

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Estudio experimental de un conversor en longitud de onda usando láseres de fibra óptica



Grado en Ingeniería
en Tecnologías de Telecomunicación

Trabajo Fin de Grado

Nombre y apellidos del autor: Daniel Ventura Rípodas

Nombre y apellidos del director/es: Rosa Ana Pérez Herrera

Pamplona, 21 de Enero de 2016





Agradecimientos a...

Todas las personas del laboratorio de óptica que me han ayudado cuando lo he necesitado, en especial a mi directora Rosa Ana por tener mucha paciencia y aconsejarme en los momentos más difíciles en este Trabajo Fin de Grado.



Resumen

Este trabajo fin de grado ha sido realizado por Daniel Ventura Rípodas, estudiante de Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación. Elegí realizar este proyecto porque la comunicación óptica es la especialidad que más me interesa dentro de la rama de las telecomunicaciones.

Los objetivos alcanzados más importantes han sido la realización de un estudio práctico del comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra óptica y la demostración experimental de un conversor en longitud de onda para modulaciones de hasta varios GHz dentro de un láser de fibra óptica mediante el uso de redes de difracción de Bragg (FBG). Este montaje experimental ha servido además para la realización de medidas de temperatura con una mayor resolución, haciendo uso de nuevo de los FBG.

Para conseguir dichos objetivos se ha necesitado tomar una gran cantidad de datos y mediciones con los equipos del laboratorio para posteriormente analizarlos y justificar las suposiciones teóricas.

Abstract

This work has been carried out by Daniel Ventura Rípodas, engineering student in Telecommunication Technologies Degree. I chose this project because Optical Communication is the area of telecommunications that interests me the most.

The main achieved goals in this work have been the study of modes behavior inside an optical fiber laser and the experimental demonstration of a wavelength converter by using modulation up to several GHz. The analyzed structure has been an optical fiber ring laser using Fiber Bragg Gratings (FBG). This experimental setup has also employed for temperature measurements with higher resolution.

A large amount of measurements have been carried out in the optical laboratory by using different types of equipment and to analyze and justify the theoretical predictions.



Lista de palabras clave

- OSA = Analizador de espectros óptico
- BOSA = Analizador de espectros óptico de alta resolución
- CP = Controlador de polarización
- WDM = Multiplexación por división en longitud de onda
- GHz = Gigahercios
- TFG = Trabajo fin de grado
- EDFA = Amplificación de fibra dopada con erbio
- EDF = Fibra dopada con erbio
- EDFL = Láser de fibra dopada con erbio
- VOA = Atenuador óptico variable
- FBG = Redes de difracción de Bragg
- OSNR = Relación señal-ruido óptica
- AM = Modulación en amplitud
- ASE = Emisión de amplificación espontánea
- FASE = Emisión de amplificación espontánea hacia delante
- BASE = Emisión de amplificación espontánea hacia atrás
- SMF = Fibra monomodo estándar
- SOP = Estado de polarización



Resumen	3
Abstract.....	3
Lista de palabras clave	4
1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	7
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	8
2.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA	8
2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con tierras raras.....	8
2.1.2. Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA).....	9
2.1.3. Ganancia en los EDFA.....	10
2.1.4. Ruido en los EDFA	11
2.1.5. Competencia por la ganancia en los EDFA.....	12
2.1.6. Comparativa de los amplificadores EDFA vs Raman.....	12
2.2. TIPOS DE FIBRA ÓPTICA	15
2.2.1 Fibra dopada con tierras raras	16
2.2.2 Fibra monomodo SMF.....	17
2.3. DIAPOSITIVOS ÓPTICOS	18
2.3.1 WDM	18
2.3.2 Atenuadores ópticos.....	18
2.3.3 Acopladores	19
2.3.4 Aisladores.....	20
2.3.5 Controlador de polarización	21
2.3.6 Redes de difracción en fibra	22
2.3.7 Circulador Óptico	23
2.4 EL LÁSER DE FIBRA ÓPTICA	24
2.4.1 Introducción	24
2.4.2 Tipos de láser	24
2.4.3 El láser de fibra.....	25
2.5. VENTAJAS Y APLICACIONES DEL LÁSER DE FIBRA	28
2.6. LIMITACIONES DE LOS LÁSERES	29
2.6.1. Forma de la ganancia	29
2.6.2. Spatial Hole Burning.....	29
2.6.3. Láseres multilínea	30
2.6.3.1. Ecuilización.....	31
2.6.3.2. Estabilidad.....	31
2.6.4. Modos y estabilidad.....	32



