs pueden ser utilizados como pre y post amplificadores, así como amplificadores en línea.

1.2.1.2. Amplificadores Raman

El principio de operación de los amplificadores Raman es la emisión estimulada asociada con la dispersión estimulada Raman en la fibra [4]. Durante la dispersión estimulada Raman, la luz incidente en el medio se convierte a luz de menor frecuencia. Los fotones de bombeo excitan los electrones de la sílice a un nivel de energía virtual superior (estado no resonante). El electrón rápidamente cae a un estado de energía menor y emite un fotón espontáneamente en el proceso. La diferencia de energía entre el fotón de bombeo y el fotón de señal se disipa en vibraciones moleculares elásticas del propio material. Los niveles de estas vibraciones determinan el desplazamiento en frecuencia y la forma de la curva de ganancia Raman. La diferencia de frecuencia entre el fotón de bombeo y el de señal se denomina desplazamiento de Stokes y en fibras estándar es alrededor de los 13.2THz, aproximadamente 100nm.

Para conseguir un amplificador Raman utilizando la fibra óptica como medio de ganancia, la señal de bombeo y la señal útil deben transmitirse en la misma fibra, sin

importar su dirección de propagación, y en ese caso, se produce la dispersión Raman estimulada.

Uno de las grandes ventajas que ofrecen este tipo de amplificadores es que no requieren ningún tipo de dopante especial, sino que el propio material que se utiliza para transmitir la señal, una fibra de sílice convencional, es también el medio de ganancia. Esto quiere decir que fibras estándar y pasivas pueden convertirse en una guía activa y amplificadora por medio del efecto de amplificación Raman.

Para diseñar amplificadores Raman de fibra hay que tener en cuenta diversos factores:

- En primer lugar, la ganancia Raman tiene un espectro cuya forma depende principalmente de la diferencia de frecuencia entre bombeo y señal y no de las frecuencias en sí [5]. Esto viene del principio de la conservación de la energía: la diferencia en frecuencia debe ser igual a la frecuencia del fonón óptico generado. Por lo tanto, se puede obtener ganancia a casi cualquier longitud de onda si se elige adecuadamente la potencia de bombeo. La gran flexibilidad de la amplificación Raman permite dar forma al espectro de ganancia combinando múltiples bombeos y así tener un espectro de ganancia plano en toda la banda de amplificación.
- En segundo lugar, la ganancia Raman no depende de la dirección de propagación relativa de la señal de bombeo y la señal a amplificar. Por lo tanto, el bombeo puede ser co-direccional, contra-direccional y bidireccional con respecto a la señal. Los bombeos co-direccionales ofrecen mejores prestaciones en cuanto a ruido, pero peores en cuanto a efectos no lineales, que se intensifican. El bombeo contra-direccional reduce el impacto de los efectos no lineales y también minimiza el ruido relativo de intensidad (RIN). Finalmente, el bombeo bidireccional es la mejor opción salvo el hecho del coste del bombeo extra.
- En tercer lugar, hay que tener en cuenta las desventajas de los amplificadores Raman. En comparación con los EDFAs, Los amplificadores Raman tienen una eficiencia de bombeo baja con señales de baja potencia. Además, requieren de fibras de mayor longitud por razones de eficiencia de ganancia. Otra desventaja es que su ganancia depende de la polarización.

Se pueden distinguir entre dos tipos de amplificadores Raman. La primera categoría se denomina amplificadores Raman discretos porque la ganancia tiene lugar

en elementos discretos del sistema de transmisión. En la otra categoría entrarían los amplificadores Raman distribuidos, llamados de este modo porque la ganancia se distribuye a lo largo de toda la fibra.

Sin embargo, los amplificadores Raman distribuidos tienen ciertas limitaciones. Dos de las más importantes son las reflexiones Rayleigh y los efectos no lineales. La retro-dispersión se debe al efecto de dispersión lineal de Rayleigh. Una explicación no rigurosa de este efecto es la siguiente: la luz se dispersa de forma aleatoria en todas las direcciones y una pequeña proporción de la señal se refleja debido a la dispersión Rayleigh hacia atrás. Esta reflexión se amplifica por medio de la ganancia Raman y se vuelve a reflejar en sentido contrario debido a la retro-dispersión de Rayleigh, uniéndose a la señal útil. Por lo tanto, la doble retro-dispersión Rayleigh se amplifica dos veces y aumenta con la distancia ya que esa ganancia se va acumulando a lo largo de los kilómetros de fibra. En resumen, la retro dispersión doble de Rayleigh genera un gran número de réplicas de la señal con retardos y fases aleatorios que se propagan junto con la señal original de partida transmitida por la fibra. El problema asociado a esto es el ruido extra inherente, ya que las replicas de la señal original ocupan la misma región espectral y por lo tanto se hace más difícil distinguir entre la señal original y las réplicas. Desde un punto de vista práctico, la retro dispersión doble de Rayleigh limita la ganancia entre 10 y 15 dB.

1.3. Láseres de fibra óptica

El esquema básico de un laser de fibra óptica, en general, requiere de dos elementos clave: un material de ganancia y que amplifique la señal y una cavidad óptica que confine la luz creando realimentación positiva. Por lo tanto un amplificador de fibra óptica puede convertirse en un laser colocándolo como elemento de ganancia dentro de una cavidad diseñada para aportar realimentación positiva. Una estructura cumple la condición láser cuando la ganancia total de la cavidad es mayor a las pérdidas totales de la cavidad. Desde un punto de vista técnico, un laser de fibra óptica es un conversor de longitud de onda. Los fotones a la longitud de onda de bombeo son

absorbidos y esto provoca inversión de población y emisión estimulada, necesarias para emitir a otras longitudes de onda.

Las principales características de los láseres de fibra óptica se muestran en la Tabla 1.2

	Propiedades
Aplicaciones	Procesado de materiales, telecomunicaciones, cirugía...
Fuentes de bombeo	Otros láseres, en concreto láseres de diodo
Eficiencia en potencia	Típicamente 30-70%
Longitudes de onda	Cerca del infrarrojo, pero también visible o ultravioleta
Variación de longitud de onda	A menudo mayor a 50 nm
Potencia de salida media	Típicamente entorno a 10 mW y 1 kW
Ancho de banda de ganancia	Mayor a 30nm
Espaciamiento de los modos longitudinales	Pequeño, normalmente menos a 100 MHz
Pulsos ultracortos	Si, pulsos de nanosegundos, picosegundos y femtosegundos

Tabla 1.2. Características láseres de fibra óptica

Los láseres de fibra óptica operan normalmente con múltiples modos longitudinales debido al gran ancho de banda de ganancia (>30 nm) y su espaciado longitudinal de los modos relativamente pequeño (<100 MHz).

1.3.1. Ventajas de los láseres de fibra óptica

Después de 20 años de investigación, la tecnología de los láseres de fibra óptica se ha trasladado desde el laboratorio hasta el mercado comercial. Tienen muchas ventajas frente a otros tipos de láseres, algunas de ellas son:

- Alta intensidad de bombeo: desde que es posible hacer núcleos de fibra de unas pocas micras de diámetro, el pequeño diámetro del modo de la luz guiada hace que esta tenga mayor intensidad efectiva de bombeo
- Guiado de la señal y del bombeo: se pueden superponer ambas señales y eso permite una operación del laser mucho más eficiente.

- Medio de ganancia compacto: la fibra como medio de ganancia puede ser de gran longitud y también muy compacto. La fibra puede enrollarse con radios pequeños de hasta 10 mm.
- Disipación del calor: El pequeño diámetro de la fibra permite una buena disipación del calor, lo cual reduce el estrés por calentamiento y la fluorescencia a altas temperaturas.
- Calidad del haz: una fibra monomodo da un haz limitado incluso a muy altas potencias de salida
- Robustez: un laser de fibra óptica con cavidad es mucho más robusto frente a perturbaciones mecánicas que uno al descubierto. No hay necesidad de alineamiento óptico ya que los componentes están fusionados.
- Diseño sencillo: hay muchos posibles diseños de cavidades y configuraciones que son mucho más ligeras y estables que otro tipo de láseres.

1.3.2. Tipos de láseres de fibra

La mayoría de los láseres de fibra óptica están basados en fibra dopada con tierras raras. También pueden estar basados en amplificadores de dispersión estimulada: láseres de fibra Raman o Brillouin. Finalmente, el último tipo de láseres son los que están compuestos por láseres híbridos, que tienen la característica de combinar dos tipos de amplificación. Los más conocidos son Brillouin/Erbio [6,7], Raman/Brillouin [8,9] y Raman/Erbio [10,11].

1.3.3. Diseño de las cavidades de láseres de fibra óptica

Las configuraciones más utilizadas son: las cavidades Fabry-Perot o cavidades lineales y las cavidades en anillo. La principal diferencia entre ellas es el camino que recorre la luz: mientras que en las cavidades Fabry-Perot la luz viaja entre dos espejos situados al final de cada extremo de la fibra, en las cavidades en anillo la luz viaja en diferentes direcciones.

Las cavidades Fabry-Perot pueden constituirse colocando un medio de ganancia entre dos espejos altamente reflectantes, véase Figura 1.9. Sus principales ventajas son su simplicidad y la posibilidad de hacer cavidades muy cortas. Las cavidades lineales son ideales para hacer láseres compactos de un solo modo longitudinal y para

aplicaciones de alta potencia. Pero esta aproximación tiene varias limitaciones como la eficiencia y un gran ancho de línea a la salida.

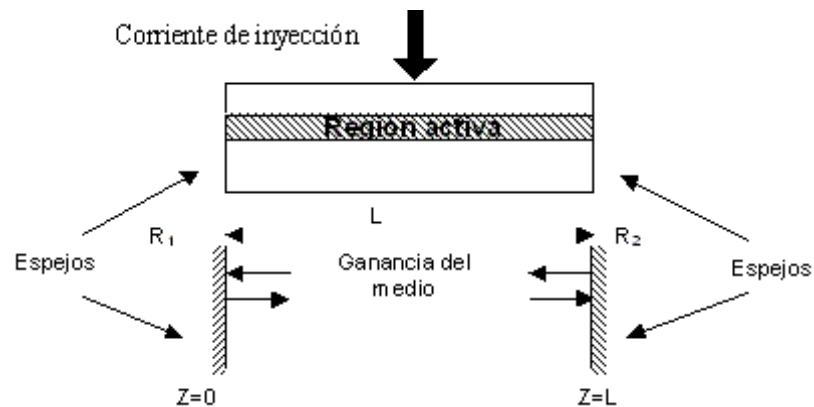


Figura 1.9. Esquema básico de una cavidad Fabry-Perot lineal

Las cavidades en anillo son topologías extremadamente simples que no necesitan de espejos, resultando en cavidades realizadas solo de fibra, véase Figura 1.10. Normalmente, las cavidades en anillo usan la ganancia que proporciona el medio de ganancia de una forma más eficiente y tienen un rango espectral dos veces mayor para una misma longitud de cavidad en comparación con las cavidades lineales. Sin embargo, pueden sufrir fluctuaciones de potencia.

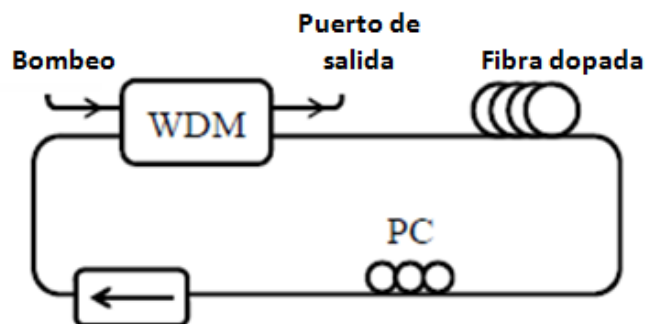


Figura 1.10. Esquema básico de una cavidad en anillo unidireccional

i) Láseres de fibra dopada con Erbio

Este tipo de láseres tienen en la actualidad diversas aplicaciones que se extienden desde los sensores a las telecomunicaciones tal y como la multiplexación densa por división en longitud de onda, sensores de fibra óptica, procesamiento de señal

óptica, multiplexación de redes de sensores, fuentes de solitones etc. Además, pueden operar en diversas regiones del espectro, desde lo visible hasta el infrarrojo. Su desarrollo principal es en la región de 1550 nm, que coincide con la región de menores pérdidas de la fibra de sílice utilizada para comunicaciones.

Hay que tener en cuenta varios factores para que el láser de fibra dopada con Erblio sea adecuado para cada aplicación:

La longitud de la fibra dopada es un factor importante ya que afecta al umbral, la eficiencia y la longitud de onda. Para una determinada fibra y potencia de bombeo hay una longitud óptima que minimiza el umbral. La longitud de la fibra dopada también afecta a la longitud de onda del láser. A medida que aumentamos la longitud de la fibra, la longitud de onda de emisión del láser aumenta también. Otro factor clave es optimizar la concentración de Erblio para maximizar la eficiencia. Las medidas realizadas indican que con concentraciones mayores de Erblio, tenemos mayores umbrales y eficiencias menores.

La longitud de onda de bombeo en este tipo de láseres suele ser en torno a los 980 nm y los 1480 nm. La elección de un bombeo u otro dependerá de las prestaciones deseadas. Si se bombea a 980 nm la fibra dopada, se tendrá la mayor eficiencia. Por el contrario, si se bombea a 1480 nm se conseguirán láseres de alta potencia. En la práctica, con ambos bombeos se consiguen excelentes prestaciones.

ii) Láseres de fibra Raman

Los láseres de fibra Raman explotan la dispersión estimulada Raman para compensar las pérdidas en la fibra y crear un medio de ganancia efectiva a longitudes de onda superiores (Stokes) utilizando la fibra transmisora como el propio laser resonador. En otras palabras, la dispersión Raman estimulada desplaza el espectro a frecuencias inferiores de la frecuencia de bombeo, en torno a 13 THz y la luz se confina en la fibra con la ayuda de FBGs u otro tipo de estructuras reflectoras.

Como en cualquier otro láser, un láser Raman de fibra completo está compuesto por tres partes: una fuente de bombeo, un medio de ganancia y una forma de crear realimentación.

En primer lugar, la fuente de bombeo debe tener tres elementos clave desde punto de vista práctico: tiene que carecer de polarización debido a que la ganancia Raman depende de la polarización, tiene que dar cientos de mili vatios debido al coeficiente de ganancia relativamente bajo. Finalmente, el espectro del bombeo debe ser relativamente ancho, de unos pocos nanómetros, para evitar la dispersión Brillouin.

En segundo lugar consideramos el medio de ganancia. La fibra transmisora actúa como un medio de ganancia en si mismo porque el proceso de amplificación Raman puede ser creado en las fibras de sílice y no se necesita ningún tipo de fibra o material especial.

En tercer lugar, se han utilizado diferentes técnicas para proveer realimentación y seleccionar las longitudes de onda de emisión: filtros Fabry-Perot, espejos en fibra tipo Sagnac, FBGs...

Por último, cuando se diseña un láser Raman de fibra, es de gran importancia considerar parámetros clave como la longitud de la fibra, reflexiones del acoplador de salida y pérdidas en las fusiones, porque de estos parámetros depende el funcionamiento del láser.

iii) Láseres Random

Los efectos físicos relacionados con la propagación de la luz en medios aleatorios o, del inglés, random son importantes para aplicaciones de ingeniería como radares láser, sensado remoto, medidas de distancia o astronomía óptica. Sin embargo, la interacción con medios random supone un gran reto para la ciencia moderna. Recientes investigaciones en la fotónica han demostrado que es posible utilizar el desorden intrínseco artificial de los materiales para dar lugar a nuevos elementos y sistemas ópticos. [1, 2]

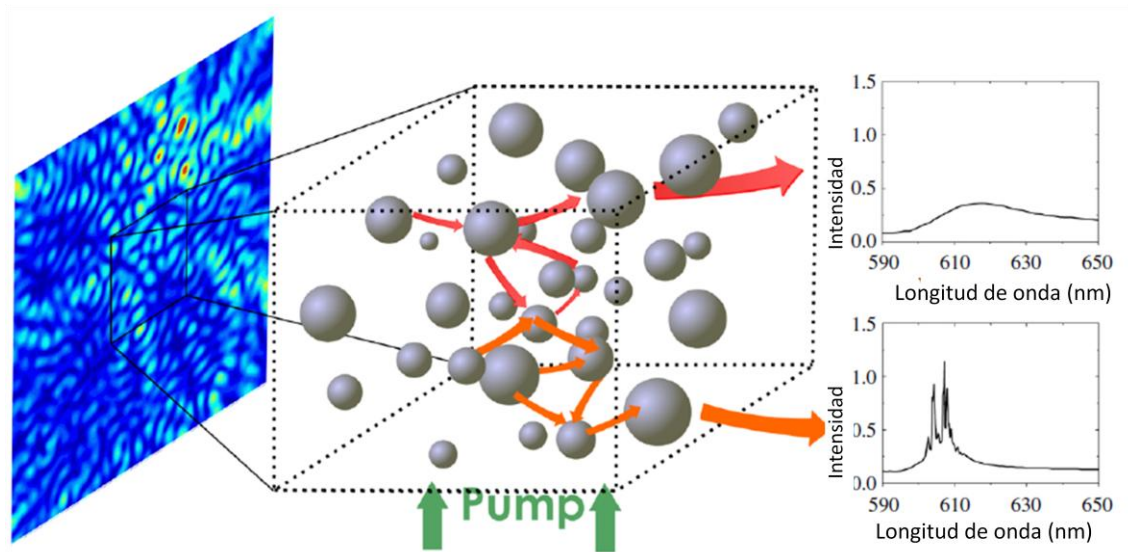


Figura 1.11. Representación de la emisión random

El esquema básico de un láser, que ya se ha explicado con anterioridad en este mismo capítulo, está compuesto por un medio de ganancia y una cavidad óptica que confine la luz y genere realimentación positiva y, por lo tanto, la ganancia en la fibra supere a las pérdidas inducidas por ella misma. Las características del funcionamiento de los láseres convencionales están determinadas por la ganancia del medio y por el diseño de la cavidad, lo que determina los modos de emisión, divergencia, polarización, etc. Sin embargo, en los láseres random, que no tienen una cavidad tradicional o la cavidad es abierta, las características de la señal de salida se determinan por cómo se va construyendo la radiación por scattering/dispersión múltiple en el medio de ganancia, dando lugar a modos espaciales localizados de forma aleatoria que coexisten con modos no localizados. Es por ello que las propiedades del material en los láseres random son de tanta importancia. La naturaleza de los modos de emisión en un medio random aun está siendo investigada debido a su gran complejidad, ya que la luz se dispersa de forma aleatoria siguiendo caminos complicados y generando espectros diferentes, ya que es poco direccional, como se muestra en la Figura 1.11.

El principio de operación (simplificado) de un láser de fibra óptica random con realimentación distribuida es el siguiente y se ilustra en la Figura 1.12. Los fotones que se propagan a lo largo de la fibra se dispersan de forma coherente debido a las inhomogeneidades aleatorias del índice de refracción de la fibra siguiendo el efecto

Rayleigh. La mayoría de estos fotones dispersados salen del núcleo de la fibra, y sólo unos pocos son dispersados en dirección opuesta a la de transmisión y guiados por la fibra. Si se bombea la fibra transmisora con un láser de bombeo Raman, se genera ganancia Raman a lo largo de toda la fibra (amplificador Raman distribuido) y los fotones dispersados en dirección contraria y guiados por la fibra se amplifican, resultando así en un láser random.

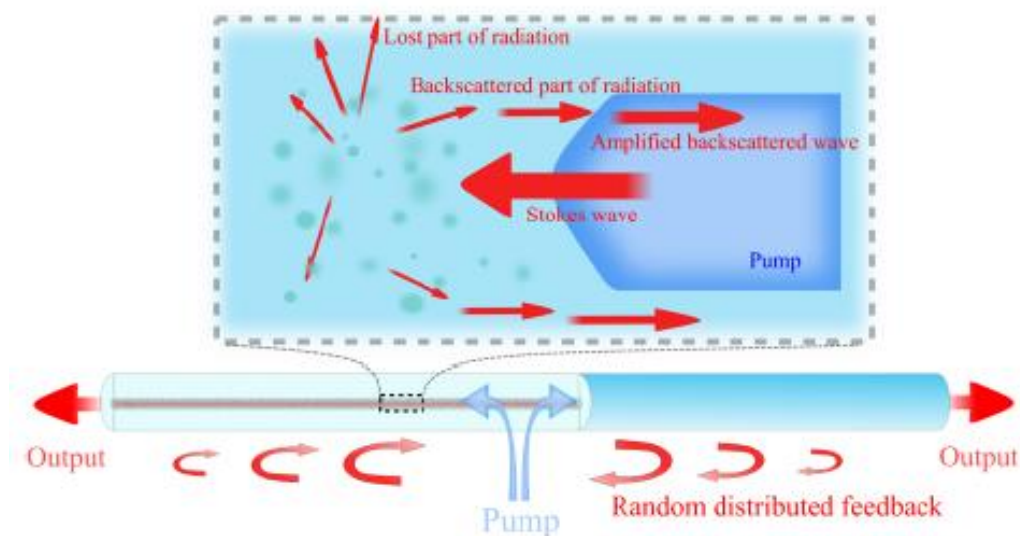


Figura 1.12. Explicación gráfica de un láser random con realimentación distribuida

iv) Láseres de fibra multi-longitud de onda

El término de láseres de fibra multi-longitud de onda se utiliza para denotar a los láseres que generan simultáneamente más de una longitud de onda en una única cavidad. Presentan una gran variedad de ventajas como la posibilidad de operar con varias longitudes de onda, estructuras simples, alta potencia, baja intensidad de ruido, coste y pérdidas de inserción bajas y compatibilidad con otros componentes de fibra. Ha atraído especial interés debido a las técnicas de multiplexación densa en longitud de onda, que son la solución más adecuada para los sistemas de comunicaciones de alta capacidad. Los requisitos para este tipo de fuentes incluyen que existan un número de canales elevado en un ancho de banda amplio, potencias de salida moderadas y espectro plano, espaciado de longitudes de onda estable y preciso, potencia uniformemente distribuida entre todos los canales, fluctuaciones de potencia

pequeñas en cada canal individual, flexibilidad y posibilidad de generar las líneas de emisión a las frecuencias marcadas por las rejillas frecuenciales contempladas en las diferentes especificaciones de la ITU (International Telecommunication Union).

Los láseres multi-longitud de onda basados en semiconductor pueden operar de forma estable a temperatura ambiente, pero no son estructuras realizadas en su totalidad de fibra. Además, tienen pérdidas de inserción elevadas, dependen de la polarización y son sensibles a los cambios de temperatura.

Otra posibilidad son los láseres de fibra dopada con Erblio. Estos ofrecen una buena eficiencia de conversión a altas potencias pero no son muy estables operando con múltiples longitudes de onda, especialmente si el espaciado entre líneas es estrecho.

Los láseres Raman de fibra son una buena solución para las desventajas de los láseres de fibra dopada con Erblio en la generación de láseres multi-longitud de onda. Ofrecen una relación de extinción grande y flexibilidad en la emisión a diferentes longitudes de onda en un gran ancho de banda. Por lo tanto son perfectos para la multiplexación en longitud de onda densa.

1.4. Sensores de fibra óptica

Un sensor de fibra óptica puede definirse como un dispositivo en el cual la señal óptica se modula en respuesta a la variación de cierto parámetro (físico, químico o biológico) de manera que la magnitud medida puede ser recuperada procesando la señal óptica. El principio básico consiste en que la luz (normalmente un láser que emita a una sola frecuencia) se envía a través de una fibra óptica y la señal interactúa con el parámetro que queremos medir y experimenta cambios, ya sean de intensidad, fase, polarización o longitud de onda. Cuando la luz llega al elemento detector se miden las variaciones de la señal y así se determina cómo ha variado el parámetro a controlar. Independientemente del tipo de sensor, la modulación de la luz debe ser procesada y eso conlleva una previa conversión al dominio eléctrico.

Una clasificación genérica de los tipos de sensores de fibra óptica se muestra en la Tabla 1.3 basándose en diferentes criterios. En primer lugar, de acuerdo con el

dominio y tipo de magnitud que queremos medir; en segundo lugar, de acuerdo la distribución espacial de la magnitud a medir; en tercer lugar, según la naturaleza de la transformación y en último lugar según el tipo de modulación utilizada.

Sensores de fibra óptica			
Magnitud a medir	Distribución espacial de la magnitud a medir	Mecanismo de transformación	Modulación de la luz
Mecánica	Discreta	Intrínseco	Intensidad (amplitud)
Térmica	Distribuida	Extrínseco	Interferométrica (fase)
Electromagnética	Quasi-distribuida		Polarización
Turbulencia			En longitud de onda
Química			
Radiación			
Biomédica			
Nivel de líquido			

Tabla 1.3. Clasificación de sensores de fibra ópticas

Los sensores de fibra óptica han atraído mucho interés debido a que solventan todos los problemas de los sensores convencionales. Sus principales ventajas son:

- Son electromagnéticamente pasivos
- Son química y biológicamente inertes, ya que la sílice de la que están hechos es resistente a la mayoría de los agentes químicos y biológicos.
- Pueden ser de pequeño tamaño y peso, lo que es positivo en algunas aplicaciones como la medicina.
- Debido a la baja atenuación que experimentan las señales en la fibra, es posible la monitorización distribuida, donde la magnitud a medir puede determinarse como una función de la posición a lo largo de la fibra y así solo interrogar desde un extremo de la fibra.
- Pueden utilizarse para monitorización remota. Con fibra óptica se pueden operar a muy largas distancias y el sensor puede estar situado a muchos kilómetros de distancia de la estación de monitorizado y aun así intercambiar información con el sensor.
- Se pueden multiplexar decenas, incluso centenas de sensores en una misma red.

A pesar de sus muchas ventajas, también tienen inconvenientes, como por ejemplo sensibilidad cruzada. Además suelen suponer un coste mayor a los sensores convencionales diseñados con tecnologías tradicionales.

1.4.1. Redes de difracción de Bragg

Los sensores fabricados con redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg Gratings, FBGs) son los principales sensores de fibra óptica debido a que se consideran la tecnología líder en comparación con otros sensores de fibra óptica.

Los FBGs son sencillos y versátiles y tienen todas las ventajas de los sensores de fibra óptica anteriormente mencionados. Además, la información de la magnitud a medir está en la longitud de onda resonante de la estructura, que es un parámetro absoluto, con lo que son dispositivos que no necesitan de referenciarse y pueden ser fácilmente multiplexados, lo cual es de gran importancia en redes multipunto.

Un FBG puede definirse como una perturbación periódica del índice de refracción a lo largo de la fibra. Esto se consigue por exposición del núcleo de la fibra a un patrón de interferencia intenso. Dependiendo de la modulación del índice de refracción, se crean diferentes tipos de redes de difracción de Bragg.

La siguiente figura muestra el principio de funcionamiento de los FBGs: cuando la luz atraviesa la estructura resonante, a una determinada longitud de onda, denominada longitud de onda Bragg, la luz se refleja por la zona de perturbación del índice de refracción. La longitud de onda reflejada satisface la denominada condición de Bragg:

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

Donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra y Λ es el periodo de la modulación del índice de refracción. El resto de las longitudes de onda se transmiten y para ellas la modulación del índice de refracción es como si no existiese.

La condición de Bragg muestra la característica clave de estas estructuras: cualquier perturbación que modifique el índice de refracción o el periodo de la red de difracción resulta en un aumento de la longitud de onda de Bragg. Por lo tanto, las redes de difracción de fibra se pueden considerar como un transductor óptico que modifica el espectro de la luz reflejada. La posibilidad de almacenar la información en

la longitud de onda es una característica única de las redes de difracción de Bragg. Como la longitud de onda es un parámetro absoluto, este proceso es insensible al resto de parámetros de la luz a lo largo del sistema, como intensidad, polarización y fase. Estas características así como la posibilidad de multiplexarlos hacen que tengan ventaja frente a otros sensores de fibra óptica.

1.4.1.1. Principio de medida

Los sensores FBG pueden medir deformaciones, temperatura, presión, campos eléctricos y magnéticos dinámicos, vibraciones, algunos fenómenos químicos, entre otros. La longitud de onda central del FBG varía en función de cómo cambian estos parámetros en la fibra. Las deformaciones y la temperatura han sido las magnitudes de mayor interés para medir con este tipo de sensores, y se explican un poco más en profundidad a continuación:

i) Deformación

La deformación afecta directamente a la respuesta del FBG, debido a que la expansión y compresión del tamaño de la red de difracción ocasionan modificaciones en el índice de refracción debido a efectos foto-elásticos.

La variación relativa de la longitud de onda para una deformación longitudinal es:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - \rho_\alpha)\Delta\varepsilon$$

Donde ρ_α es el coeficiente foto-elástico de la fibra.

ii) Temperatura

La sensibilidad a las variaciones de temperatura de los FBGs se debe principalmente al efecto que ocasiona en el índice de refracción y a la expansión térmica del coeficiente de la fibra. Para un incremento de temperatura ΔT , el correspondiente incremento en longitud de onda $\Delta\lambda_B$ viene dado por:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha - \xi)\Delta T \approx \lambda_B(1 - \xi)\Delta T$$

Donde ξ es el coeficiente termo-optico de la fibra y α es el coeficiente de expansión térmica.[12]

1.4.2. Sensores interferométricos

La interferencia es un fenómeno que consiste en que dos o más ondas se superponen, creando una nueva onda. Esta interferencia puede ser constructiva o destructiva.

El interferómetro es un instrumento que emplea la interferencia de las ondas de luz para medir con gran precisión las longitudes de onda de la misma luz. Hay muchos 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 espejos 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).

1.4.2.1. Interferómetro de Sagnac

En la Figura 1.13 se presenta la estructura correspondiente a un reflector o espejo de fibra, también denominado Interferómetro de Sagnac. Está constituido por un tramo de fibra óptica de longitud L , que se conecta a las salidas de un acoplador.

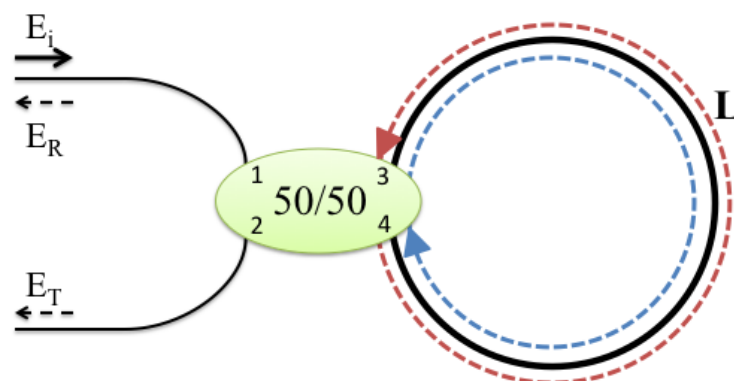


Figura 1.13. Configuración de un interferómetro Sagnac de fibra óptica

Su funcionamiento es el siguiente: se introduce 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).

Las señales que se combinan en el acoplador y se dirigen hacia el puerto 2 han recorrido el mismo camino en sentido opuesto, por lo que están desfasadas entre sí debido al efecto del acoplador. Si las amplitudes de ambas contribuciones son las mismas (acoplador 50:50), entonces ambas señales tienen la misma amplitud pero fase opuesta, lo que resulta en una interferencia destructiva y la señal a la salida es nula.

Si la estructura del interferómetro no es pasiva y se introducen elementos que alteran esta situación de equilibrio, el interferómetro Sagnac adquiere interesantes aplicaciones como sensor.

Una forma de alterar esta situación de equilibrio es utilizando en el interferómetro fibra óptica altamente birrefringente, como lo es la fibra de cristal fotónico PCF. Figura 1.14

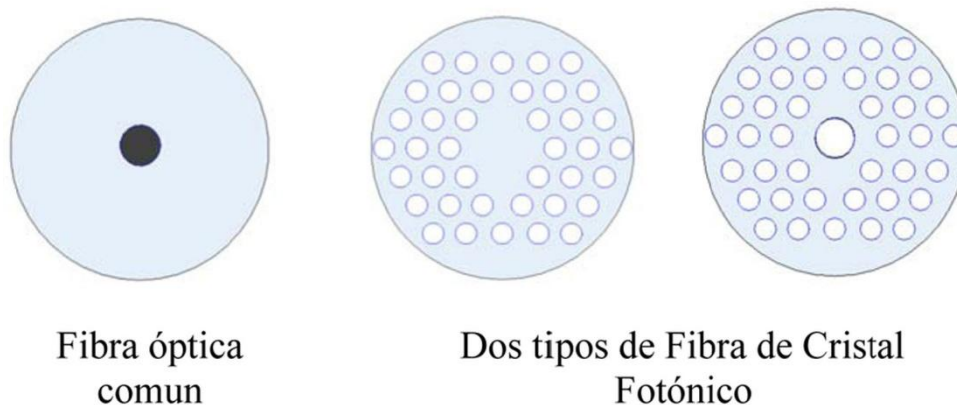


Figura 1.14. Comparativa entre fibra óptica común y fibra de Cristal fotónico

La **birrefringencia o doble refracción** es una propiedad óptica de ciertos cuerpos, de desdoblarse un rayo de luz incidente en dos rayos linealmente polarizados de manera perpendicular entre sí como si el material tuviera dos índices de refracción distintos.

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 los 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, implicando una diferencia de fase entre las ondas propagadas.
[13]

Capítulo 2. Laser conmutable multi-longitud de onda para comunicaciones ópticas y sensores

2.1 Introducción

La tecnología láser multi-longitud de onda es un campo que actualmente atrae la atención de la comunidad científica debido a su aplicación en comunicaciones ópticas, instrumentos de testado, procesamiento de señales ópticas y sistemas de sensores de fibra óptica [1]. En los últimos tiempos, más que nunca, esta tecnología ha atraído interés debido a los sistemas de comunicación basados en la multiplexación densa por división en longitud de onda (DWDM), que es la solución más atractiva para los sistemas de comunicación de alta capacidad. También presenta una gran variedad de ventajas: operar con varias longitudes de onda, estar compuesto por estructuras simples, alta potencia, intensidad de ruido baja, tecnología barata y con bajas pérdidas de inserción así como compatibilidad con otros componentes de fibra óptica.

Hay diversos métodos para crear láseres de fibra óptica multi-longitud de onda basados en diferentes medios de ganancia, tales como amplificadores de fibra dopada con Erblio (EDFAs), amplificadores de semiconductor (SOAs) o Amplificadores Raman.

En primer lugar, los láseres multi-longitud de onda basados en fibra dopada con Erblio ofrecen alta eficiencia de conversión en potencia. Aun así, es difícil conseguir operar de manera estable en longitud de onda, especialmente para distancias pequeñas en longitud de onda, debido al ensanchamiento homogéneo de las líneas de emisión a temperatura ambiente.

En segundo lugar, los láseres basados en SOAs (Amplificador Óptico de Semiconductor) pueden operar de manera estable a temperatura ambiente pero no

son estructuras basadas en fibra, con lo cual tienen pérdidas de inserción relativamente altas. Además, dependen fuertemente de la polarización y son muy sensibles a los cambios de temperatura, aspectos muy negativos para las aplicaciones deseadas.

Finalmente, los láseres multi-longitud de onda de fibra óptica basados en el efecto de amplificación Raman han sido investigados en profundidad en vista de sus ventajas tales como: alta relación de extinción, gran número de canales en un ancho de banda grande, alta potencia de salida uniformemente distribuida en los canales, espaciado en longitud de onda preciso y estable y una baja fluctuación de potencia en cada canal. Por lo tanto, los láseres de fibra multi-longitud de onda basados en efecto Raman son muy adecuados para sistemas DWDM debido a las características anteriormente descritas.

2.2 Desarrollo experimental

El principal objetivo de este capítulo consiste en la creación de un láser *random* de fibra óptica multi-longitud de onda formado por un espejo distribuido, concepto explicado en detalle en el capítulo 1.3.3. La característica de conmutación del espectro multi-longitud de onda de emisión se consigue por medio del filtrado de manera dinámica que nos permite disponer de una emisión láser basada en cavidades de fibra óptica totalmente reconfigurables.

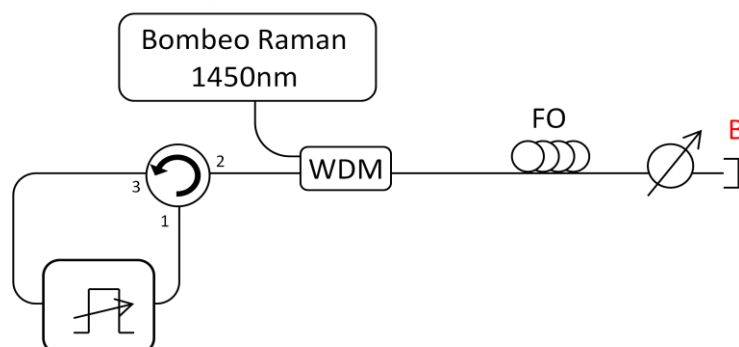


Figura 2.1 Representación esquemática del láser conmutable multi-longitud de onda

En la figura 2.1 se muestra el diseño del sistema básico. La estructura laser está basada en una cavidad formada por dos espejos. El primero, en la parte derecha, es un espejo distribuido a lo largo de una fibra (posteriormente se presentarán las caracterizaciones para fibras DCF y SMF) y el segundo (lado izquierdo) es un espejo en fibra el cual fue creado conectando los puertos 1 y 3 de un circulador como se muestra en la figura 2.1. Este espejo tiene además la función de filtrar la cavidad y así seleccionar el perfil del espectro deseado de nuestro láser reconfigurable. Para conseguir esto se ha utilizado un filtro programable y reconfigurable WS (WaveShaper 1000S de la empresa Finisar).

El principio de funcionamiento de este sistema es el siguiente: El espejo creado con el circulador recibe la luz reflejada en el espejo distribuido a través del puerto 2 del circulador. Una vez la luz esta dentro del espejo (entre los puertos 3 y 1) se filtra la señal con el filtro reconfigurable y la luz sale de nuevo por el puerto 2 hacia el espejo distribuido.

El espejo distribuido random, cuyo funcionamiento se ha explicado en profundidad en el 1.3.3. iii), es el resultado de las múltiples dispersiones Rayleigh generadas en la fibra que son amplificadas gracias al efecto Raman (capítulo 1.2.1.2.). Esto hace que se genere amplificación distribuida a lo largo de la fibra, potenciando la amplificación de las longitudes de onda seleccionadas mediante el filtro reconfigurable con lo cual, ya tendríamos nuestra estructura resonante con espejo al inicio y al final en el que, cuando la ganancia de la cavidad es superior a las pérdidas introducidas por la fibra, conseguiremos cumplir la condición de laser.

Con el objetivo de mejorar la primera propuesta del sistema, se contempló la posibilidad de incluir un amplificador de fibra dopada con Erblio (EDFA), capítulo 1.2.1.1. La utilización de éste es debida a que ayuda a ampliar el espectro útil, así como aumentar la potencia de salida del láser. El sistema mejorado se muestra a continuación en la **Figura 2.2**, en el cual se ha añadido el EDFA a la salida del filtro programable WS. Se podría haber incluido antes del mismo, pero como el filtro programable es un aparato sensible a altas potencias es preferible no someterlo a demasiada para no dañarlo. Esto convierte al láser en un láser híbrido Raman/Erblio, ya que ambos proporcionan ganancia al sistema.

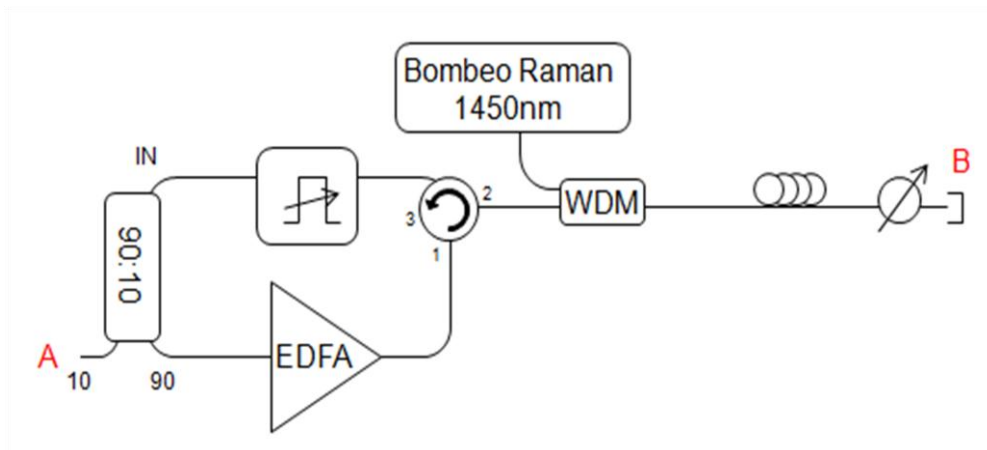


Figura 2.2 Representación esquemática del láser conmutable multi-longitud de onda con EDFA

También se observa en el esquema que se han considerado dos salidas del láser. Una situada en la cabecera del mismo y otra al final del carrete de fibra. Cada salida tiene sus ventajas e inconvenientes. La salida de la cabecera en A, es menos ruidosa ya que se recoge la señal justo después de filtrarla. Sin embargo es mucho menos potente que si tomamos la salida en B.

Uno de los componentes clave de esta estructura es el filtro programable (WS), encargado de seleccionar las longitudes de onda de emisión. Por este motivo, se creó un software que permite elegir tanto la anchura de las líneas, como la distancia entre ellas, el número de líneas, etc. y así tener la versatilidad buscada. Este software ha sido desarrollado en Labview. Controla un analizador de espectros ópticos (OSA) así como el WS. Los programas desarrollados están descritos en detalle a continuación.

2.2.1 Desarrollo del software de control.

Una de las primeras partes desarrolladas en el proyecto fue el software de control de los instrumentos. Parte fundamental y sin la cual no se habría podido desarrollar el láser multi-longitud de onda deseado. Así pues, explicaremos a continuación los diferentes programas utilizados, desarrollados y su funcionamiento. Todo el software utilizado está realizado con LabView mayoritariamente, y ciertos

programas concretos con Matlab. Para más información de cada uno de los programas, véase el Anexo A.

2.2.1.1 Diseño del programa de ecualización de líneas de emisión

El programa principal, y gracias al cual se han conseguido los resultados, es el programa generador y ecualizador de las líneas de emisión a diferentes longitudes de onda. El diagrama de bloques de este programa se muestra en la **figura 2.3**.