2.6.4.1.	Absorbente saturable.....	33
2.6.4.2.	Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales.....	33
2.7.	SENSORES DE TEMPERATURA.....	34
2.7.1.	Introducción.....	34
2.7.2.	FBGs	34
2.7.3.	Sensibilidad de los FBGs.....	35
2.8.	MODULACIÓN	35
2.8.1.	Modulación de amplitud.....	36
2.8.2.	AM con doble banda lateral y portadora completa (AM completa)	36
2.9.	POLARIZACIÓN	39
2.9.1.	La polarización de la luz en las comunicaciones por fibra óptica.	39
3.	PROCESO EXPERIMENTAL	41
3.1.	Estudio experimental del comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra	41
3.2.	Estudio experimental de un conversor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.....	51
3.2.1.	Modulación entre 16 GHz y 20 GHz.....	52
3.2.2.	Modulación entre 4 GHz y 12 GHz.....	60
3.3.	Estudio experimental de un conversor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica basado en circuladores para diferentes frecuencias de modulación.	64
3.4.	Estudio experimental de un conversor de varias longitudes de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.	68
3.5.	Estudio experimental de un conversor de longitudes de onda y su aplicación como sensores de temperatura de mayor precisión.....	71
3.5.1.	Estudio de dos láseres de fibra óptica modulados y empleados como sensores de temperatura.....	72
3.5.2.	Estudio de tres láseres de fibra óptica como sensores de temperatura	78
	Conclusiones.....	82
	Bibliografía	83
	Anexo A.....	85
	Anexo B	91



1. INTRODUCCIÓN, MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

El láser es el principal componente activo para transmisiones ópticas, hoy en día esenciales para las comunicaciones. Este proyecto surge como motivación por estudiar y analizar el láser de fibra, así como las estructuras avanzadas de fibra óptica para la generación de láseres multilínea, donde se utilizan diversos dispositivos ópticos comerciales, amplificación óptica y redes de difracción en fibra (Fiber Bragg Gratings, FBG).

En este proyecto utilizaremos estructuras en anillo de fibra óptica en combinación con FBGs para realizar láseres de fibra, utilizándolos como sensores para tomar mediciones de temperatura debido a que su construcción los hace inherentemente sensibles a esta variable.

Por otro lado, los FBG se usan también para la generación de láseres multilínea; para ello se requiere normalmente la presencia de cavidades recirculantes donde se introduce amplificación óptica con el fin de conseguir la estimulación de las longitudes de onda correspondientes a las FBGs. Gracias a las reducidas pérdidas de inserción y la gran selectividad de las redes de difracción se conseguirán láseres con una buena relación de señal a ruido (SNR) [1].

La amplificación óptica se suele conseguir mediante dos métodos diferentes en función de las necesidades del sistema. Así a veces se utilizan fibras dopadas con Erblio (Erbium Doped Fibers, EDF) junto con un bombeo externo (a 980nm o 1480nm) de una onda continua para conseguir un EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier). Este tipo de amplificación está orientada al desarrollo de láseres de fibra no distribuidos, ya que emplea longitudes del orden de unos pocos metros para obtener niveles de amplificación aceptables. La otra forma de conseguir amplificación es la basada en no linealidades como la dispersión Raman, obteniendo una amplificación distribuida a lo largo de toda la fibra.

Por consiguiente, el desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica es un tema en pleno desarrollo y actualmente de gran interés. Como demuestran el creciente número de publicaciones actuales relacionadas con este tema en revistas de alto índice de impacto y en los mejores congresos de fotónica del momento.

Este proyecto tiene como objetivos principales:

- I. Estudio experimental del comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra.
- II. Estudio experimental de un convertor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.
- III. Estudio experimental de un convertor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica basado en circuladores para diferentes frecuencias de modulación.
- IV. Estudio experimental de un convertor de varias longitudes de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.
- V. Estudio experimental de un convertor de longitudes de onda y su aplicación en sensores de temperatura de mayor precisión.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este segundo apartado se presenta una breve descripción de los fundamentos teóricos, del tipo de fibra utilizada y de los dispositivos ópticos empleados para el diseño de las estructuras de láseres multilínea que han servido como base para la realización de este trabajo fin de grado.

2.1. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA

La amplificación óptica es el proceso por el cual se incrementa la potencia de una señal óptica manteniendo el resto de sus características sin necesidad de realizar reconversiones opto-electrónicas. Se trata de un elemento fundamental en el desarrollo de estructuras tales como los láseres de fibra [1].

Existen dos ventajas básicas en los amplificadores de fibra óptica, respecto a los amplificadores convencionales. La primera es que la potencia de bombeo necesaria es mucho menor, debido a que esta se distribuye en una zona de unas pocas micras (μm) en el interior de la fibra, por lo que se consigue más fácilmente la intensidad de bombeo necesaria para la amplificación. Y, en segundo lugar, que la fibra óptica puede enrollarse fácilmente, ocupando poco volumen, lo que permite utilizar amplificadores muy largos, para conseguir la máxima ganancia compatible con la potencia de bombeo utilizada.

En la actualidad existen tres tipos básicos de amplificadores de fibra óptica: los de núcleo dopado con iones de tierras raras, los de dispersión Brillouin estimulada y los de dispersión Raman estimulada.

En este proyecto nos centraremos en los primeros donde la acción láser se obtiene por emisión estimulada, correspondiente a la transición entre dos niveles del ion de tierra rara, y las longitudes de onda de bombeo y de amplificación quedan fijadas por la estructura de niveles de dichos iones.

2.1.1. Amplificadores de fibra dopada con tierras raras

Los amplificadores de fibra dopada se obtienen al dopar el núcleo de las fibras ópticas con iones de materiales pertenecientes al grupo de las tierras raras (Er^{3+} , Tm^{3+} , Pr^{3+}). La elección del dopante dependerá de la longitud de onda sobre la que se quiera obtener la amplificación. Para el rango de 1280 a 1340 nm se utilizan iones de Praseodimio (Pr^{3+}), para la ventana de 1450 a 1520 nm iones de Tulio (Tm^{3+}) y finalmente para el rango de 1500 a 1600 nm se utilizan iones de Erblio (Er^{3+}). Estos últimos son los más utilizados dada la baja atenuación que proporciona la 3ª ventana en comunicaciones ópticas. Se han realizado estudios para el desarrollo y optimización de amplificadores en las tres ventanas [2].

El medio activo del amplificador es el núcleo dopado de la fibra. La inversión de población se consigue mediante el bombeo óptico a longitudes de onda concretas, provocando que los iones del medio dopante pasen de un estado fundamental a otro excitado, consiguiendo así la emisión estimulada.

Dicha inversión de población que se va produciendo a lo largo de la fibra, va a su vez debilitando la intensidad de bombeo, llegando a hasta un punto que este comienza a ser incapaz de producirla. Este fenómeno condiciona la longitud que debe tener la fibra, llamada longitud óptima, para no desaprovechar su capacidad de amplificación, si se hace más corta, y evitar que parte de la fibra sea absorbente, si se hace más larga.



Otro aspecto de importancia para conseguir un amplificador óptimo, es la influencia de la concentración del dopante. Parece más razonable (por problemas de espacio) utilizar fibras cortas altamente dopadas, que fibras largas débilmente dopadas. Pero esto no es válido, ya que cuando se tienen altas concentraciones se provocan interacciones entre los iones dopantes, que dejan de excitarse y se destruye la inversión de población, lo que disminuye la eficiencia del amplificador. Debido a esta razón se suelen usar fibras amplificadoras largas (de varios metros de longitud normalmente) y con baja concentración de dopante [3].

2.1.2. Amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA)

La longitud de onda de operación de los sistemas desarrollados en el proyecto está dentro de la 3ª ventana, por lo que se han utilizado amplificadores de fibra dopada con Erbium (Erbium doped fiber amplifiers, EDFA). Además, con este tipo de amplificadores se consiguen hasta 40 y 50 dB de ganancia (en régimen de baja señal de entrada), con potencias de bombeo moderadas (de varias decenas de mW) [4].

En la siguiente figura se muestra el diagrama de los niveles de energía del erbio y las longitudes de onda de bombeo necesarias para alcanzarlos.