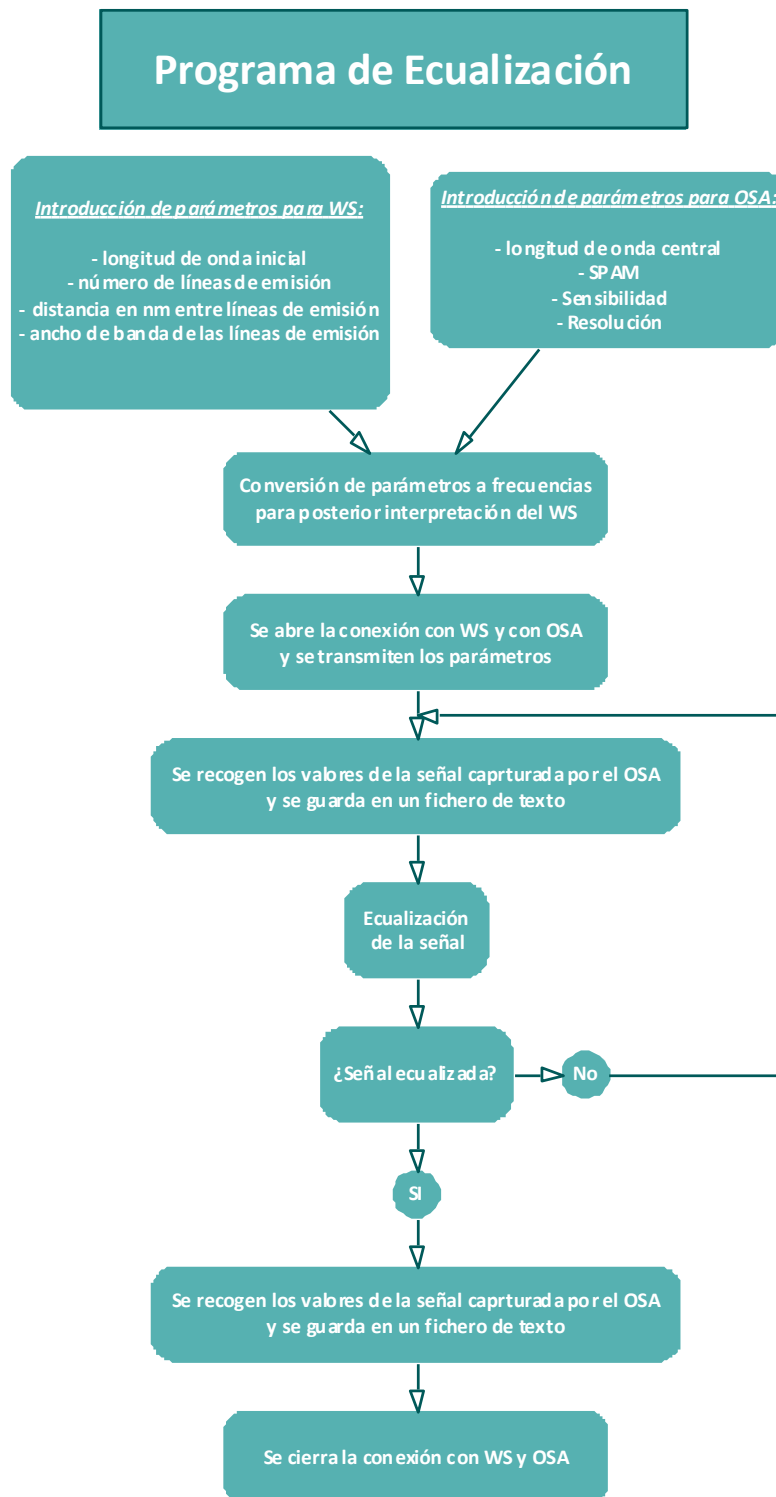


Figura 2.3. Diagrama de bloques del programa generador y ecualizador de la señal

Como se observa en este diagrama, el primer paso es la adquisición de todos los parámetros, tanto para la generación del láser (valores destinados al filtro programable WS, pieza clave para el desarrollo del láser) como para medir los resultados con el OSA.

Se elige la longitud de onda inicial, la separación entre líneas de emisión, el ancho de banda de las mismas y se envían estos datos al filtro programable WS a través de un puerto USB. También elegimos el ancho de banda, sensibilidad, resolución y la longitud de onda central del espectro que queremos monitorizar en el OSA, enviados a través del puerto GPIB.

Una vez transmitidos los parámetros a todos los dispositivos activos y generado el láser, se avanzaría hacia el proceso de ecualización, es decir, igualar en potencia todas y cada una de las líneas de emisión generadas, con un cierto margen entre la más y la menos potente. Este margen se ha fijado por defecto en 1dB.

La figura 2.4 muestra en más detalle cómo se lleva a cabo el proceso de ecualización. En definitiva se trata de recoger el dato de potencia máxima de cada una de las líneas de emisión generadas, comparar la mayor con la menor potencia registrada y aplicar un factor corrector de atenuación a las líneas de emisión más potentes. Así, de forma iterativa hasta conseguir que la diferencia entre la más y la menos potente sea menor a 1 dB. Este proceso puede durar desde escasos segundos a varios minutos, en función del número de líneas de emisión generadas, su separación, el ancho de banda de cada una de ellas, así como del factor corrector elegido en cada iteración del proceso de ecualización.

Sin embargo, también podríamos reducir ese tiempo aplicando directamente los perfiles de atenuación guardados (como si se tratase de una librería de perfiles de atenuación), previamente calculados para diferentes configuraciones del láser. De esta manera sólo sería necesaria una ecualización mínima con un factor de corrector pequeño para ajustes más finos en potencia, porque la mayor parte del proceso ya estaría realizado.

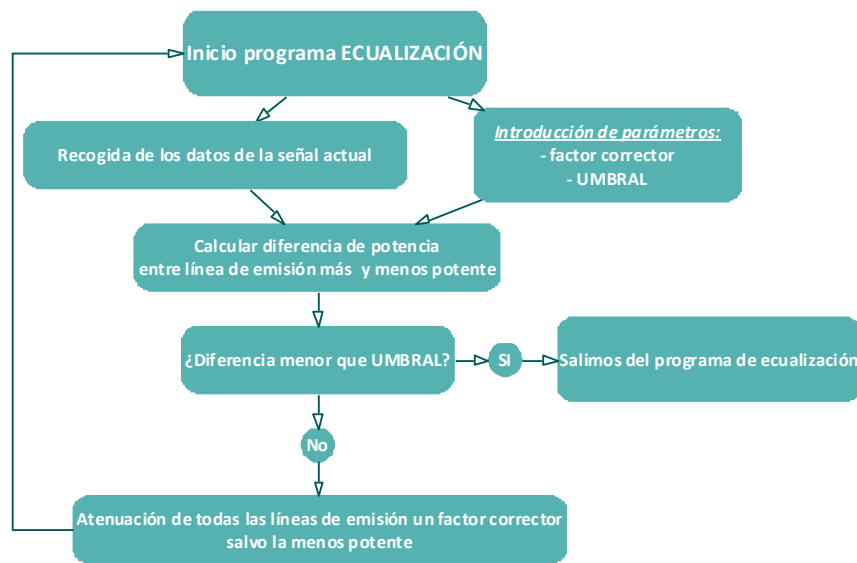


Figura 2.4. Diagrama de bloques del proceso específico de equalización

En la Figura 2.5 se muestra un ejemplo de una señal generada por el sistema antes de pasar por el proceso de equalización, el perfil de atenuación calculado por el programa desarrollado y el láser multi-longitud de onda final tras la equalización.

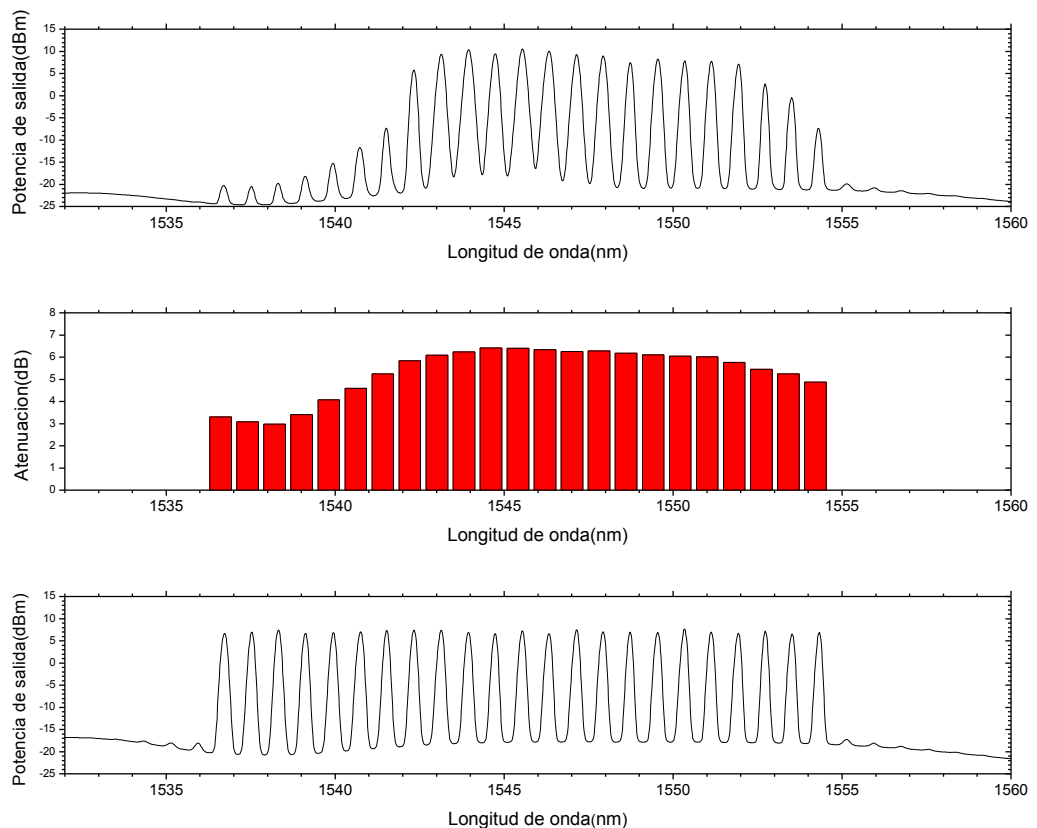


Figura 2.5. Señal generada sin equalizar, perfil de atenuación calculado y señal final equalizada

Se observa que la potencia se redistribuye y que se atenúan fuertemente las líneas de emisión más potentes y esa potencia se transfiere a las menos potentes. Se obtiene como resultado un perfil de atenuación con una forma similar al espectro de partida. Sin embargo, en el perfil de atenuación se verifica que al final se han atenuado algo todas las líneas de emisión. Según el principio de operación del programa de ecualización, debería haber al menos una que no haya sido atenuada, la que desde un primer momento tenía menos potencia. Esto es debido a que se han empleado unos coeficientes de atenuación demasiado elevados, y en alguna iteración se ha atenuado alguna línea de emisión de más, y después se ha tenido que rectificar.

2.2.1.2 Diseño del programa de eliminación de líneas de emisión

Después de haber diseñado el programa de ecualización, se consideró que el láser multi-longitud de onda fuese aún más flexible y por ese motivo se planteó la posibilidad de, además de ecualizar peines de líneas de emisión, se pudieran eliminar a voluntad consiguiendo innumerables combinaciones en función de la aplicación para la que se quiera utilizar. De esta manera, permite la generación de las líneas de emisión deseadas, se eliminan las no deseadas y se ecualizan el resto. El diagrama de bloques del programa para la eliminación de líneas de emisión se muestra a continuación en la figura 2.6:

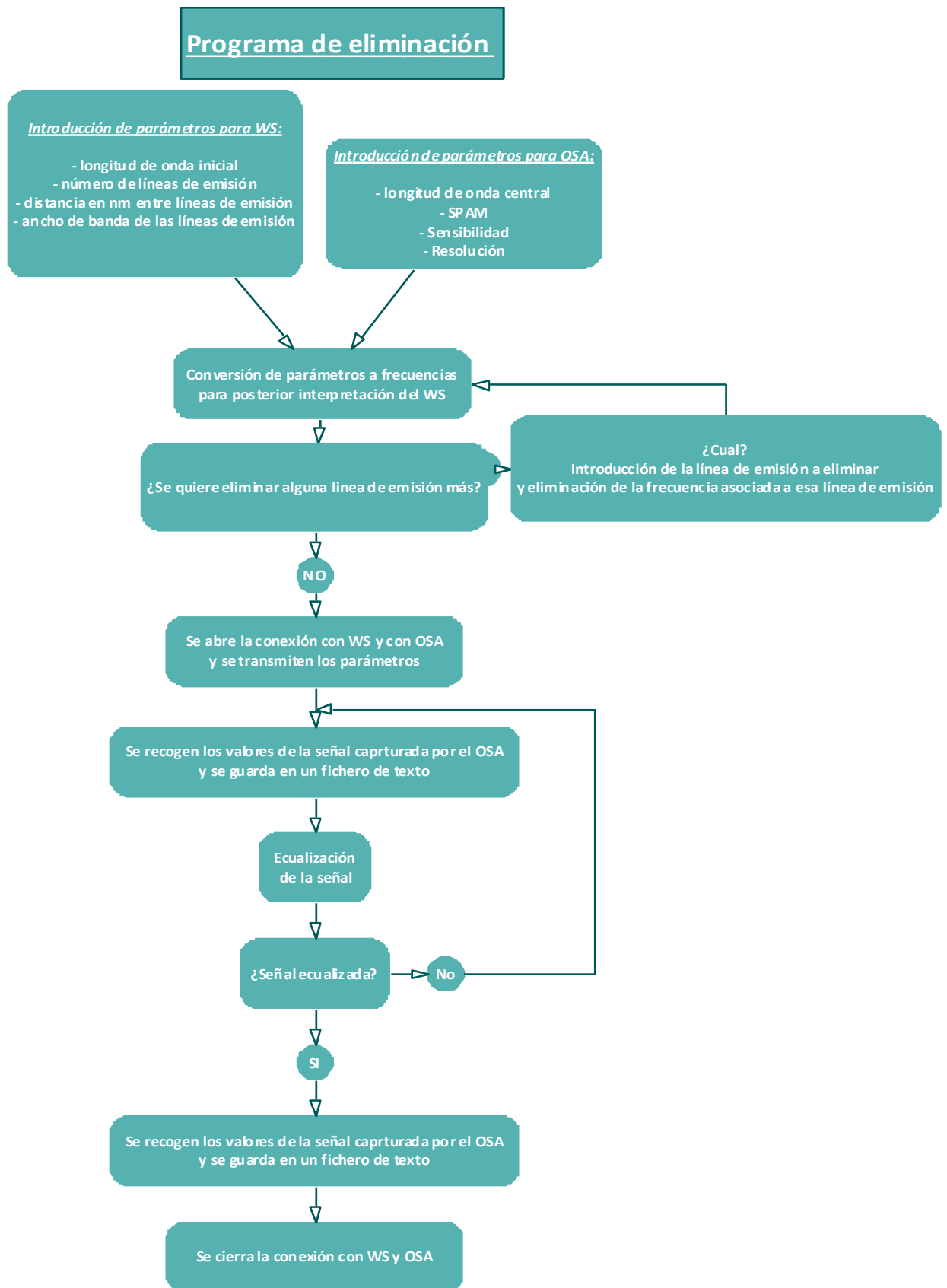


Figura 2.6. Diagrama de bloques del programa para la eliminación de líneas de emisión

Desde el panel frontal, se elige, además de todos los parámetros mencionados en el programa de generación y ecualización, el número de líneas de emisión que queremos eliminar (primera, segunda...) y ya no se tiene en cuenta para la ecualización del resto de líneas. El programa es exactamente igual que el de ecualización pero incluyendo un bloque que elimina la línea deseada. Se puede eliminar un láser en cada iteración de la ecualización y hasta tantos como se desee, creando multitud de combinaciones.

2.2.1.3 Mejora del programa para la caracterización de la estabilidad

Se ha utilizado como base un programa anteriormente desarrollado en el equipo de investigación, adaptándolo y mejorando funcionalidades como aumentar el número de puntos recogidos en cada toma de datos. El objetivo de este programa es recoger los datos de potencia de la señal generada cada 'x1' segundos, y se mide durante 'x2' tiempo en total, lo que nos da la estabilidad de señal, y por lo tanto la del láser.

Previamente se generan con el programa de ecualización las líneas deseadas. Una vez generadas y ecualizadas, sin modificar esa configuración, mediremos la señal recibida en los instantes definidos. Después se tratan esos datos con Matlab para calcular la variación máxima de la potencia en los diferentes instantes medidos. Así es como se obtiene la estabilidad del láser. Véase la **Figura 2.7**.



Figura 2.7 Diagrama del programa para medir la estabilidad

El programa de Matlab identifica la potencia de cada uno de las líneas de emisión generadas en cada instante de medida y lo almacena en una matriz para después comprobar la variación máxima de potencia a lo largo del tiempo total de medida. Se toma el caso peor y esa será la estabilidad tomada como referencia que define al láser.

2.2.1.4. Diseño del programa para conmutar diferentes perfiles

Se quiso diseñar un programa para medir cuánto tiempo tardaba el láser en estabilizarse al pasar de una configuración de líneas de emisión a otra diferente.

Para ello, se guardaron los perfiles de atenuación del filtro reconfigurable WS de dos configuraciones distintas y se incluyeron en el programa directamente. Así, en vez de ecualizar la señal de forma iterativa, se hace de una sola vez y se observa el

cambio entre una configuración y otra. Por lo tanto, se elimina el bloque que calcula las longitudes de onda de las líneas de emisión, así como su ancho de banda y se añade un nuevo bloque que lo introduce directamente desde la librería de perfiles de equalización.

El programa en Labview está duplicado y en cascada, para que se genere una configuración y se ecualice directamente sin iteraciones, y a continuación se genere el otro perfil de emisión. Así se observa el tiempo de transición entre una configuración y otra. El diagrama de bloques de este programa se muestra en la **figura 2.8**.

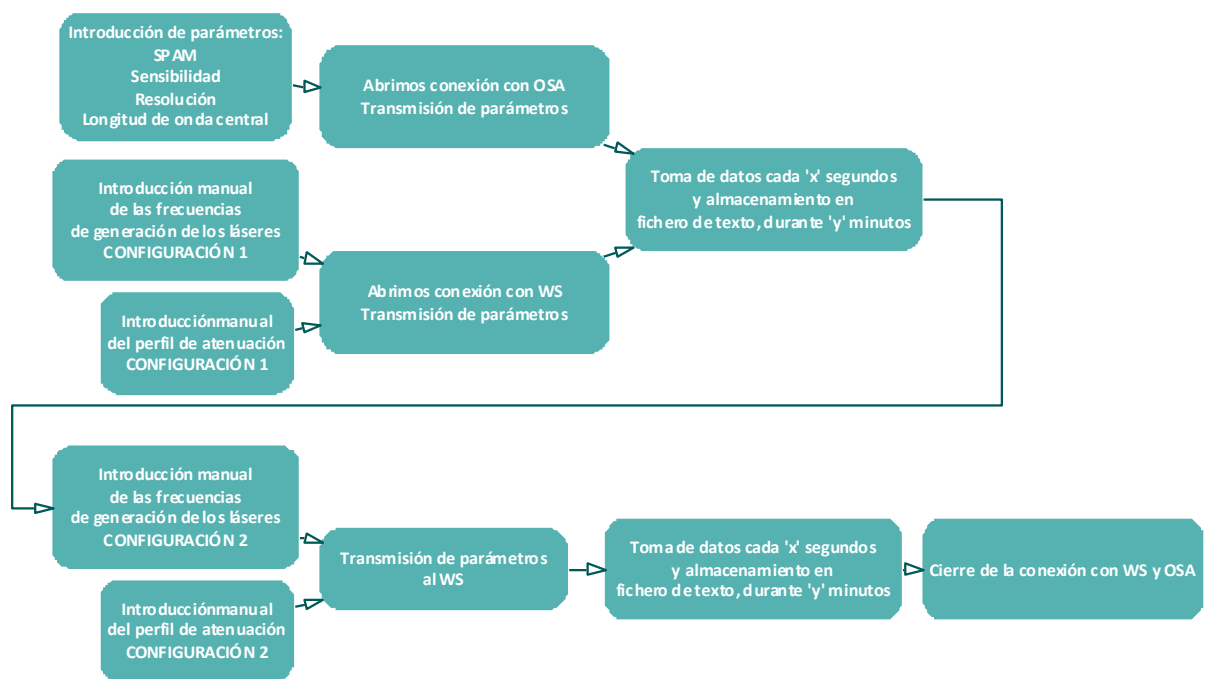


Figura 2.8. Diagrama del programa para medir transitorio

2.2.1.5. Mejora del programa de caracterización de la curva de emisión láser

Se ha utilizado como base un programa anteriormente desarrollado en el equipo de investigación, mejorándolo e incorporando un programa que procesa los datos recogidos. Este programa fue diseñado para determinar el punto óptimo de emisión láser así como para demostrar que se cumple la condición láser. El programa

que recoge los datos está desarrollado en Labview íntegramente. Previo a este programa, se ha ejecutado el programa de generación y ecualización, el cual genera las diferentes líneas de emisión a las longitudes de onda deseadas, pero se ha eliminado la parte de ecualización, ya que solo interesa que se genere el filtrado a ciertas longitudes de onda pero sin ecualizarlas. A continuación, se ejecuta el programa, mostrado en la **Figura 2.9**, para después procesar los datos obtenidos y almacenados en ficheros de texto con Matlab.

En el programa de Matlab se recogen los datos de potencia de salida obtenidos de las distintas líneas de emisión generadas y se observa cómo evoluciona su potencia a medida que aumentamos la potencia de bombeo Raman. La representación de estos dos parámetros nos dará la curva de emisión del láser.