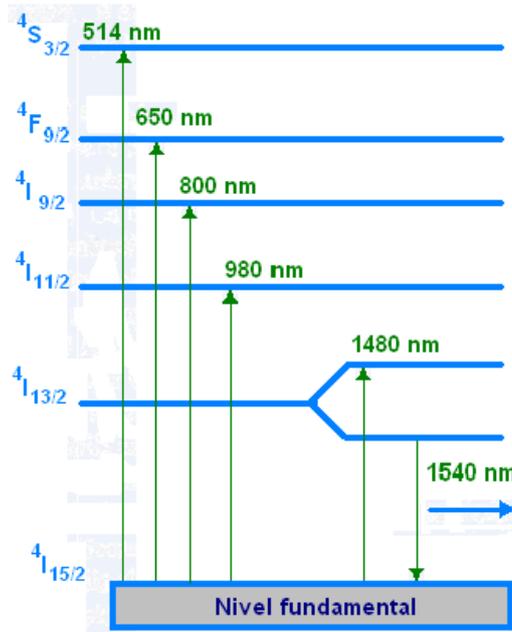


Figura 2.1. Niveles de energía del erbio [3].

Como se aprecia en la representación anterior, la amplificación se da en el salto del último estado (entro los niveles de energía $4I_{13/2}$ y $4I_{15/2}$). Hay diferentes longitudes de bombeo, pero por diversos motivos las dos más utilizadas y más eficientes son: 980 y 1480 nm. Con el fin de conseguir estabilidad en la potencia y en la longitud de onda emitidas, se requiere un control de la corriente de alimentación y de la temperatura de los láseres emisores. Esto último se lleva a cabo mediante refrigeradores que operan por efecto Peltier y para ayudar en la estabilización de la longitud de onda, suelen usarse también redes de Bragg de fibra óptica.

En la figura 2.2 se muestra un esquema básico para un EDFA bombeado en ambos sentidos. Los aisladores se encargan de garantizar que la señal a amplificar solo circule en una dirección. Dicho



bombeo se introduce mediante un multiplexor en longitud de onda (Wavelength Divisor Mutiplexer, WDM) permitiendo de esta forma combinar la señal a amplificar con el bombeo que excitará a los iones de Erblio. Al tratarse de un medio que permite la propagación en ambos sentidos, el bombeo puede ser bidireccional.

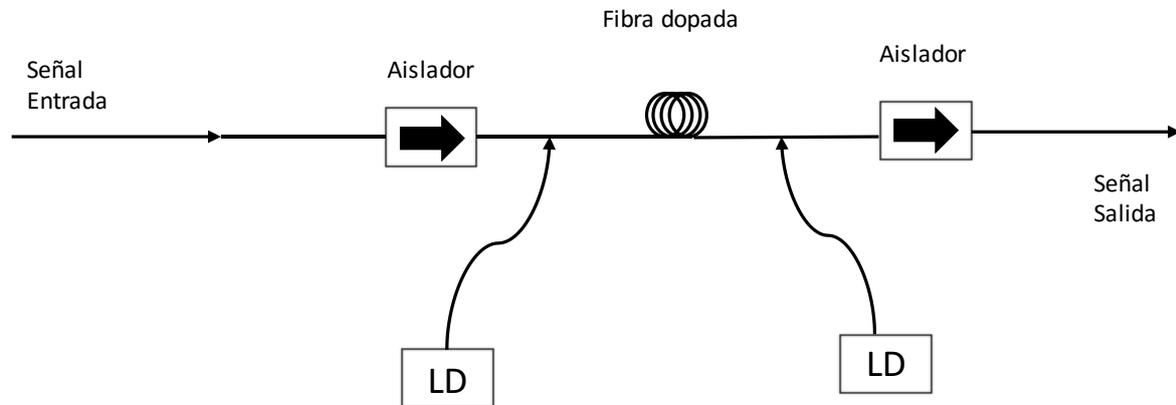


Figura 2.2. Esquema típico de amplificador dopado con Erblio, con bombeo bidireccional [1][3].

2.1.3. Ganancia en los EDFA

Hay que tener en cuenta que la optimización de la ganancia depende de la longitud óptima de la fibra y de la dependencia de esta con parámetros como: la longitud de onda, la potencia del bombeo y la señal.

Al aumentar la potencia del bombeo conseguiremos invertir la población en un trozo de fibra más larga, aumentando así la longitud óptima de esta. Si estamos trabajando en longitudes de onda donde el bombeo es más eficiente y es absorbido más rápidamente a lo largo de la fibra, la longitud óptima es menor. Y por último si aumenta la potencia de la señal, se provocan más emisiones estimuladas, lo que implica disminuir la inversión de población y, por tanto, se acorta la longitud óptima (menos ganancia, pero más potencia de salida).