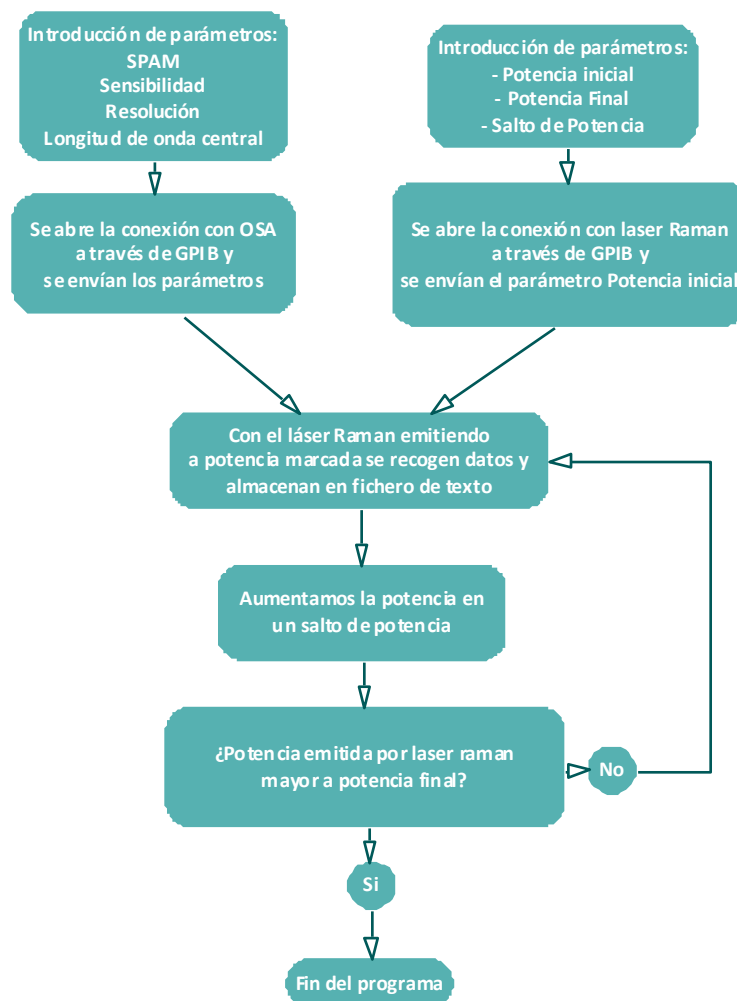


Figura 2.9. Diagrama del programa para medir la curva de emisión del láser

2.2.2 Láser multi-longitud de onda con fibra DCF

Se ha caracterizado el láser random con dos tipos de fibra, DCF y SMF. Para el primer caso se ha utilizado un carrete de fibra DCF (Fibra compensadora de dispersión) de 2.5 km. El sistema analizado se muestra en la Figura 2.10.

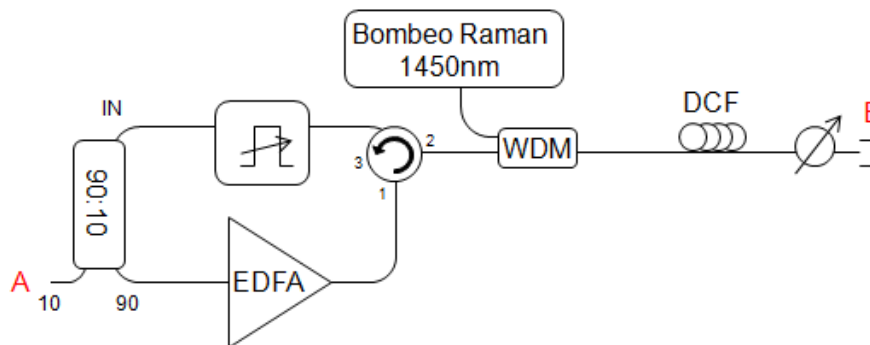


Figura 2.10. Sistema del láser multi-longitud de onda con fibra DCF

2.2.2.1 Resultados

En la Figura 2.11 se muestra el espectro sin filtrar resultante de la estructura 2.10. Como se puede observar tiene un máximo de potencia en torno a 1545 nm y un espectro de emisión láser de unos 5 nm. Aun así, con el software desarrollado para equalizar, se consigue ampliar mucho más el espectro útil, hasta unos 15-20 nm.

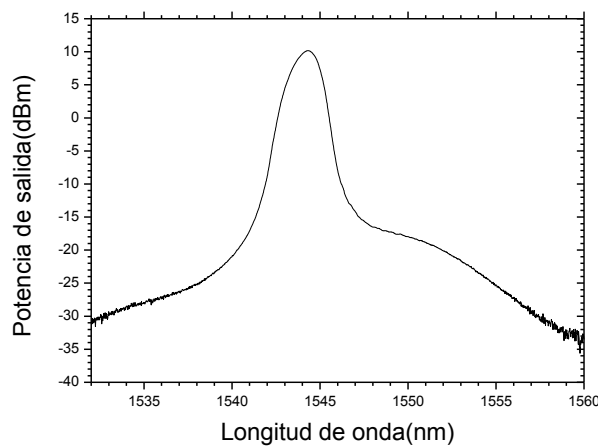


Figura 2.11 Espectro resultante de iluminar el sistema de la Fig.3.9

Como paso previo y con el objetivo de optimizar al máximo el láser, se hicieron varios estudios. El primero se realizó para buscar el ancho de banda óptimo de los láseres. Por lo tanto, se ha llevado a cabo un estudio haciendo un barrido de ancho de banda desde 0.08 nm (mínimo que nos permite el filtro WS) a 0.7 nm para determinar la anchura óptima en cuanto a eficiencia en potencia. En definitiva se ha ido generando una única línea de emisión, siempre a la misma longitud de onda, y se ha ido variando el ancho de banda de la misma, así como la potencia de bombeo Raman, y el gráfico resultante de ello se muestra en la Figura 2.12. Se ha utilizado el programa de generación y ecualización en Labview para la recogida de los datos, explicado en el capítulo 2.2.1.1.

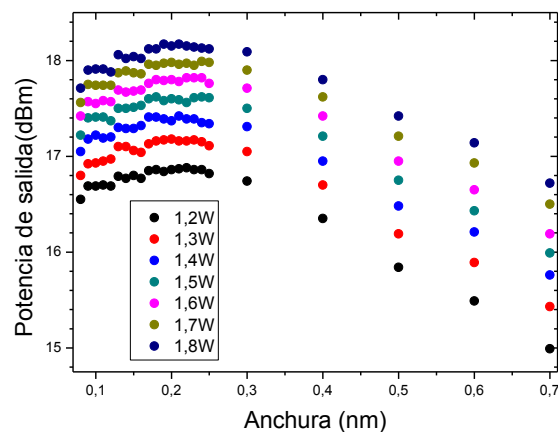


Figura 2.12. Estudio para optimización ancho de banda del láser

En el gráfico anterior se observa una misma tendencia para todas las potencias de bombeo. En verdad, las líneas imaginarias que seguirían los puntos son todas paralelas entre sí. Bien es cierto que no hay una gran diferencia de potencia entre los diferentes casos. Hay una variación máxima de 3 dB entre el mejor y el peor. Aun así, se observa un caso más favorable entorno a 0.2 y 0.3 nm de anchura del láser. Cuanto más estrecha sea la línea de emisión, más evidentes son los efectos no lineales por el efecto Brillouin ensanchando la línea e disminuyendo la potencia máxima. Por el contrario, cuanto mayor es la anchura de la línea, la eficiencia de amplificación por efecto Raman es menor distribuyendo la ganancia por una anchura de línea mayor.

Se podría pensar a raíz de esta gráfica que la mejor potencia de bombeo es 1.8 W porque conseguimos una mayor potencia de salida. Sin embargo, los próximos estudios de estabilidad y la caracterización de la emisión laser, determinarán la potencia ideal de bombeo. Además, a mayor potencia de bombeo el sistema comienza a aumentar también su inestabilidad y es más complicada la ecualización de los diferentes láseres, lo cual no es deseable.

A forma de completar el estudio, se obtuvo el gráfico que representa la potencia de salida del láser en función de la potencia de bombeo del láser Raman, **Figura 2.13**. Los datos necesarios para la representación de esta gráfica se consiguieron con el programa “Curva de emisión del láser”, explicado en el punto 2.2.1.5. Se observa que la curva de emisión tiene un punto de inflexión alrededor de 0.3 W de potencia de bombeo donde el sistema pasa del estado de emisión espontánea a emisión estimulada como se explica en el punto 1.1.2. En la parte inferior (figura 2.13 (b)) se muestra la diferencia en potencia de las líneas de emisión debido a la inestabilidad del sistema a las diferentes potencias de bombeo. En donde se juntan, alrededor de 1.6 W es el punto de mayor estabilidad del sistema, por tanto, el punto elegido como potencia de bombeo para los sistemas.

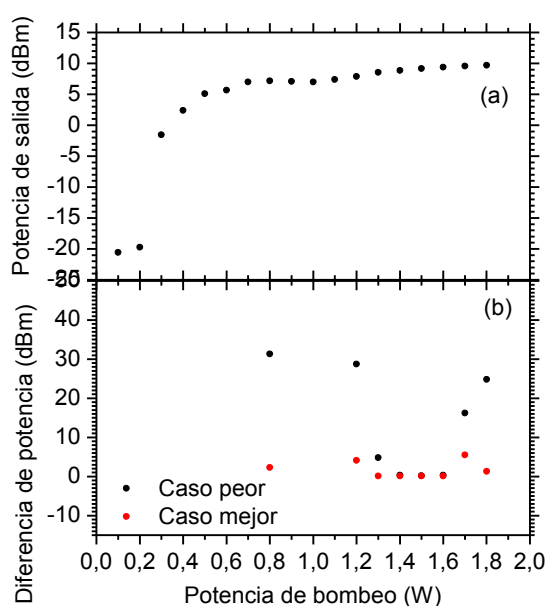


Figura 2.13 a) Curva de emisión del láser multi-longitud de onda con fibra DCF, b) diferencia de potencia máxima de una línea de emisión (estabilidad) para cada potencia de bombeo

Por otro lado, se ha medido la estabilidad del láser con el programa desarrollado en el punto 2.2.1.3 y los resultados se representan en la Figura 2.14. Como se puede observar, el láser es muy estable. La variación de potencia del mismo no es superior a 0.25 dB con lo que se puede concluir que es apto para las aplicaciones deseadas.

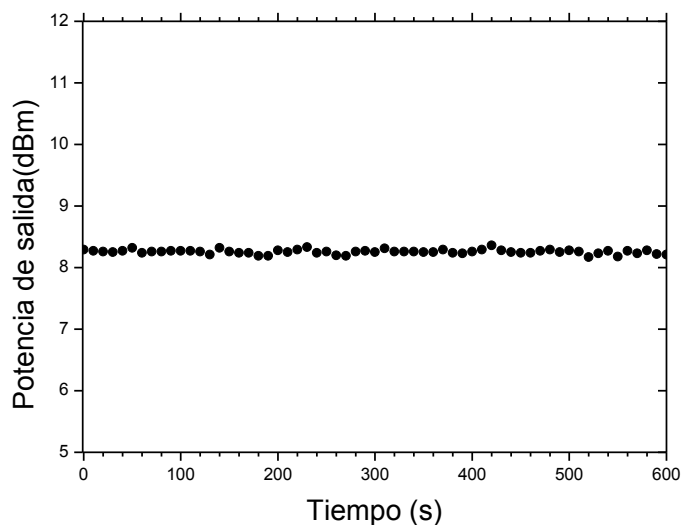


Figura 2.14. Estabilidad del láser multi-longitud de onda con fibra DCF

También se midió el transitorio entre dos configuraciones diferentes. Es decir, el tiempo que tarda el láser en cambiar de una configuración a otra totalmente diferente y en estabilizarse. Para ello se utilizó el software desarrollado para medir “transitorios” del punto 2.2.1.4. Previamente, se habían guardado los perfiles de atenuación de las dos configuraciones entre las que se hacía el cambio para así incluirlos en el programa. El OSA utilizado para todas las medidas tiene un tiempo de barrido de aproximadamente 3s, así que si el tiempo medido (figura 2.15) de re-estabilización del láser es menor a 3 segundos.

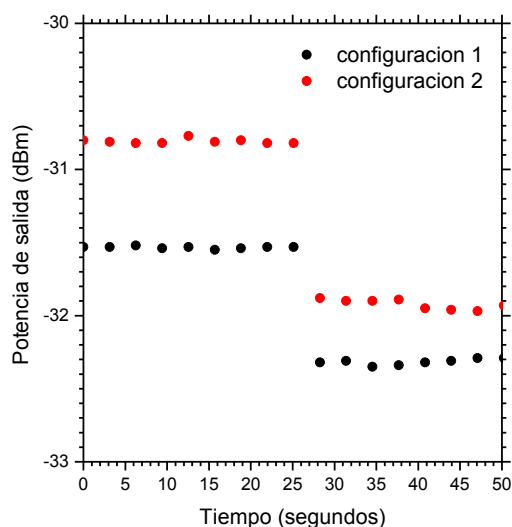


Figura 2.15. Caracterización del tiempo de tránsito entre dos líneas de emisión configuraciones diferentes.

Como podemos observar, en la Figura 2.15 se muestra la evolución de la potencia de dos picos generados en dos configuraciones de líneas de emisión diferentes. Se constata una gran estabilidad antes del cambio brusco y después, así como un tiempo de tránsito indetectable por nuestro OSA, con lo cual, menor a 3s. El cambio de potencia entre una configuración y otra se debe a que no se generaron el mismo número de líneas de emisión y la potencia se tuvo que repartir entre más líneas en la segunda configuración.

Podemos concluir que el láser es muy estable, además de que el tiempo de conmutación y re-estabilización entre una configuración y otra totalmente diferente es inferior a 3s, lo que lo convierte en un láser totalmente reconfigurable útil en multitud de aplicaciones en la que se requiera estabilidad y precisión.

Después de analizar cuál es el ancho de banda óptimo, se ha estudiado la distancia mínima entre los láseres en función de la anchura de los mismos. Se pueden generar láseres a casi cualquier distancia, pero es más interesante generarlos respetando las longitudes de onda de la rejilla frecuencial de las especificaciones de la ITU. Por lo tanto, se ha probado a generar láseres con separaciones de 0.2, 0.4 y 0.8 nm (25, 50 y 100 GHz). Se observa que una separación de 0.2 nm (Figura 2.16) resulta

en una señal totalmente insuficiente para las aplicaciones deseadas, ya que la relación de extinción es muy baja (en torno a los 10dB). Sin embargo, a partir de 0.4 nm en adelante (Figuras 2.17 y 2.18), la señal generada se ve afectada en menor medida por los efectos no lineales y el solapamiento entre líneas de emisión.

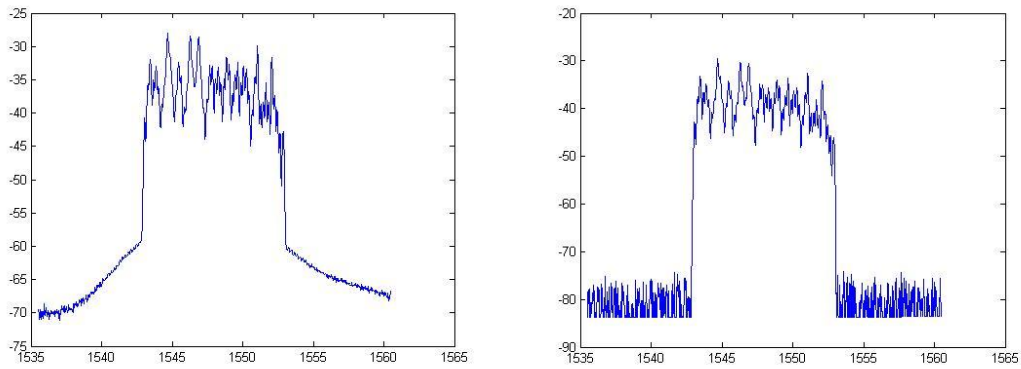


Figura 2.16 Láser multi-longitud de onda con 25 GHz (0.2 nm) de separación entre láseres. Potencia de salida en A y en B.

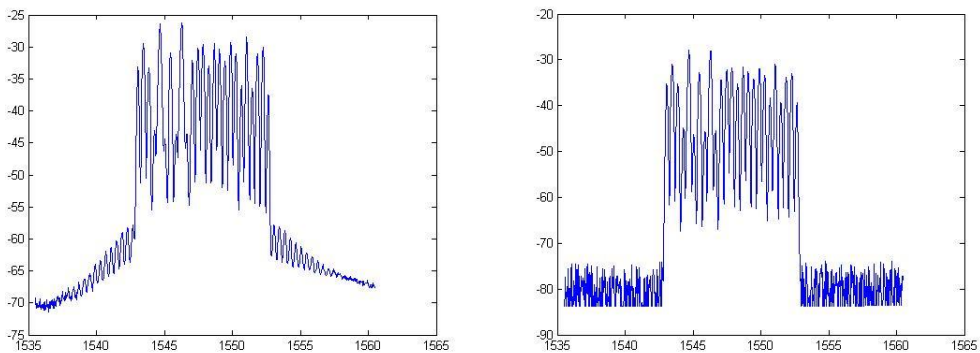


Figura 2.17 Láser multi-longitud de onda con 50 GHz (0.4 nm) de separación entre láseres. Potencia de salida en A y en B.

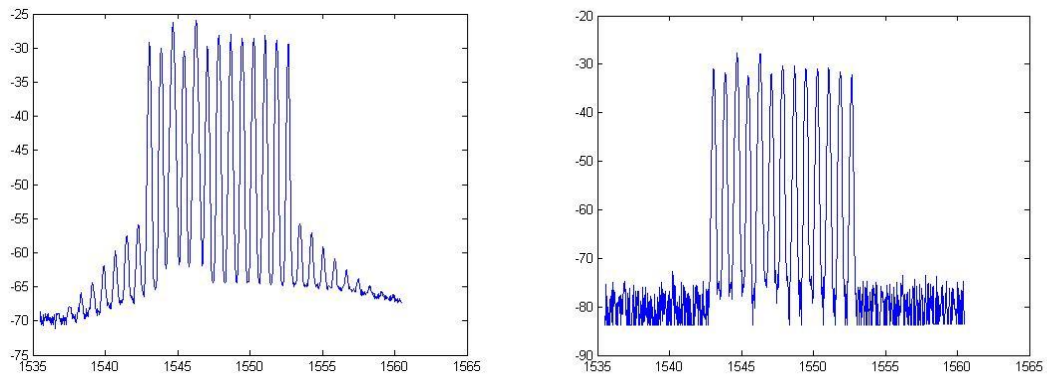


Figura 2.18 Láser multi-longitud de onda con 100 GHz (0.8 nm) de separación entre láseres. Potencia de salida en A y en B.

Se muestra en los gráficos de las figuras 2.16, 2.17 y 2.18 la necesidad de ecualizar en potencia todos los láseres generados, ya que es deseable que todos tengan la misma potencia para aplicaciones de comunicaciones ópticas, sensado remoto, etc. Se observa también una menor potencia en las salidas tomadas en A, así como menos ruidosas, ya que los lóbulos laterales que aparecen en la salida en B, propios de efectos no lineales que están ocurriendo en la fibra, no aparecen en la salida A, ya que la señal está recién filtrada.

Como se ha dicho anteriormente, se trabaja con las frecuencias marcadas por la rejilla ITU, es por ello que la separación entre los láseres que se generan no será una cualquiera, sino o bien 50 GHz (0.4 nm), 100GHz (0.8 GHz) ó 200 GHz (1.6 GHz). Para cada una de estas separaciones se ha obtenido el número máximo de láseres ecualizables. Los estudios realizados para optimizar el ancho de banda de los láseres dieron como resultado que la anchura óptima esta en torno a los 0.2 a 0.3 nm, por lo que se ha considerado utilizar una anchura intermedia dentro de ese intervalo, 0.24 nm, para llevar a cabo todas las mediciones. También se ha determinado del estudio de la emisión del láser que la potencia de bombeo que se va a utilizar es 1.6 W, ya que es una potencia lo suficientemente elevada para que la estructura sea estable y la potencia de salida de los láseres sea elevada.

Se han ido realizando pruebas con el software de ecualización para determinar el número máximo de láseres que podemos ecualizar con una diferencia máxima de potencia de 1dB para cada anchura de banda y distancia entre láseres. La determinación de este número es totalmente experimental, ya que hay diversos factores que toman parte en la ecualización además del propio software, tales como FWM y competencia de ganancia.