Como variamos la longitud de onda varía la probabilidad de emisión estimulada y como consecuencia lo hace la ganancia, de forma que cuando estas son mayores, la inversión de población se reduce y a su vez lo hace la longitud óptima de la fibra [3].



En la figura 2.3 se puede ver el espectro típico de ganancia de un EDFA bombeado a 980nm.

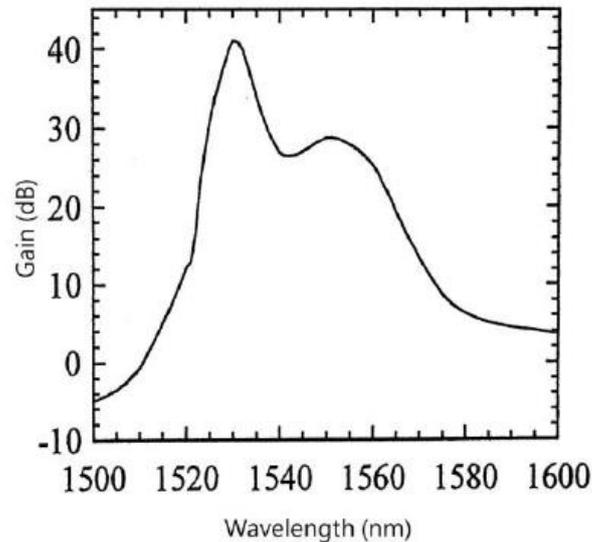


Figura 2.3. Espectro de la curva típica de ganancia de un EDFA [3].

2.1.4. Ruido en los EDFA

El ruido de un EDFA viene producido principalmente por el proceso de emisión espontánea (Amplified Spontaneous Emission - ASE). Durante el bombeo se producen emisiones espontáneas de fotones, que al propagarse por el propio EDFA son amplificadas en la banda de la tercera ventana (1550 nm).

Existen dos tipos de ASE dependiendo del sentido de propagación con respecto al de la señal de entrada. Si es en el mismo se conoce como ASE+ o FASE (Forward Amplified Spontaneous Emission) y si es en sentido contrario se tendrá ASE- o BASE (Backward Amplified Spontaneous Emission) [1].

En la figura 2.4 se puede ver una comparación de ambos para un sistema en el que el bombeo se realiza en el mismo sentido al de la señal a amplificar. La forma del ASE se aproxima a la de la curva de la ganancia del EDFA.

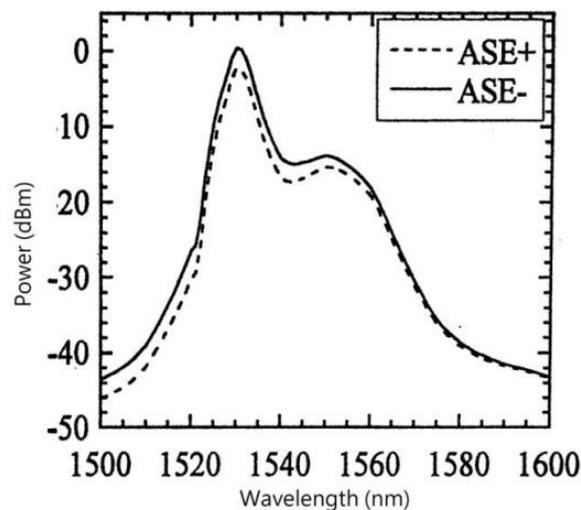


Figura 2.4. Espectro del ruido ASE [3].



2.1.5. Competencia por la ganancia en los EDFA

Es el fenómeno que se produce cuando la distribución de potencia en varios modos es inestable. La ganancia proporcionada por un EDFA tiene que repartirse entre las longitudes de onda presentes a su entrada. Esto se debe a que los átomos de la capa superior, conseguidos por la inversión de población mediante el bombeo, tienen que ser compartidos por todas las señales incidentes.

Este es un efecto que tiene una especial importancia en el diseño de láseres de fibra con varias longitudes de onda, donde el cambio de amplitud de una de ellas provocará que el resto de longitudes de onda experimenten variaciones, provocando la reducción de la estabilidad del sistema [1].

La competencia por la ganancia en los EDFA será importante en el desarrollo de este proyecto para poder explicar los diferentes fenómenos y problemas con la estabilidad que se explicarán más adelante.