A continuación se muestran los gráficos obtenidos para cada una de las separaciones en los casos de mayor número de láseres:

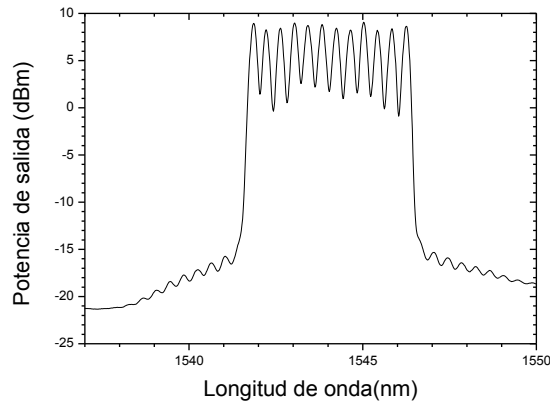


Figura 2.19. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.10 y filtrado con distancia de 50GHz entre láseres. Señal tomada en punto B

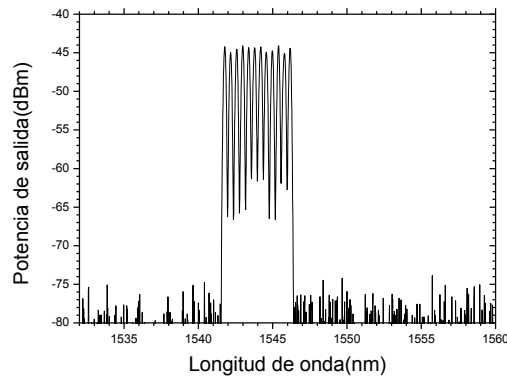


Figura 2.20. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.10. y filtrado con distancia de 50GHz entre láseres. Señal tomada en punto A

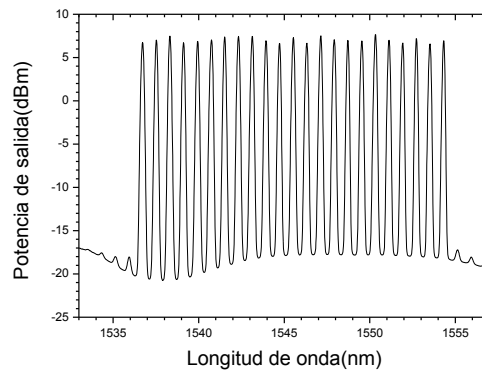


Figura 2.21. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.10. y filtrado con distancia de 100GHz entre láseres. Señal tomada en punto B

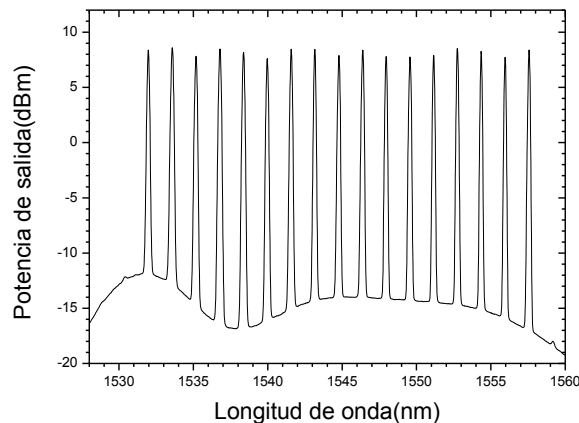


Figura 2.22. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.10. y filtrado con distancia de 200GHz entre láseres. Señal tomada en punto B

Como se puede observar, para los casos de separación entre láseres de 100 y 200GHz (Figuras 2.21 y 2.22) se obtienen buenos resultados, con 23 y 17 láseres ecualizables respectivamente, así como una potencia de salida más que considerable para las aplicaciones deseadas (en torno los 5-10 dBm). Además, la relación de extinción es también alta (unos 20dB). Sin embargo, para el caso de 50 GHz (Figura 2.19) de separación entre líneas, los resultados no son tan satisfactorios. Además de que se consiguen ecualizar un número muy inferior de láseres, la relación de extinción no llega a los 10 dB, con que nos planteamos el utilizar la señal de cabecera A (figura 2.20) en vez de la obtenida al final del montaje B aunque esto tiene sus desventajas. La señal es menos potente, pero la relación de extinción es buena.

Por lo tanto y tras mostrar los gráficos anteriores, concluimos que el láser conseguido es estable, versátil y fácilmente reconfigurable. A continuación se muestran algunas de las posibles combinaciones de líneas de emisión que se pueden obtener gracias al programa de eliminación y de ecualización, explicado en este mismo capítulo, punto 2.2.1.2.:

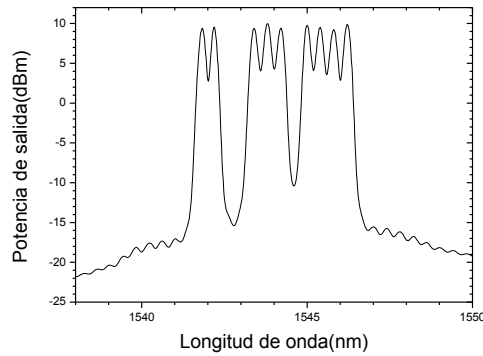


Figura 2.23. Espectro resultante de iluminar la estructura 3.9 y filtrado con distancia de 50Ghz entre láseres. Señal tomada en punto B. Algunos láseres eliminados

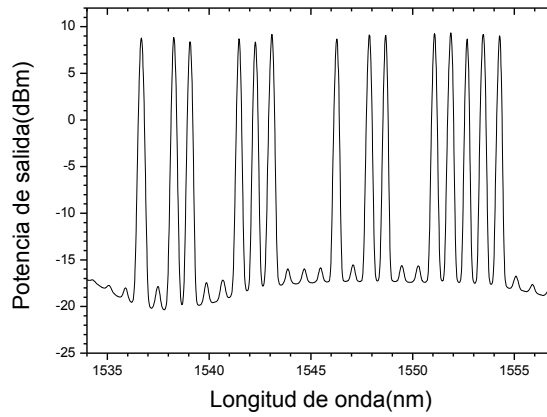


Figura 2.24. Espectro resultante en el punto B con distancia de 100 Ghz entre líneas de emisión y alguna línea eliminada.

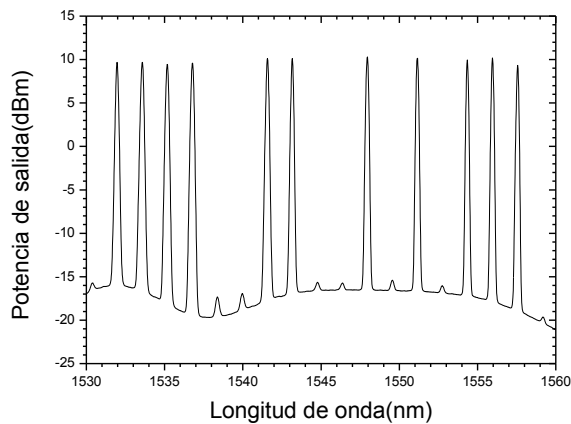


Figura 2.25. Espectro resultante de iluminar la estructura 3.9 y filtrado con distancia de 200_Ghz entre láseres. Señal tomada en punto B. Algunos láseres eliminados

2.2.3 Láser multi-longitud de onda con fibra SMF

De manera similar a cómo se ha trabajado con el láser multi-longitud de onda con fibra DCF, se ha querido estudiar la estructura anteriormente planteada con otro tipo de fibra y de mayor longitud. El esquema del láser multi-longitud de onda con fibra SMF se muestra en la **Figura 2.26**:

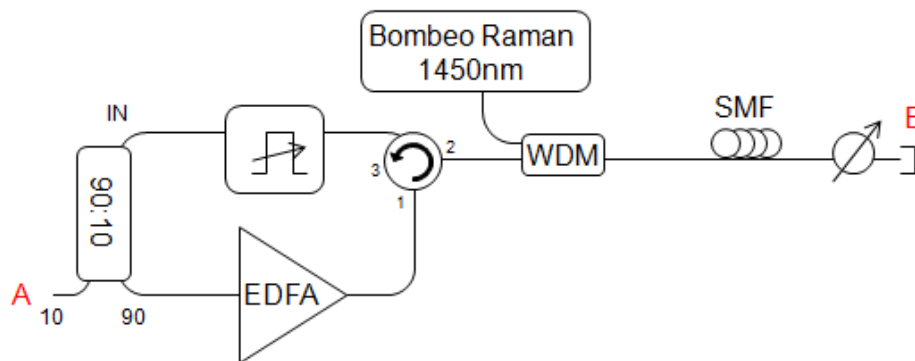


Figura 2.26 Representación esquemática del láser conmutable multi-longitud de onda con fibra SMF

Como se puede observar, consta de los mismos elementos y tiene el mismo principio de funcionamiento que el desarrollado con fibra DCF, pero la longitud de la fibra aumenta de 2.5 a 50 Km y se modifica el tipo de fibra utilizado; en vez de una fibra DCF altamente no lineal se utiliza una monomodo estándar SMF.

2.2.3.2 Resultados

Se han realizado los mismos estudios de optimización que para el láser con fibra DCF. En primer lugar se obtuvo el espectro sin filtrar de partida. Se muestra en la **Figura 2.27**.

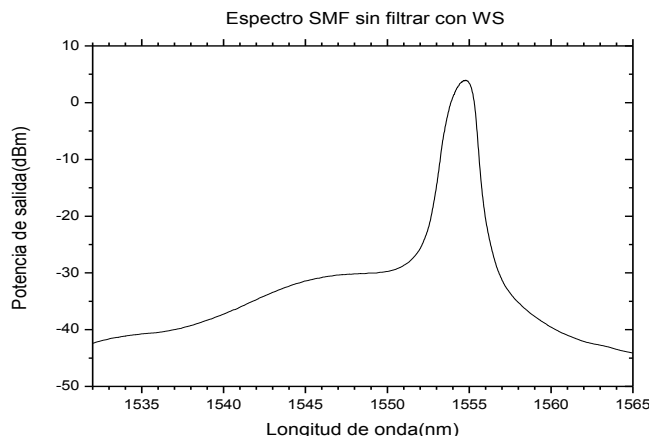


Figura 2.27. Espectro sin filtrar del láser multi-longitud de onda con fibra SMF

Como se puede observar, el espectro correspondiente al láser con fibra SMF está desplazado entorno a los 1555 nm mientras que el correspondiente al láser con fibra DCF lo está en torno a los 1445nm. En el caso DCF el espectro medido es más potente, debido a que la longitud de la fibra es menor y por lo tanto sufre menos atenuación.

Del mismo modo que con el láser con fibra DCF, se realizó un estudio que determinase la anchura óptima para este láser, teniendo en cuenta cómo la señal se ve afectada por el efecto Brillouin y el gráfico que representa lo obtenido en este estudio se muestra en la Figura 2.28.

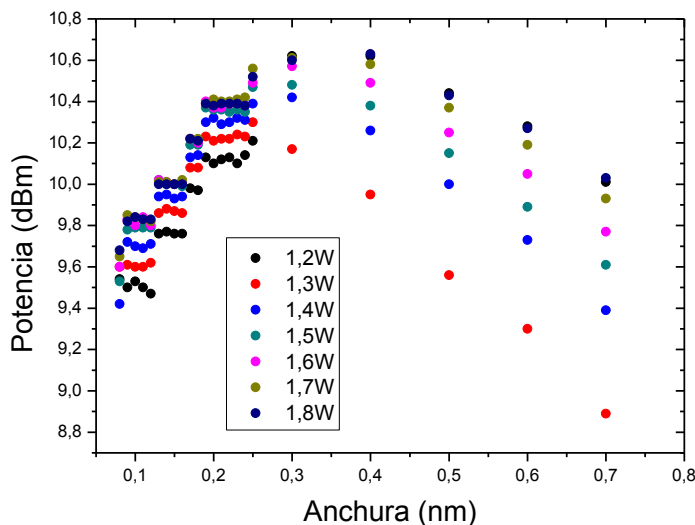


Figura 2.28. Estudio de anchura óptima con fibra SMF

Como se puede observar, la tendencia es la misma que para el caso con fibra DCF y coincide el rango de anchuras óptimas, entre 0.2 nm y 0.3 nm. Se verifica también que a medida que aumentamos la potencia de bombeo Raman, aumenta la potencia de salida del láser; sin embargo, y al igual que se ha hecho con el otro láser, se debe establecer un compromiso entre la potencia de bombeo y la estabilidad o rapidez en la ecualización del láser.

Se estableció como primer caso favorable para optimizar el láser una potencia de bombeo de 1.3 W y una anchura de láser de 0.25 nm. Se midió la curva de emisión láser, la estabilidad y el número máximo de láseres ecualizables para las tres distancias entre láseres marcadas por la rejilla ITU (50 GHz, 100 GHz y 200 GHz). Sin embargo, y dado que con el caso del láser multi-longitud de onda con fibra DCF se habían realizado las medidas con una potencia de bombeo de 1.6W, se quiso probar utilizando esa misma potencia de bombeo para realizar una comparación más clara entre la utilización de una fibra y otra.

Según el gráfico de la Figura 2.28, para 1.6 W de potencia de bombeo la anchura óptima es 0.3 nm. Esta anchura es demasiado grande y existiría solapamiento entre líneas y no se cumpliría con la rejilla ITU de 50 GHz. Por lo tanto, se realizó un estudio experimental, en el cual el objetivo era determinar el ancho de banda óptimo de las líneas de emisión para conseguir un número mayor de líneas ecualizables. Se ha comprobado experimentalmente que el ancho de banda óptimo, para el caso del láser multi-longitud de onda y con el que conseguimos el mayor número de líneas de emisión ecualizables, es 0.17 nm. Son tantos los factores que tienen influencia en la ecualización del láser, (competencia de ganancia, efecto Brillouin, atenuación excesiva en el proceso de ecualización...) que a pesar de que el estudio del efecto Brillouin determina que el ancho de banda óptimo es 0.25 nm, experimentalmente el óptimo es 0.17 nm.

Es por ello que también se han realizado todos los estudios de curva de emisión, estabilidad etc. para el caso óptimo experimental, con ancho de banda de 0.17 nm y potencia de bombeo de 1.6 W, para así poder comparar más fácilmente los dos láseres multi-longitud de onda.

A continuación, se muestra el estudio de la curva de emisión y estabilidad del láser, estudios realizados con el software explicado en el capítulo 2.2.1.5 y 2.2.1.3 respectivamente, y muestran en la Figura 2.30.

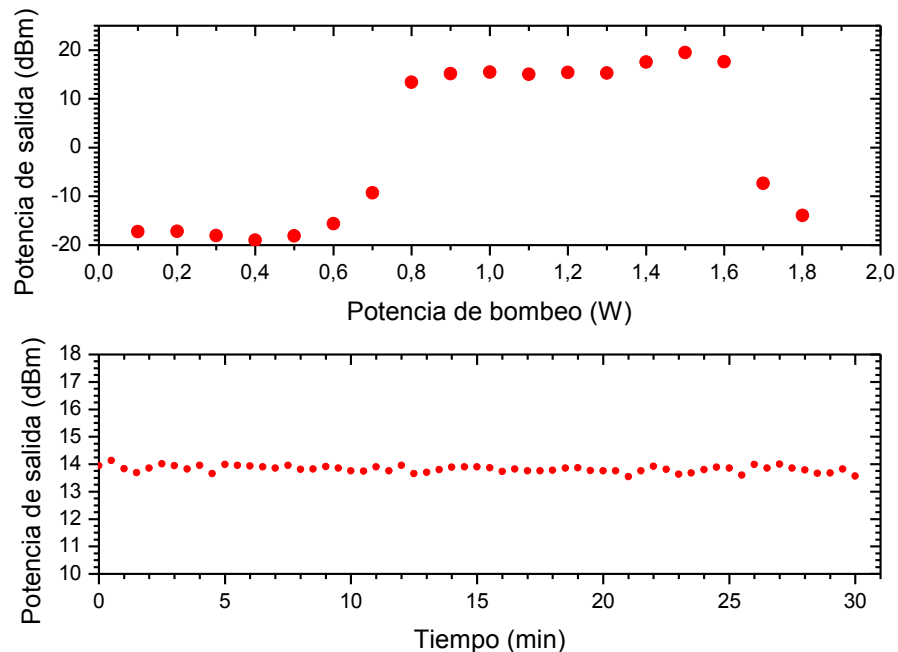


Figura 2.29. Curva de emisión y estabilidad medidas si se ilumina el láser multi-longitud de onda de la figura 2.26

En el gráfico de la curva de emisión se confirma que se cumple la condición de láser y que el máximo de emisión se consigue en torno a los 1.4- 1.6 W de potencia de bombeo. Como se ha dicho anteriormente, se ha decidido emplear 1.6 W de potencia de bombeo ya que se ha comprobado que con esa potencia de bombeo el láser multi-longitud de onda es más estable y las diferentes líneas de emisión se ecualizan más fácil y rápidamente.

En el segundo gráfico de la Figura 2.29 se representa la estabilidad del láser multi-longitud de onda, bombeado a 1.6 W. Como se puede comprobar, el láser es muy estable, al igual que lo era en el sistema con fibra DCF. Si se bombea por encima de 1.6 W el sistema se vuelve inestable.

A continuación se muestran diversas configuraciones obtenidas con este láser multi-longitud de onda. En la figura 2.30 se observa el proceso de ecualización de la

señal generada: señal sin ecualizar, perfil de atenuación calculado por el software de ecualización 2.2.1.1 y señal totalmente ecualizada con un margen de 1 dB de diferencia en potencia entre las diferentes líneas de emisión.

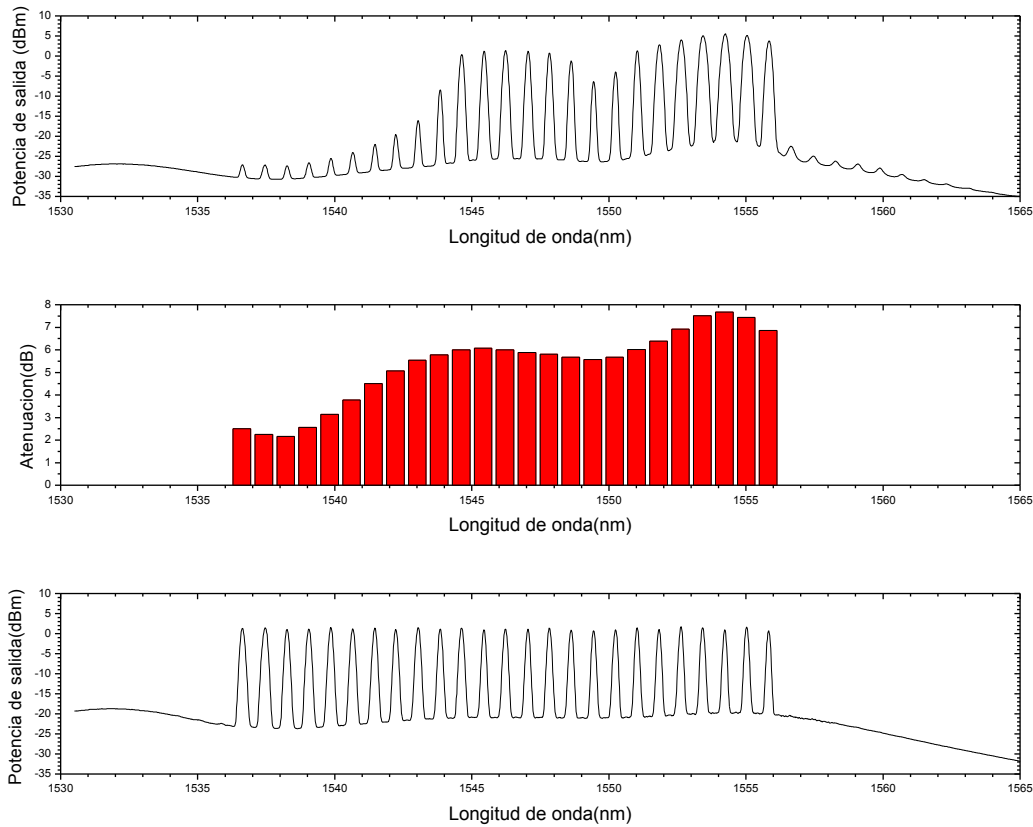
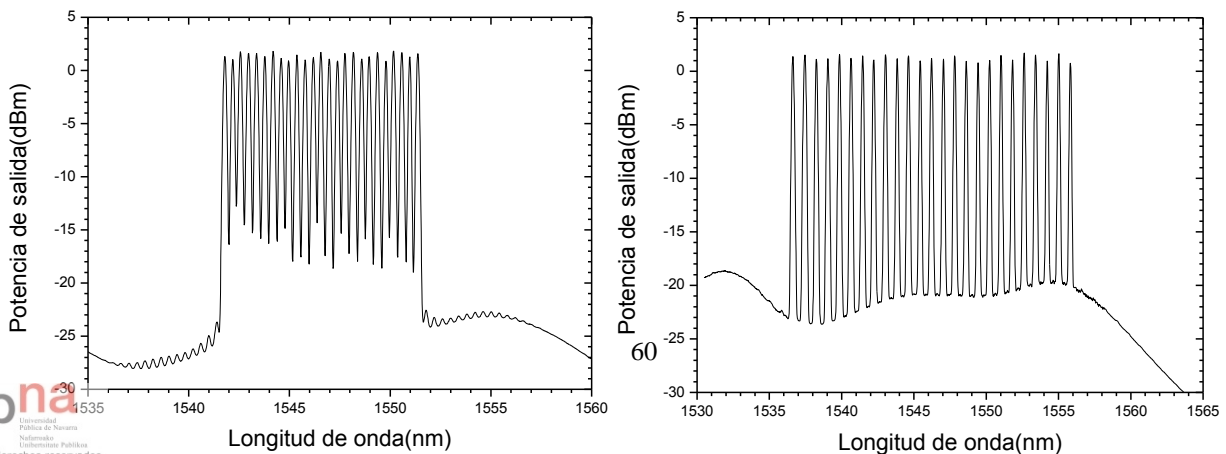


Figura 2.30. Señal generada sin ecualizar, perfil de atenuación calculado y señal final ecualizada

Los siguientes gráficos muestran para cada una de las separaciones entre líneas de emisión marcadas por la rejilla ITU del máximo número de líneas de emisión Figura 2.31, así como combinaciones de líneas de emisión eliminando algunos 2.32, 2.33 y 2.34, de manera que se observe la versatilidad del sistema.

a) b)



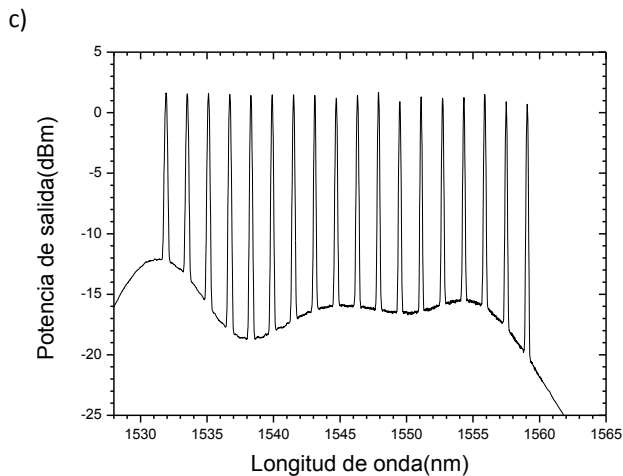
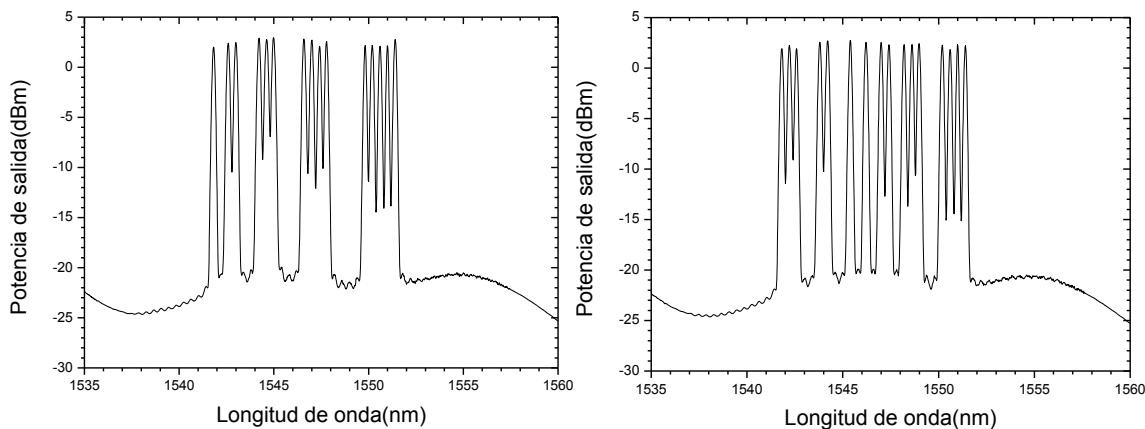


Figura 2.31 Espectro resultante de iluminar la estructura 2.26. Señal tomada en punto B. a) filtrando a 50GHz b) a 100GHz y c) a 200GHz



Figura

2.32. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.26. y filtrado con distancia de 50GHz entre láseres. Señal tomada en punto B. Algunos láseres eliminados

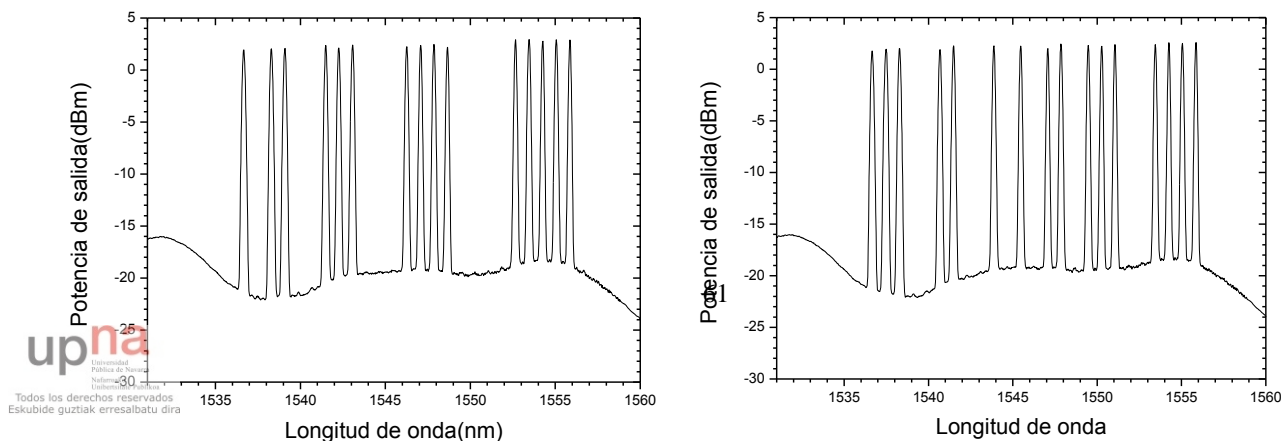


Figura 2.33. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.26. y filtrado con distancia de 100Ghz entre láseres. Señal tomada en punto B. Algunos láseres eliminados

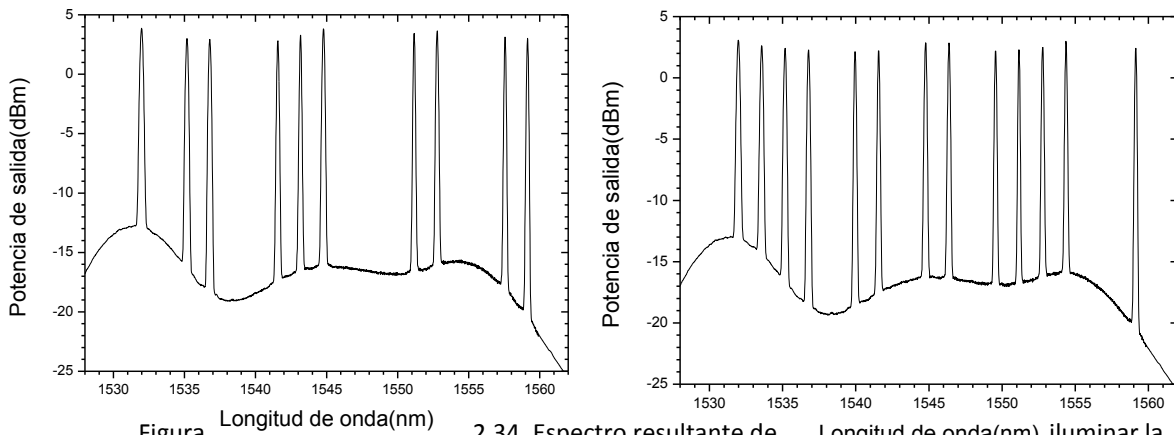


Figura 2.34. Espectro resultante de iluminar la estructura 2.26. y filtrado con distancia de 200Ghz entre láseres. Señal tomada en punto B. Algunos láseres eliminados

Una vez comprobado el funcionamiento de los dos láseres estudiados, se quiso hacer un estudio para cerciorarnos de que la estructura elegida era la más ventajosa para las aplicaciones deseadas.

Las tres estructuras que analizaremos son las mostradas en las figuras 2.1, 2.10 y 2.38. Sólo se van a mostrar los gráficos obtenidos utilizando fibra DCF ya que utilizando fibra SMF se obtienen resultados muy similares. Sin embargo, los gráficos restantes se encuentran en el Anexo C.

Para justificar el uso del sistema presentado se realizaron varias comparaciones. En un primer lugar, se comparo la cavidad *random* propuesta con una cavidad lineal (figura 2.35). También se quiso comparar la estructura propuesta con estructuras formadas por otro tipo de amplificación.

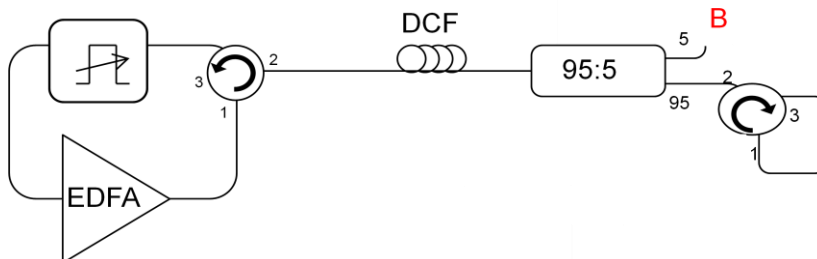


Figura 2.35. Representación esquemática del laser conmutable multi-longitud de onda con EDFA y sin bombeo Raman

En la Figura 2.36 se muestran los espectros obtenidos comparando las tres posibilidades de sistema. Utilizando solo amplificadores basados en Erblio, solo en Raman y la propuesta híbrida EDFA-Raman.

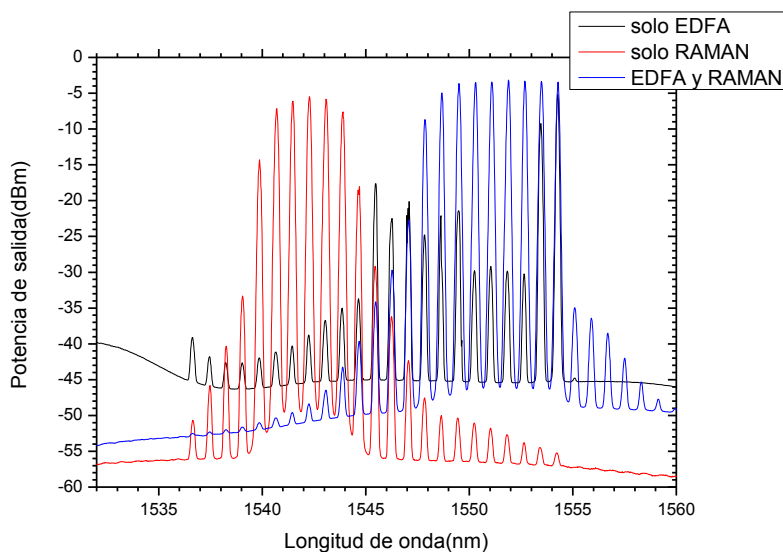


Figura 2.36. Comparativa de espectros obtenidos de sistemas 2.1 (solo bombeo Raman), 2.10 (EDFA y bombeo Raman) y 2.38 (solo EDFA)

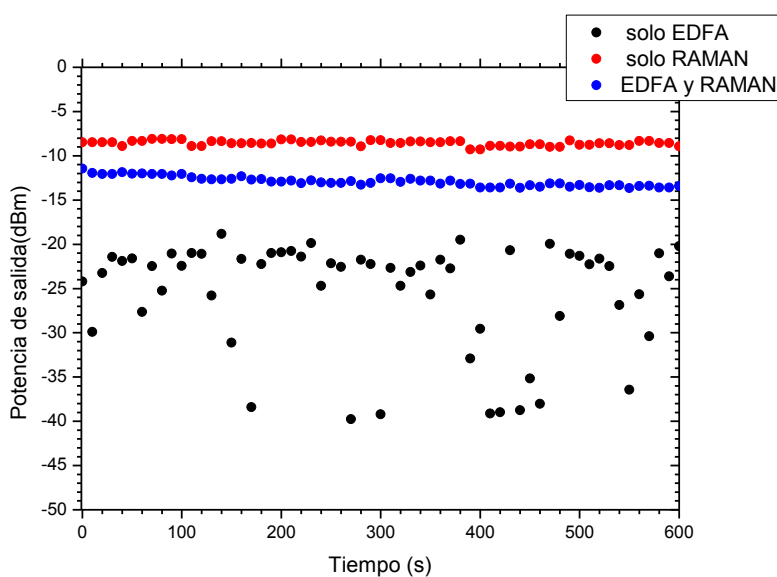


Figura 2.37. Comparativa estabilidad de los tres sistemas estudiados.

En la figura 2.36 se muestra una comparativa de los espectros obtenidos en los tres casos de estudio. Se observa que el espectro resultante del sistema con solo bombeo Raman está desplazado en torno a los 1540 nm. Sin embargo, utilizando bombeo Raman y amplificando con un EDFA, tal y como se hace en el sistema de la Figura 2.10, se consigue que el espectro se desplace en torno a las longitudes de onda de interés, alrededor de los 1550 nm, además de disponer de un ancho de banda mayor para generar los diferentes láseres. En cuanto a estabilidad, ambos casos son similares y muy estables en el tiempo.

Comparando con el sistema que utiliza amplificación basada en fibra dopada con Erblio, se observa una gran diferencia. El espectro es mucho más irregular, sin ninguna longitud de onda predominante en concreto y la inestabilidad de la estructura. En el gráfico 2.37 que compara las estabilidades de las tres estructuras se observa la gran diferencia de este caso con respecto a los otros dos sistemas. La amplificación Raman es lo que dota a la estructura de una gran estabilidad, y es por ello que los sistemas que lo utilizan son los más estables.

Ya que en el gráfico de la figura 2.36 no se puede observar la gran diferencia entre la utilización de amplificación con EDFA y sin ella, a continuación en la Figura 2.38 se muestran dos gráficos en el que se observa con mayor claridad la diferencia.

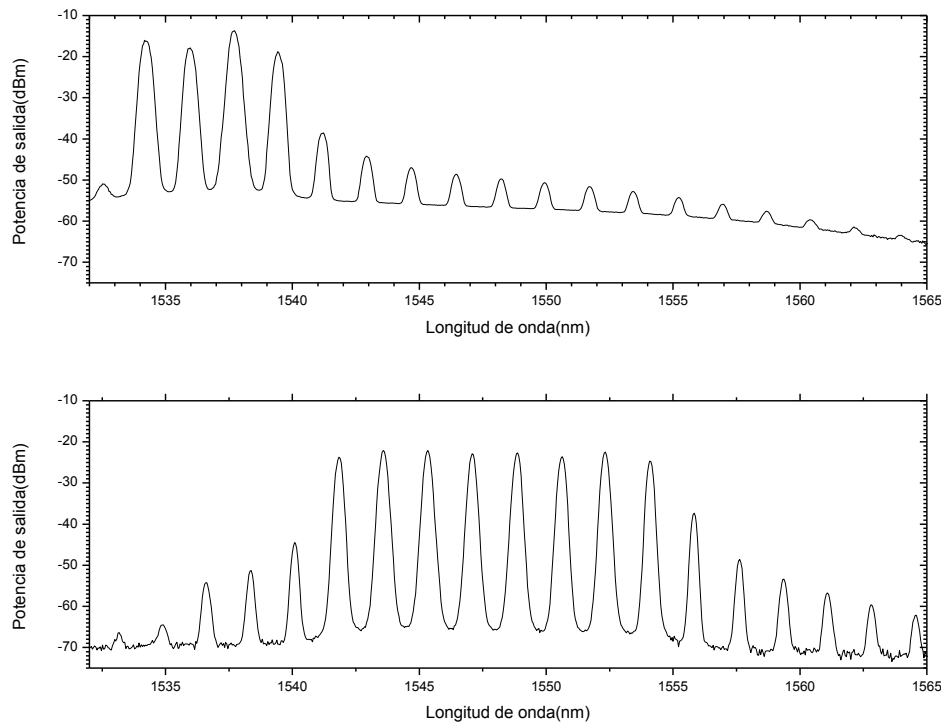


Figura 2.38. Comparativa de espectros resultantes de iluminarlas estructuras de figura 2.1 sin EDFA y figura 2.10 con EDFA

Se puede concluir que el sistema que combina bombeo Raman y amplificación con EDFA es el óptimo en cuanto a estabilidad y ancho de banda útil, y por lo tanto más versátil para todas las aplicaciones en las que se quiere utilizar este láser.

2.3 Conclusiones

Se han desarrollado dos láseres de fibra óptica multi-longitud de onda estables, con un ancho de banda hasta ~ 30 nm, totalmente reconfigurables, versátiles y de alta potencia.

Se ha determinado que para el láser multi-longitud de onda con fibra DCF el caso óptimo es aquel con potencia de bombeo de 1.6 W y ancho de banda de los láseres de 0.24 nm. Con esta configuración, se ha conseguido un máximo de 15 nm de

ancho de banda que pueden ser reconfigurados con una distancia mínima entre láseres de 50 Ghz, destacando las separaciones entre líneas a partir de 100GHz. La potencia máxima obtenida está en torno a los 10 dBm y relaciones de extinción de hasta 25 dB. Es fácilmente ecualizable, consiguiendo así cumplir, con las características deseadas, las especificaciones de la rejilla ITU de 100 GHz y 200 Ghz para aplicaciones de telecomunicaciones y también, como se demostrará en el próximo capítulo, pudiendo ser utilizado como fuente para interrogación remota de sensores de fibra óptica.

En el caso del láser con fibra SMF, el espectro utilizable se expande hasta los ~30 nm en torno a los 1545 nm. Además, se consiguen mejores resultados con la rejilla ITU de 50 Ghz, llegando a ecualizar hasta 25 líneas de emisión con relaciones de extinción de 20 dB. La potencia máxima conseguida está en torno a los 0 dBm, potencia inferior al caso con fibra DCF. Sin embargo, es una potencia con la que se puede trabajar en multitud de aplicaciones, como la interrogación remota de sensores.

El peor comportamiento del láser con fibra DCF con la rejilla de 50 Ghz puede deberse a la utilización de una fibra altamente no lineal, compensadora de dispersión, que potencia aun más los efectos no lineales que en ella se producen y no permiten ecualizar de forma sencilla para separaciones entre líneas de emisión pequeñas. Lo cual también puede explicar la mayor eficiencia de emisión. Sin embargo, para separaciones a partir de los 100 Ghz, ambos láseres tienen espectros utilizables, siendo más amplio el espectro del láser con fibra SMF, lo que permite generar mayor número de líneas de emisión.

Capítulo 3. Red híbrida de sensores FBG e interferométricos interrogada por un láser conmutable multi-longitud de onda de fibra óptica

3.1. Introducción

Desde que en 1978 se consiguió alimentar remotamente una alarma en una red telefónica de fibra óptica, se han utilizado sistemas tele-alimentados con luz a través de la fibra óptica. En las redes alimentadas ópticamente, las señales que transportan la información y la potencia que alimenta los dispositivos remotos se transmite a través del mismo medio, la fibra óptica. La alimentación de dispositivos con luz es clave para las redes de sensores multifuncionales y autónomas, con un amplio rango de aplicaciones como seguridad, control de espacios públicos, carreteras, puentes y salud, así como comunicaciones.

Las principales ventajas de usar este tipo de sistemas, además del aislamiento eléctrico entre los puntos finales de la fibra (como por ejemplo el sensor y la unidad de control) son: ausencia de ruido electromagnético, ahorro en cables de cobre y la eliminación de sistemas de alimentación en las localizaciones remotas. Estas ventajas hacen que estos sistemas sean muy apropiados para: control de motores de aviones [15], utilización de teléfonos en lugares con riesgo de explosión [16] y en la minería [17].

Otra posible aplicación de la alimentación remota es la telefonía. En redes de comunicaciones de fibra óptica se necesitan al final de las mismas un conversor opto-electrónico que transforme la señal óptica en eléctrica. Los conversores deben alimentarse con energía eléctrica y esta dependencia puede subsanarse con la tele-alimentación, consiguiendo así redes totalmente autónomas.

Cuando se quieren monitorizar varias redes de sensores simultáneamente, se necesitan diferentes fuentes para cada aplicación y tecnología de sensores. La utilización de una longitud de onda fija para la interrogación remota de sensores no se puede utilizar para interrogar sensores dependientes en longitud de onda. Los láseres multi-longitud de onda sensores han atraído últimamente mucho interés ya que son la solución para interrogar este tipo de sensores. En este capítulo se utiliza el láser

presentado en el capítulo 2 para interrogar tanto sensores interferométricos como redes de difracción de Bragg. Las diferentes tipologías de sensores están explicadas en el punto 1.4. De esta manera, interrogación remota de sensores y telealimentación se han unido en mismo sistema.

3.2. Desarrollo experimental

3.2.1. Conmutador óptico

El objetivo principal de la utilización de un switch óptico era conseguir desarrollar una red bidireccional totalmente autónoma para la transmisión de datos entre dos teléfonos. Para ello, se utilizó el switch óptico y el circuito controlador del switch desarrollado en [18] y se intentó modular a la mayor velocidad posible para transmitir información entre los dos terminales.

El dispositivo que se utiliza como switch óptico es un MEMS 1x2 desarrollado por DiCon fiberoptics, INC. Este switch opera recogiendo y concentrando la luz proveniente de la fibra de entrada y después reflejando esta luz con un espejo microposicionado con tecnología MEMS de dos ejes para dirigirla hacia la fibra de salida. Para controlar estos espejos se aplican diferentes voltajes en los conectores eléctricos del switch óptico. Los voltajes se controlan mediante un circuito electrónico compuesto principalmente por elevadores de voltaje (Max 854 CSA+ y Max 1771 de MaximIntegrated) y switches eléctricos (ISL43111 SOIC de Intersil). El resto de elementos como resistencias, potenciómetros, condensadores y bobinas están dispuestos de manera que cumplan las especificaciones de las hojas de características para la polarización de los elevadores de voltaje y switches eléctricos. Un esquema simplificado del circuito utilizado se muestra en la **Figura 3.1**.

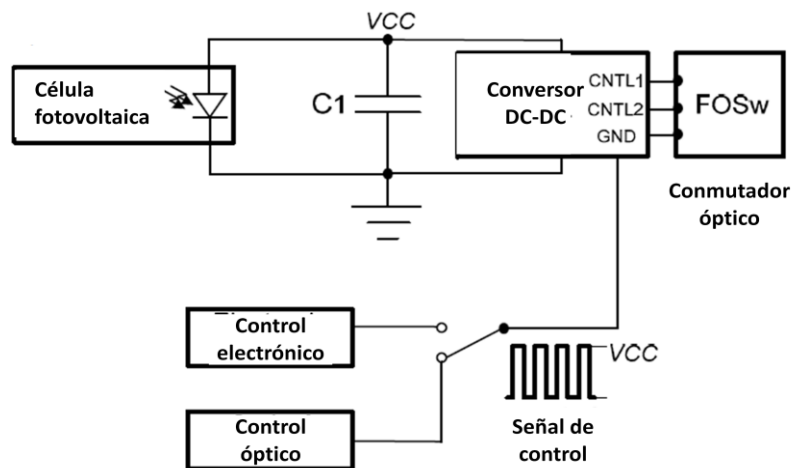


Figura 3.1. Esquema básico del circuito utilizado

Para alimentar este switch óptico se necesita un conversor óptico-eléctrico que transforme la potencia óptica en eléctrica. Se ha utilizado una célula fotovoltaica (PPC-9LW) para alimentar el switch óptico de bajo consumo anteriormente mencionado. El conversor de potencia, modelo PCC9LW fabricado por JDSU, trabaja a 1445 nm y transforma 125 mW de potencia óptica en 35 mW de potencia eléctrica, lo que es suficiente para alimentar el switch óptico.