2.1.6. Comparativa de los amplificadores EDFA vs Raman

EDFA

- Más utilizado en sistemas de comunicaciones ópticas:
 - Utilizado en la banda C (menor atenuación en la fibra)
 - Utiliza fibra según el estándar de la ITU-T G.652
- Ventajas:
 - Opera en el rango de 1520-1610 nm
 - $G > 45\text{dB}$, $P_{\text{out}} > 37\text{ dBm}$, $NF [3.5 \text{ a } 7]\text{ dB}$
 - Baja diafonía entre múltiples canales
 - Eficiente transferencia de energía del bombeo de la señal (mayor de 50%).
 - Amplificación directa y simultánea de una región ancha de la longitud de onda (en la región de 1550 nm) la potencia de salida es bastante alta como + 37 dBm, con una ganancia relativamente plana (mayor 20dB), el cual es conveniente para los sistemas WDM.
 - La salida de saturación es mayor a 1mW (10-25 dBm).
 - La constante de tiempo de ganancia es larga (mayor 100 ms) para superar los efectos de distorsión de la intermodulación (bajo ruido).
 - Rango dinámico largo (mayor de 80 nm).
 - Bajo ruido.
 - Posee un formato transparente de modulación óptica.
 - Polarización independiente (para reducir las pérdidas por acoplamiento en la transmisión de la fibra).
 - Es posible modificar EDFAs para que puedan ser operados en la banda "L".



- Desventajas:

- El espacio físico en donde se tienen que colocar ya que no son dispositivos pequeños.
- El espectro de ganancia no es plano.
- No son dispositivos pequeños (fibra es de varios kilómetros) y no puede ser integrado con otros dispositivos semiconductores.
- Presenta una emisión de luz amplificada espontánea (ASE). Eso es siempre y cuando no haya una señal de entrada, existe una señal de salida como resultado de iones excitados en la fibra y esta salida es llamado "ruido espontáneo".
- Hay ganancia de saturación.
- Acumulación de la dispersión cromática.
- Aparición de fenómenos no lineales
- No homogeneidad de la ganancia (cada longitud de onda se amplifica de diferente manera).
- No se pueden colocar filtros fácilmente, lo que aumenta el ruido y degrada las propiedades del amplificador.

RAMAN:

- Está basado en la dispersión estimulada de Raman, se puede aplicar en fibra común (no tiene que estar dopada con algún elemento)
- Utiliza fibra según el estándar de la ITU-T G.652
- G [10 a 15] dB, Pout >30 dBm, NF < 1 dB

- Ventajas:

- Puede trabajar en la región de 1250 a 1650 nm.
- El ancho de banda.
- Figura de ruido más bajo que EDFA
- Alta eficiencia con DCF (Compensadoras de dispersión) respecto a las pérdidas en la fibra.

- Desventajas:

- Alta diafonía entre canales (mayor que en EDFAs).
- Altas potencias de bombeo (aumenta los inconvenientes)

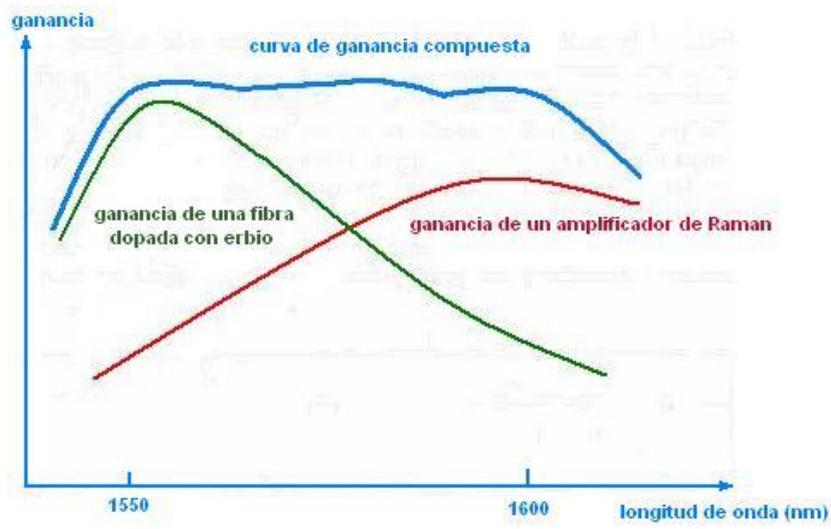


Figura 2.5. Comparativa de la ganancia de un amplificador Raman y un EDFA para un rango de longitudes de onda [5]

2.2. TIPOS DE FIBRA ÓPTICA

Cuando se analizan las principales características de las fibras ópticas, rápidamente se establece la diferencia entre fibras multimodo y fibras monomodo. De la misma manera, cuando se consultan las características de las fibras multimodo, fácilmente se observa que las más utilizadas son las de **62,5/125** y las de **50/125**, siendo estos números los diámetros en micras (milésimas de milímetro) del núcleo y del revestimiento respectivamente [6].