Una vez el sistema está alimentado, para seleccionar un canal u otro se necesita aplicar unos voltajes concretos en los dos pines de control de switch óptico. Para seleccionar el canal 1 necesitaremos 15.715 V en el pin de control 1 y 10.127 V en el pin de control 2 y para seleccionar el canal 2, 22.078 V y 10.098 V respectivamente. Dado que el conversor óptico-eléctrico proporciona un máximo de 4.8 V se necesitaba un circuito con elevadores de potencia para alcanzar los voltajes y así poder controlar el switch.

En el anexo B se presenta más información acerca del circuito y como están dispuestos sus componentes.

Se ha querido determinar la frecuencia máxima de modulación. Para ello, se ha introducido una señal eléctrica cuadrada en el punto de control del circuito, de manera que se vaya conmutando de un canal a otro y se observe qué frecuencia máxima de modulación se puede alcanzar.

3.2.1.1. Resultados

Se midió la frecuencia máxima de modulación del circuito obteniendo un máximo de 24 Hz. Además, los condensadores que componen el circuito limitan la modulación, debido a que se descargan muy lentamente. Como se puede observar en la **Figura 3.2**, tras introducir una señal eléctrica cuadrada como señal de control, a la salida del circuito se obtiene una señal cuadrada cuyo flanco de bajada se extiende en el tiempo, casi solapándose con el siguiente pulso cuadrado. Esto se puede solucionar añadiendo una resistencia para que la velocidad de descarga del condensador aumente, pero también aumenta el consumo de potencia en la resistencia, lo cual no interesa ya que es deseable un circuito de bajo consumo. Se debe encontrar un compromiso entre consumo y frecuencia máxima de modulación.

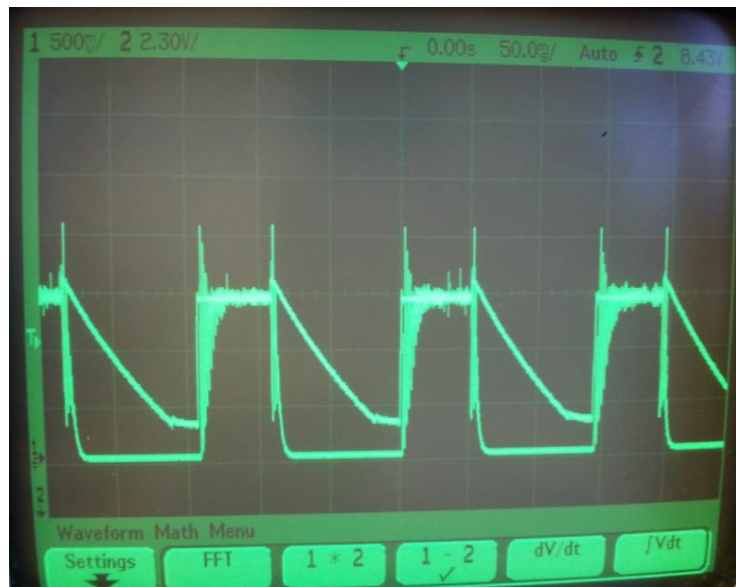


Figura 3.2. Señal de control de entrada (señal cuadrada) y señal de salida

Se ha probado introduciendo una resistencia en paralelo a los condensadores del circuito, y con una resistencia de 12 K Ω , el condensador se descarga completamente, pero la onda cuadrada se deforma y se genera un escalón de potencia inferior a la de la onda cuadrada de aproximadamente 20 ms de duración, cuando la señal útil dura menos aún.

Dado que introduciendo estas resistencias no se consiguen pulsos cuadrados modulando a más de 4 Hz, se ha planteado la posibilidad de modificar el circuito original y cambiar la posición de los switches eléctricos a la salida del circuito. No se ha observado mejora en la señal incluso modulando a pocos hertzios, debido al ruido.

Por lo tanto, con el sistema actual no conseguimos modular a velocidades mayores de 24Hz. Además, se consultó con el fabricante del switch óptico que se estaba utilizando y nos comunicó que el switch conmuta a un máximo de 100Hz, ya que a mayores frecuencias los espejos que se desplazan en el dispositivo para conmutar no les da tiempo a moverse correctamente. Con lo cual, la velocidad de conmutación es inferior a lo deseado y no sería suficiente para el sistema planteado de comunicación bidireccional para transmisión de voz. Para obtener una mayor velocidad de conmutación, sería necesario otro tipo de conmutador óptico.

Sin embargo, se ha planteado utilizar el switch óptico y el circuito de control del mismo anteriormente desarrollado en [19] para la interrogación remota de dos redes de sensores con el láser multi-longitud de onda desarrollado en el capítulo 2 de este trabajo, conmutando entre dos redes de sensores independientes.

3.2.2. Red de sensores

La red de sensores que se va a estudiar en este capítulo se muestra en la Figura 3.3 y está compuesta por los siguientes elementos:

- 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

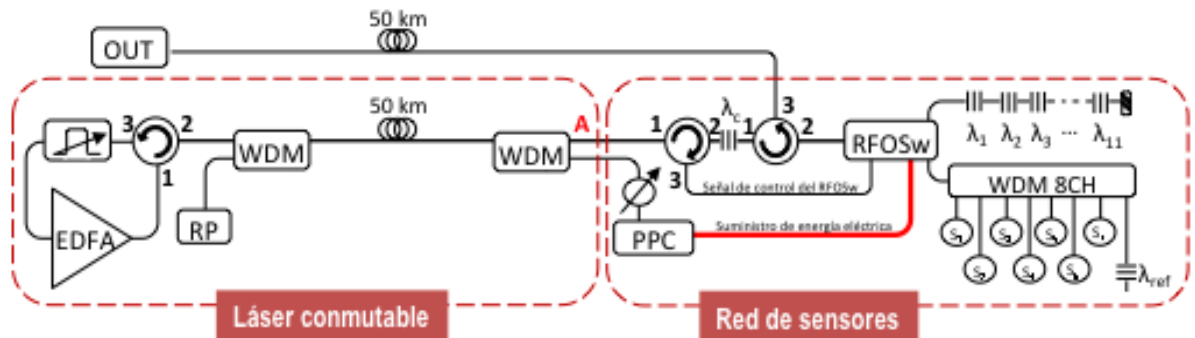


Figura 3.3 Esquema del sistema láser multi-longitud de onda y red de sensores

El láser multi-longitud de onda conmutable presentado en el capítulo 2 es la pieza clave para la estructura de multiplexación que aquí se presenta. Está representado en la Figura 3.3 dentro del recuadro denominado láser conmutable.

El resto de la estructura es la red de sensores ilustrada también en la Figura 3.3. Se ha creado esta red doble de sensores para demostrar las ventajas del láser multi-longitud de onda conmutable generado para interrogar diferentes tipos de sensores en dos redes simultáneamente. Una de las redes está formada por 7 sensores de deformación interferométricos que modulan la intensidad, formados por 7 secciones de fibra de cristal fotónico (PCF) dentro de un interferómetro tipo Sagnac, véase punto 1.4.2, y la otra por 11 redes de difracción de Bragg FBG, (concepto explicado en el punto 1.4.1), que miden variaciones de temperatura y deformación.

3.2.2.1. Sensores interferométricos

Los sensores interferométricos basados en fibra cristal fotónico se forman conectando 1.5 m de fibra de cristal fotónico altamente birrefringente HiBi (PM-1550-01 de NKT Photonics) en una estructura tipo Sagnac (véase capítulo 1.9). El resultado de esta estructura es una interferencia entre los modos de polarización y, cuando deformamos la fibra, por lo tanto, modificamos la birrefringencia y la longitud efectiva

de la fibra; se produce un desfase en la interferencia resultante. Así, cuando se ilumina la estructura con una longitud de onda en concreto, se ve reflejada y su intensidad se ve modulada proporcionalmente a la deformación aplicada. Estos 7 sensores están conectados a un multiplexor en longitud de onda WDM de 8 canales (desde 1536.61 a 1547.72 nm cumpliendo con las especificaciones de la rejilla ITU de 200GHz). El último canal que queda libre se ha conectado a un FBG que actúa como reflector de referencia, reflejando una potencia constante, y está separado del resto de líneas de emisión centrado en 1554.13 nm.

3.2.2.2. Sensores FBG

La otra red de sensores está formada por 11 sensores FBG conectados en serie, Figura 3.4. Los FBGs están centrados desde 1540 a 1552nm con una separación de 1.2 nm entre sensores consecutivos.

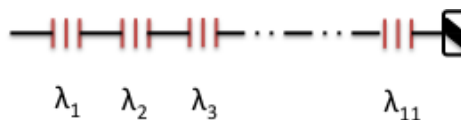


Figura 3.4. Esquema de la red de sensores de 11 FBG dispuestos en serie.

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 se han situado alternando los de mayor longitud de onda con los de menor longitud de onda. La disposición en longitud de onda (comenzando por el sensor más cercano a la fuente de luz) es la siguiente:

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

Ambas redes de sensores están conectadas al switch óptico alimentado y controlado remotamente con la propia luz que viaja por la fibra (RFOSw), concepto conocido como “powered-by-light”. Para alimentar remotamente el switch óptico se utiliza el residuo de la potencia de bombeo utilizado en la estructura láser.

Para controlar el switch se utiliza una señal de control centrada en 1554,13 nm. Cuando esta señal está encendida “ON”, se selecciona la red compuesta por los 7 sensores de cristal fotónico. El espectro que se utiliza para interrogar estos sensores es el mostrado en la Figura 3.5, con una línea de emisión centrada en cada una de las

longitudes de onda de cada uno de los sensores, otro para el FBG de referencia y, la línea más separada, es la línea del control del switch.

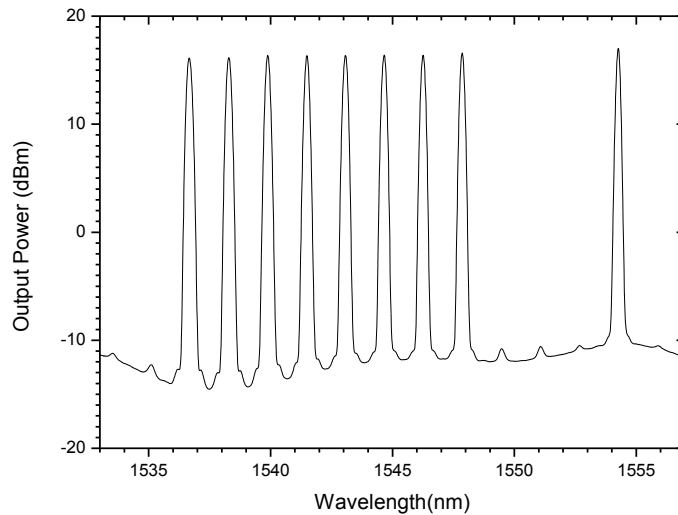
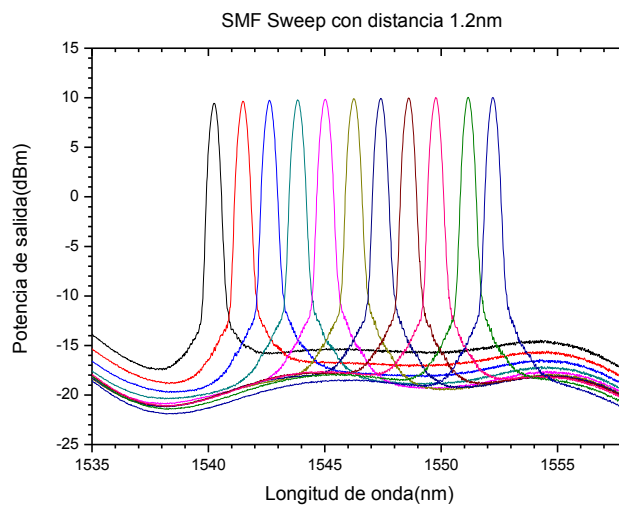


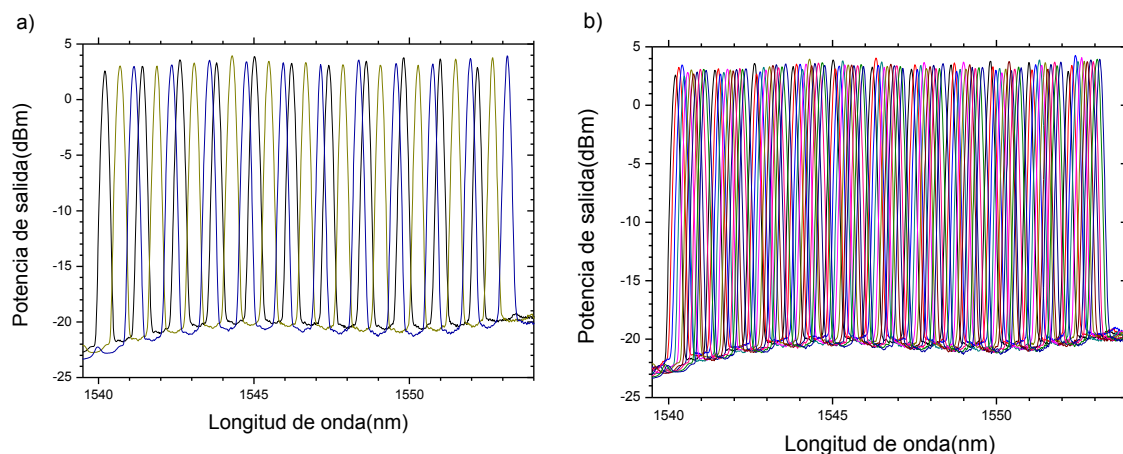
Figura 3.5. Espectro utilizado para interrogar los 7 sensores PCF, el sensor de referencia y para controlar el conmutador

En el caso en que la señal de control está apagada, “OFF”, el switch selecciona la red compuesta por 11 FBGs. Para la interrogación remota de ésta se realiza un barrido en longitud de onda con una resolución de 0.1 nm en el rango de longitudes de onda de los sensores. Los espectros mostrados en la Figura 3.6 representan las 11 líneas de emisión generadas correspondientes con las longitudes de onda de los 11 FBG.



3.6. Espectro utilizado para interrogar red de sensores con 11 FBG

El barrido se realiza creando una única línea de emisión y desplazándola 0.1 nm por paso hasta barrer todo el ancho de banda necesario. Otra opción que permite el laser presentado, es el barrido múltiple. El funcionamiento de este comienza con un peine de 11 líneas de emisión, separadas 1.2 nm (tal y como lo están los sensores FBG). Barriendo con esta configuración multi-longitud de onda se reducen en proporción del número de líneas las iteraciones del barrido para recorrer todo el ancho de banda necesario. En la figura 3.7 se muestra un ejemplo del barrido múltiple (solo 3 iteraciones) y el barrido completo (12 iteraciones) que como se observa cubre todo el espectro a la resolución deseada.



3.7. Ejemplos de posibles barridos múltiples. Con 3 iteraciones (a) y 12 iteraciones (b)

Volviendo al funcionamiento de la red de sensores, la señal generada para interrogar cada una de las redes, centrada alrededor de 1550 nm, parte del WDM por el puerto A. El residuo del bombeo a 1455 nm es recogido por el puerto B del WDM y se atenúa ya que el exceso de potencia podría dañar la célula fotovoltaica PCC. Ésta alimenta el switch óptico RFOSw. Para el caso en el que la red de sensores interferométricos de cristal fotónico PCF está seleccionada, se ha visto que se transmite una señal de control, la cual se filtra con una estructura circulador-FBG que redirige esta señal de control hacia el switch óptico. El cometido del segundo circulador consiste en iluminar el conmutador óptico con la señal interrogadora así

como recoger la señal reflejada de las redes de sensores para después monitorizarla en un analizador de espectros ópticos OSA, situado en la cabecera junto con los dispositivos relativos al láser interrogador.

Los resultados obtenidos para las dos redes de sensores se muestran en las figuras 3.8. y 3.9. En el gráfico 3.8 a) se muestra en negro el primer sensor PCF en reposo, es decir, sin deformarlo; en rojo y azul se muestran el segundo y quinto sensor PCF tras someterles a deformación. Se demuestra el correcto funcionamiento del esquema completo, así como la ausencia de diafonía entre sensores, ya que dos de ellos están siendo deformados y el tercero no sufre modificación alguna. En el gráfico 3.8 b) se representa la variación de potencia reflejada por el sensor a medida que es deformado hasta su rotura; de esta manera podemos determinar el rango máximo de medida de estos sensores. Las medidas se realizaron con deformaciones en torno al valle de interferencia lo que nos permite reconstruir el patrón de interferencia de la estructura Sagnac. Finalmente, en el gráfico 3.9 se muestra una reconstrucción de la respuesta de la red de sensores FBG al barrido del láser. Cada línea representada es la reflexión de cada sensor tras el barrido completo en longitud de onda.

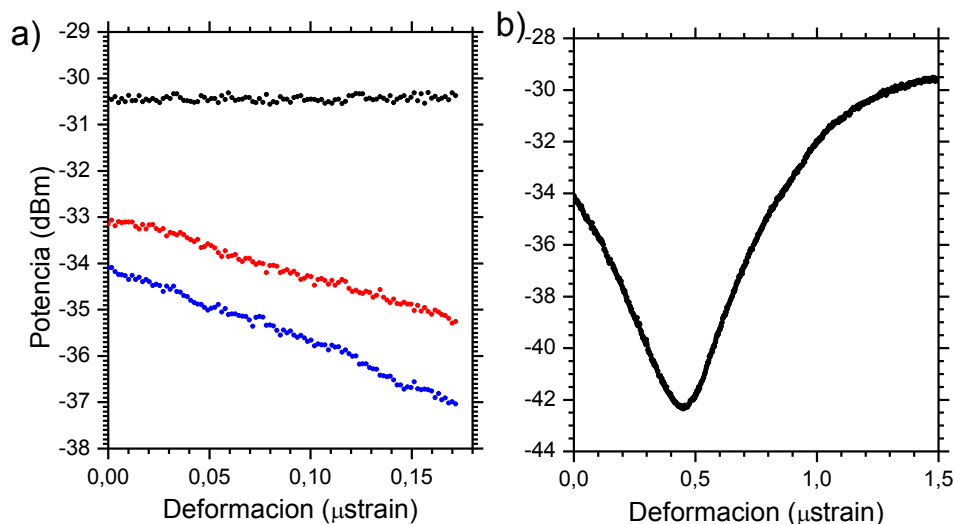


Figura 3.8. a) Evolución de la potencia de un sensor no sometido a tensión (negro) y dos sometidos a tensión (segundo y quinto sensor PCF). b) evolución de la potencia tras someter a un sensor PCF a tensión hasta el punto de ruptura.

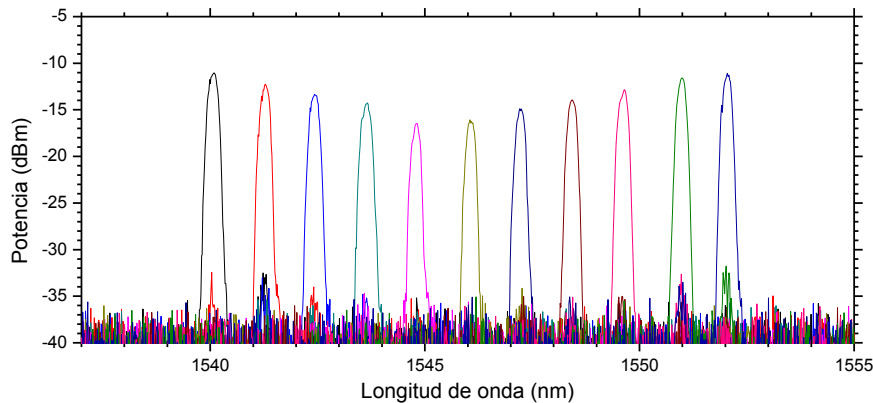


Figura 3.9 Señal recogida de la red de sensores FBG tras iluminarlos con el láser.

3.2.3. Conclusiones

A la hora de analizar las características y prestaciones del circuito utilizado, se ha comprobado que no se puede conmutar a más de 24 Hz, con lo cual no sería factible su utilización para el propósito inicial; sistemas bidireccionales de comunicaciones telealimentados para transmisión de voz. Sin embargo, esto no supone un problema para aplicaciones que no requieran de una gran velocidad de conmutación, como es el caso de las redes de sensores de temperatura y deformación que se han estudiado. Se ha demostrado que se puede alimentar el sistema de conmutación con el residuo del bombeo Raman, consiguiendo así un sistema de interrogación de sensores tele-alimentado y que no necesita de alimentación salvo en cabecera. Se ha conseguido que el sistema funcione a 50 km de distancia, aunque se dispone de potencia suficiente para alejar aun más las redes de sensores.

Se ha comprobado el perfecto funcionamiento del láser multi-longitud de onda para la interrogación remota de las dos redes de sensores. Gracias a su versatilidad, estabilidad y potencia de salida se ha conseguido medir tanto la deformación experimentada por los sensores de cristal fotónico PFC de intensidad, hasta el punto de rotura, como la señal recogida de la red de sensores de 11 FBG tras ser iluminada con el láser. La generación y equalización de las diferentes líneas de emisión para la monitorización de ambas redes de sensores FBG es de escasos segundos, y realizando

el barrido múltiple se consigue de forma más rápida una reconstrucción del estado de los sensores.

4. Conclusiones

En el proyecto *“Desarrollo de láser Random de fibra óptica multi-longitud de onda conmutable y reconfigurable en tiempo real para interrogación remota de sensores”*, se distinguen dos partes diferenciadas.