Sin embargo, al analizar las características de las fibras monomodo se observa que, al contrario que en las fibras multimodo, en ningún momento se indica el diámetro del núcleo de la fibra.

Por lo general, en el cuadro de propiedades geométricas y mecánicas de las fibras monomodo se indican con precisión los diámetros del revestimiento y del recubrimiento primario, pero no aparece el dato correspondiente al núcleo.

Sin embargo, al analizar los datos correspondientes a las propiedades ópticas, aparece un dato denominado *Diámetro Campo Modal* cuyas dimensiones en micrómetros coinciden razonablemente con el diámetro esperado para una fibra óptica monomodo.

El diámetro físico del núcleo es siempre el mismo, ya que es inherente al proceso de fabricación de las propias fibras monomodo, pero cuando la luz circula por el interior de estas fibras monomodo no lo hace solamente por el núcleo, sino que una parte significativa lo hace por el revestimiento o cladding [6].

Por lo tanto, a efectos de acoples entre fibras no importa tanto el diámetro físico del núcleo como el diámetro efectivo ocupado por la luz al propagarse por la fibra óptica. Esto es lo que se conoce como diámetro de campo modal, el cual incluye al núcleo y a una pequeña parte del revestimiento.

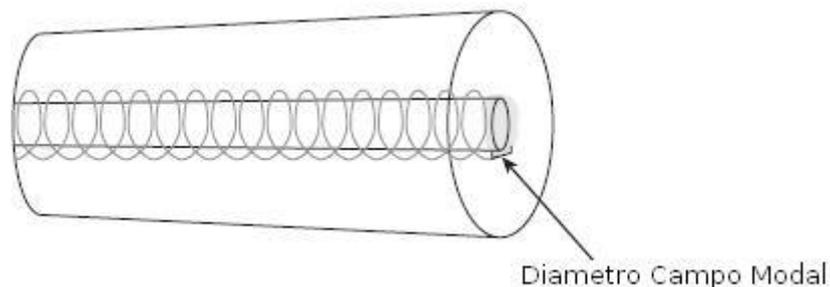


Figura 2.6. Forma en que se propaga la luz por el interior de las fibras monomodo [6].

En la imagen anterior se muestra la forma en que se propaga la luz por el interior de las fibras monomodo. En estas fibras sólo existe un único modo (equivalente, de alguna manera, a un único rayo de luz) que avanza tanto por el núcleo como por el revestimiento, y la cantidad de luz que se propaga por el revestimiento o *cladding* depende de la longitud de onda utilizada, lo cual hace que el diámetro de campo modal dependa a su vez de dicha longitud de onda utilizada.

A efectos prácticos, el diámetro de campo modal juega un papel fundamental en los siguientes aspectos:

1.- Unión de fibras ópticas monomodo: Es imprescindible que las fibras ópticas monomodo a fusionar o conectar tengan el mismo diámetro de campo modal, a fin de reducir las pérdidas en la unión al mínimo posible.

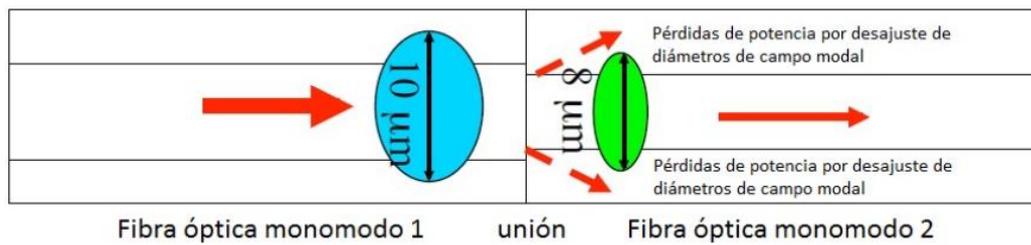


Figura 2.7. Unión de fibras ópticas monomodo y multimodo [6].