En primer lugar y la parte más extensa del trabajo realizado, es el láser random multi-longitud de onda reconfigurable. Se ha desarrollado un software de control y generación de los diferentes perfiles de las líneas de emisión en LabView.. Este software nos ha permitido trabajar y modificar la cavidad del láser según la aplicación deseada, ofreciendo la posibilidad de ecualizar en potencia las líneas de emisión generadas. También se ha mejorado el software para optimizar el láser como: software para el estudio del ancho de banda óptimo, transitorio, curva de emisión, estabilidad y eliminación de láseres. Con todas estas herramientas, se ha podido analizar el funcionamiento de dos láseres con la misma estructura pero utilizando fibras de diferentes características: 2.5 km de fibra DCF y 50 km de fibra SMF. Para ambos casos se han conseguido láseres con potenciales aplicaciones, debido a su gran estabilidad, fácil y rápida reconfiguración y posibilidad de generar varias líneas de emisión y ser ecualizadas. Utilizando la fibra DCF se han conseguido resultados satisfactorios para separaciones entre láseres de 100 y 200 GHz, consiguiendo 23 y 17 líneas de emisión ecualizadas, con potencias de salida alrededor de 10 dBm. Sin embargo, para separaciones de 50 Ghz el funcionamiento del láser no es tan satisfactorio debido a las no linealidades presentes en la cavidad. Para el caso de fibra SMF, se han podido generar láseres a las tres separaciones marcadas por la rejilla ITU 50, 100 y 200GHz, consiguiendo 25, 25 y 18 líneas de emisión ecualizadas respectivamente y con potencias de salida en torno a 0 dBm.

Como posibles líneas de mejora y desarrollo podríamos destacar:

- Optimización de la estructura láser centrándose en otros parámetros, como puede ser la longitud y tipo de fibra, potencia de bombeo, etc ya que en este trabajo la

optimización se ha centrado especialmente en la anchura de las líneas de emisión y en el proceso experimental de la ecualización

- Automatización del software de ecualización. Hasta ahora el factor de corrección introducido por el programa se introduce de forma manual, pudiéndose modificar a cada iteración. Podría mejorarse el software de ecualización automatizando este proceso, así como la posibilidad de retroceder en el proceso de ecualización si el factor de corrección introducido es mayor al debido.

Este estudio ha sido recogido y publicado en el artículo *“Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror”*, [19].

La segunda parte del proyecto es aquella en la que se ha querido utilizar un sistema de conmutación ya desarrollado con anterioridad en [18] para utilizarlo en aplicaciones como sistemas bidireccionales de comunicación telealimentados. Tras comprobar la imposibilidad de llevar a cabo este proyecto debido a la baja velocidad de conmutación del sistema, insuficiente para la aplicación deseada, se ha planteado la posibilidad de emplearlo junto con el láser random multi-longitud de onda desarrollado en este trabajo para interrogar dos redes de sensores independientes al mismo tiempo y con el mismo láser reconfigurable. Las dos redes de sensores interrogadas, desarrolladas por Amaia Ortigosa, compañera del equipo de investigación están formadas por 11 sensores de tipo FBG y 7 sensores interferométricos hechos con fibra de cristal fotónico.

Se ha demostrado que con el láser desarrollado y debido a su versatilidad y fácil reconfiguración, se pueden interrogar redes de sensores de muy distinta naturaleza, como sensores de intensidad y sensores en longitud de onda, realizando barridos en longitud de onda con una sola línea de emisión, o con peines de líneas de emisión para reducir el número de iteraciones.

Como posibles líneas de mejora se incluyen las siguientes:

- Búsqueda de dispositivos para alcanzar la velocidad de conmutación deseada y así llevar a cabo el proyecto de un sistema bidireccional de comunicaciones telealimentado.

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”* [20], presentado en el *“23th International Conference on Optical Fibre Sensors”*. Adicionalmente se ha enviado una version extendida del mismo a la revista *“Journal Lightwave Technology”* *“Fully-Switchable Multi-Wavelength Fiber Lasers Based on Random Distributed Feed-Back for Sensors Interrogation”* [21].

5. Referencias

- [1] Sergei K. Turitsyn, Sergey A. Babin, Dmitry V. Churkin, *“Random distributed feedback fibre lasers”*, Physics Reports 542 (2014) 133–193
- [2] Sergei K. Turitsyn, Sergey A. Babin, Atalla E. El-Taher¹, Paul Harper, *“Random distributed feedback fibre laser”*, DOI: 10.1038/NPHOTON.2010.4
- [4] G. P. Agrawal, Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems, Chapter 2, *Theory of Raman Amplifiers*, pp. 33-102, Ed. by C. Headley and G. P. Agrawal, 2005.
- [5] Q. Lin and Govind P. Agrawal, *“Raman response function for silica fibers”*, OPTICS LETTERS / Vol. 31, No. 21 / November 1, 2006
- [6] A. Wang, A. K. George and J. C. Knight, *“Three-level neodymium fiber laser incorporating photonic bandgap fiber,”* Opt. Lett., vol. 31, pp. 1388-1390, 2006.
- [7] F. J. McAleavey, J. O’Gorman, J. F. Donegan, B. D. MacCraith, J. Hegarty and G. Mazé, *“Narrow linewidth, tunable Tm³⁺-doped fluoride fiber laser for optical-based hydrocarbon gas sensing,”* IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 3, pp. 1103-1110, 1997.
- [8] S. D. Jackson, *“Midinfrared holmium fiber lasers,”* IEEE J. Quant. Electron., vol. 42, pp. 187-191, 2006.
- [9] F. Z. Qamar, T. A. King, S. D. Jackson and Y. H. Tsang, *“Holmium, praseodymium-doped fluoride fiber laser operating near 2.87 μm and pumped with a Nd:YAG laser,”* J. Lightwave Technol., vol. 23, pp. 4315-4320, 2005.

- [10] G. J. Cowle, D. Y. Stepanov, and Y. T. Chieng, "Brillouin/Erbium Fiber Lasers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 1198-1204, July 1997.
- [11] D. Yu. S. and G. J. Cowle, "Properties of Brillouin/Erbium Fiber Lasers," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 3, pp. 1049-1057, 1997.
- [12] Fernández, Montserrat "Contribution to the development of optical networks for fiber optic sensors using fiber lasers" Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- [13] Pinto, Ana M.R. 2012. "Photonic cristal fiber for sensing applicactions". Tesis doctoral. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- [14] S. K. Turitsyn, S. A. Babin, A. E. El-Taher, P. Harper, D. V. Churkin, S. I. Kablukov, J. D. Ania-Castañon, V. Karalekas and E. V. Podivilov, "Random distributed feedback fibre laser", *Nature Photonics*, 4, (2010).
- [15] B. Spillman, Jr., and D. H. Crowne, "Optically powered and interrogated rotary position sensor for aircraft enginecontrol applications," *Opt. Laser Eng.* Vol. 16, pp 105–118, 1992.
- [16] R. C. Miller and R. B. Lawry, "Optically powered speech communication over a fiber lightguide," *Bell Syst. Tech. J.* Vol. 58, pp 1735–1741, 1979.
- [17] M. J. Landry, J. W. Rupert, and A. Mittas, "Photovoltaic array GaAs cells response driven by high power laserdiodes," *Sol. Cells*, Vol. 29, pp 283–301, 1990.
- [18] M. Bravo, M. A. Erro, J. M. Algueta, "Remote resilient FBG multiplexing network controlled by a powered-by-light fiber optic switch", *Proc. of SPIE* Vol. 8421, 84218F
- [19] V. DeMiguel-Soto, M. Bravo, M. Lopez-Amo, "Fully switchable multiwavelength fiber laser assisted by a random mirror" *OPTICS LETTERS* / Vol. 39, No. 7 / April 1, 2014
- [20] M. Bravo, V. DeMiguel-Soto, A. Ortigosa and M. Lopez-Amo, "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".

[21] M. Bravo, V. DeMiguel, A. Ortigosa and M. López-Amo “Fully-Switchable Multi-Wavelength Fiber Lasers Based on Random Distributed Feed-Back for Sensors Interrogation”, Journal of Lightwave Technology, enviado 6 septiembre 2014

6. MATERIAL UTILIZADO

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)		
	Chromatic Dispersion	< ±10 ps/nm		
Filter Control (Note 2)	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		± 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 Erblio (EDFA)

MARCA MPB

MODELO P21

ESPECIFICACIONES

Rango típico de operación

1525-1565nm

Saturación potencia de salida

>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

Pérdidas de inserción

<i>Puerto 1</i>	PA (50%)	3.56dB
	PB (50%)	3.57dB
<i>Puerto 2</i>	PB (50%)	3.67dB
	PA (50%)	3.33dB
<i>Estabilidad con la polarización</i>	<0.15dB	
<i>Directividad</i>		>55dB

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

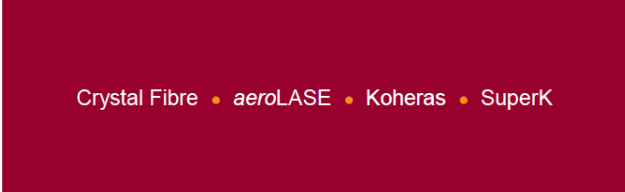
Circulador de tres puertos

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)



PM-1550

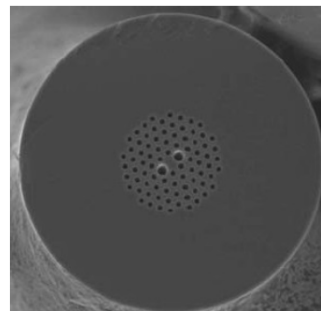
Single mode polarization-maintaining fiber with short beat length



- 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.

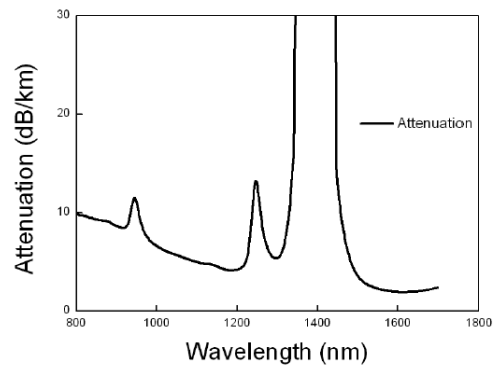
Furthermore it has reduced bend-induced coupling between polarization states, an improved polarization extinction ratio, and is 30 times less temperature sensitive than conventional Hi-Bi fiber.



- Applications**
- Sensors
 - Gyroscopes
 - Interferometers

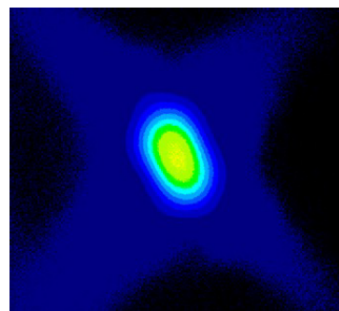
Optical properties at 1550 nm	
Single mode	Yes
Attenuation	< 2 dB/km
Mode field diameter (1/e ²)	6.8/4.3 ± 0.5 μm
Mode field ellipticity	1.5
Beat length (typical)	< 4 mm
DGD	2.25 ± 0.25 ns /km
PER	> 18dB
Chromatic dispersion	55 ± 5 ps/nm/km

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

7. 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 (€)
OSA Advantest Q8384	278	6	1.668
Láser Raman IPG RLD-3-1445	280	1	280
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
3508 euros			

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	44363 €

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

ANEXO A

Códigos de Matlab utilizados

Programa de procesamiento de datos recogidos del Analizador de espectros ópticos para la optimización del ancho de banda de las líneas de emisión

```

clear all
close all
clc
n_pinchos=20;
landa_inicial=round(1542.14*100);
x=1530.5:35/2048:1565.5;
x=x(1:2048);
xround=round(x(1:2048).*100);

x_primerpincho=find(xround ==landa_inicial,1);

for i=10:20
    y=load(strcat('0.',num2str(i),'.txt'));
    y=y(1:2048);
    anch=i/100;
    for j=1:n_pinchos
        a=round((x_primerpincho+((j-1)*0.8/(x(2)-x(1))))-(anch/(x(2)-x(1))));
        b=round((x_primerpincho+((j-1)*0.8/(x(2)-x(1))))+(anch/(x(2)-x(1))));
        l(j)=max(y(a:b));
    end
    maximo=max(l);
    %%%criterio:numero de picos con poca potencia
    c1=0;
    for k=1:n_pinchos
        if l(k)<maximo-3
            c1=c1+1;
        end
    end
    cri1(i-9)=c1;
    %%%criterio picos mas potentes

```

```

l_lineal=10.^(l/10);
cri2(i-9)=sum(l_lineal)/length(l);

figure()
plot(x,y);
end
[min,pos]=min(cri1);
[max1,pos2]=max(cri2);
anchura_mejor_segun_criterio1=0.1+(pos-1)*0.01
anchura_mejor_segun_criterio2=0.1+(pos2-1)*0.01
%%grafica de potencia media en funcion de anchura
anchura=0.1:0.01:0.2;
plot(anchura,cri2);
cri2dB=10*log(cri2);
figure()
plot(anchura,cri2dB)

```

Programa de procesamiento de datos recogidos del Analizador de espectros ópticos para analizar los datos de estabilidad del láser

```

n_pinchos=25;
anch=0.17;
landa_inicial=round(1536.60*100);
x=1530.5:35/2048:1565.5;
x=x(1:2048);
xround=round(x(1:2048). *100);

x_primerpincho=find(xround ==landa_inicial,1);
%load x100GHz_00x2C15_25picos_estabilidad5min_10sec.txt;
[fil col]=size(x100GHz_00x2C17_25picos_estabilidad10min_10sec);

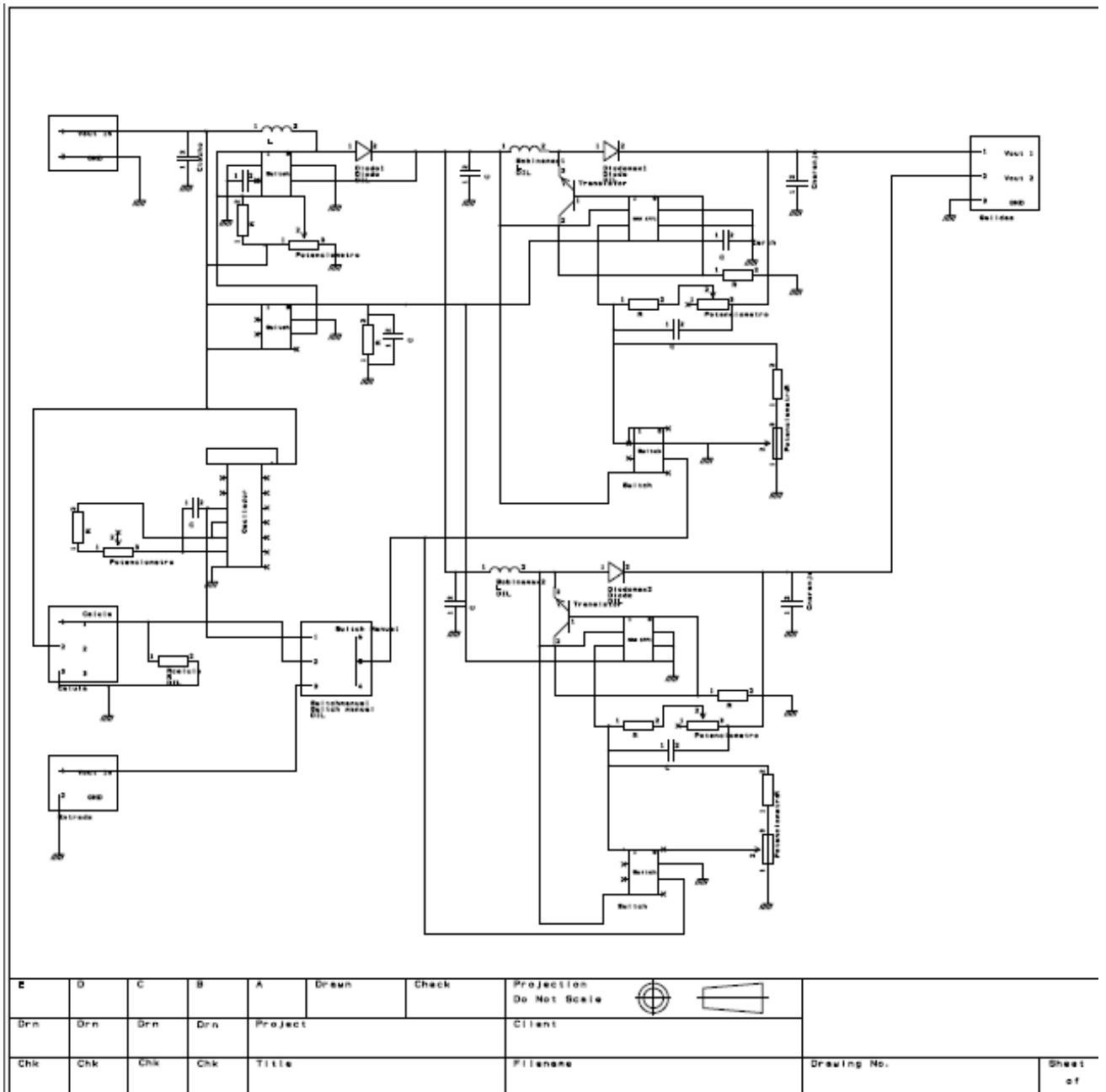
for i=1:col
  y=x100GHz_00x2C17_25picos_estabilidad10min_10sec(:,i);
  for j=1:n_pinchos
    a=round((x_primerpincho+((j-1)*0.8/(x(2)-x(1))))-(anch/(x(2)-x(1))));
    b=round((x_primerpincho+((j-1)*0.8/(x(2)-x(1))))+(anch/(x(2)-x(1))));
    l(j)=max(y(a:b));
  end
  matriz_picos(:,i)=l;
end
for k=1:n_pinchos
  maximo=max(matriz_picos(k,:));
  minimo=min(matriz_picos(k,:));
  matriz_estabilidad(k,1)=maximo;
  matriz_estabilidad(k,2)=minimo;
end
ejex=0:10:10*(length(matriz_picos(1,:))-1);
% M=[ejex' matriz_picos(13,:)];
% xlswrite('est_200GHZ.xls', M)
% N=[x' estabilidad_sinrandom1548nm_35nm_5s_2min(:,3)
estabilidad_sinrandom1548nm_35nm_5s_2min(:,13)

```

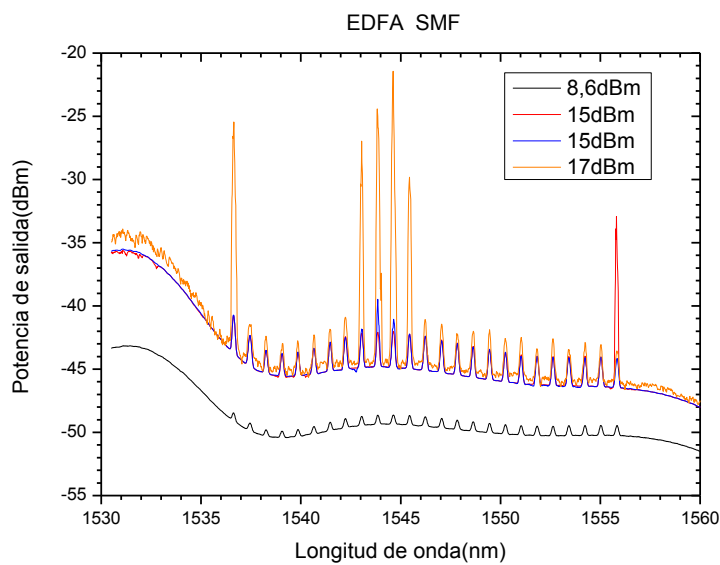
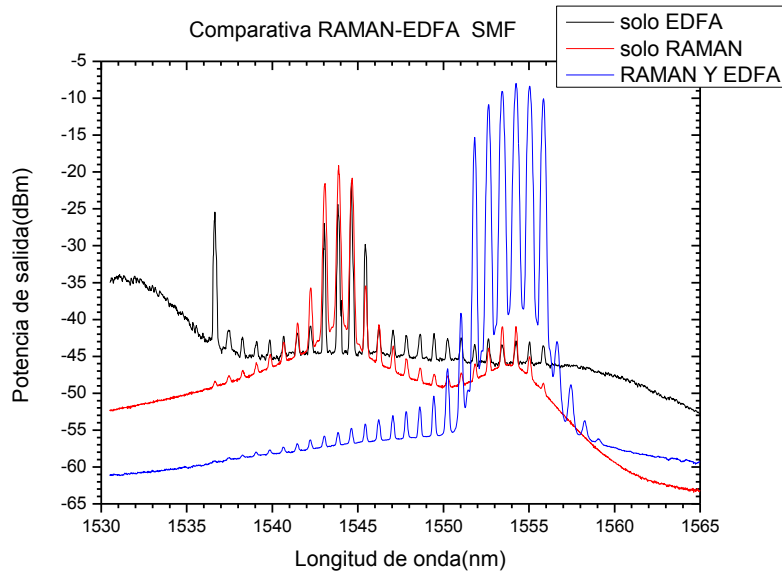
```
estabilidad_sinrandom1548nm_35nm_5s_2min(:,24)  
estabilidad_sinrandom1548nm_35nm_5s_2min(:,25)];  
% xlswrite('est_sinrandom_graficas.xls', N)  
plot(matriz_estabilidad)  
figure()  
plot(matriz_picos(18,:), 'r')  
hold on  
%plot(matriz_picos(9,:), 'b')  
hold off  
figure()  
for i=1:25  
    hold on  
    plot(x, estabilidad2min_10s_200Ghz_18_00x2E01(:,i))  
    hold off
```


Anexo B

Circuito controlador del conmutador óptico utilizado



ANEXO C



Espectro resultante de medir la estructura láser con cavidad lineal y con amplificador EDFA