2.- Pérdidas por macrocurvaturas: Las fibras ópticas monomodo son muy sensibles a las pérdidas por macrocurvaturas y estas pérdidas son mayores cuanto mayor es el diámetro de campo modal.

3.- Pérdidas por microcurvaturas: Las pérdidas más importantes por causas extrínsecas son las pérdidas por radios de curvatura demasiado pequeños y por suciedad en los conectores. También por tensiones excesivas durante la instalación y por torsiones de la fibra.

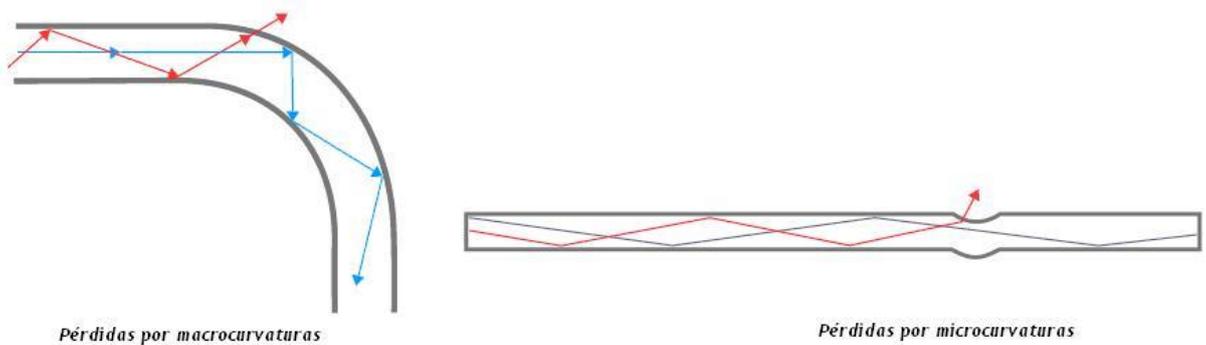


Figura 2.8. Representación gráfica de pérdidas por macrocurvaturas para dos tipos de fibra [6],[7].

Este parámetro será importante en la selección del tipo de fibra que se explica en el apartado experimental.

2.2.1 Fibra dopada con tierras raras

Como se ha comentado con anterioridad, este tipo de fibra óptica es utilizada como medio para obtener amplificación óptica. Se obtienen al dopar el núcleo de fibras ópticas con iones de elementos químicos, pertenecientes al grupo conocido como de tierras raras (Er^{3+} , Tm^{3+} y Pr^{3+}). El nivel de dopante en el interior de la fibra dependerá del tipo de amplificador y la elección del dopante utilizado se hará dependiendo de en qué longitud de onda se quiera trabajar.

El praseodimio (Pr^{3+}) se utiliza para aplicaciones en torno a 1310 nm, para la ventana de 1450-1500 nm se recurre a iones de tulio (Tm^{3+}) y por último el erbio (Er^{3+}) que cubre el rango de 1500-1600 nm. Existen otros elementos químicos con los que se dopan los núcleos de fibras para obtener láseres de fibra como son: el iterbio (Yb) y el neodimio (Nd) [3].

Dichos elementos tienen isótopos estables como son el ^{174}Yb y el ^{142}Nd , de los cuales los productos de desintegración primarios anteriores al ^{174}Yb son isótopos del elemento tulio y el principal producto de desintegración del ^{142}Nd es el praseodimio.



2.2.2 Fibra monomodo SMF

Como su nombre indica en estas fibras sólo se propaga un modo por lo que se evita la dispersión modal, debido a la diferencia de velocidad de propagación de los modos que se transmiten por la fibra. Esto se debe al pequeño tamaño de su núcleo menos de $9\ \mu\text{m}$. A su vez esto dificulta el acoplamiento de la luz, pero permite alcanzar mayores distancias y tasas de transmisión más elevadas que la fibra óptica multimodo.

La fibra monomodo o estándar, conocida por sus siglas en inglés SMF (Single Mode Fiber), tiene como características más destacadas una atenuación de unos $0,2\ \text{dB/km}$ y una dispersión cromática de $16\ \text{ps/km}\cdot\text{nm}$ en 3ª ventana ($1550\ \text{nm}$). En la segunda ventana la dispersión es nula pero la atenuación es mayor, casi el doble que en 3ª ventana.

Las siguientes gráficas muestran el perfil de su índice de refracción y la curva de atenuación con la longitud de onda.

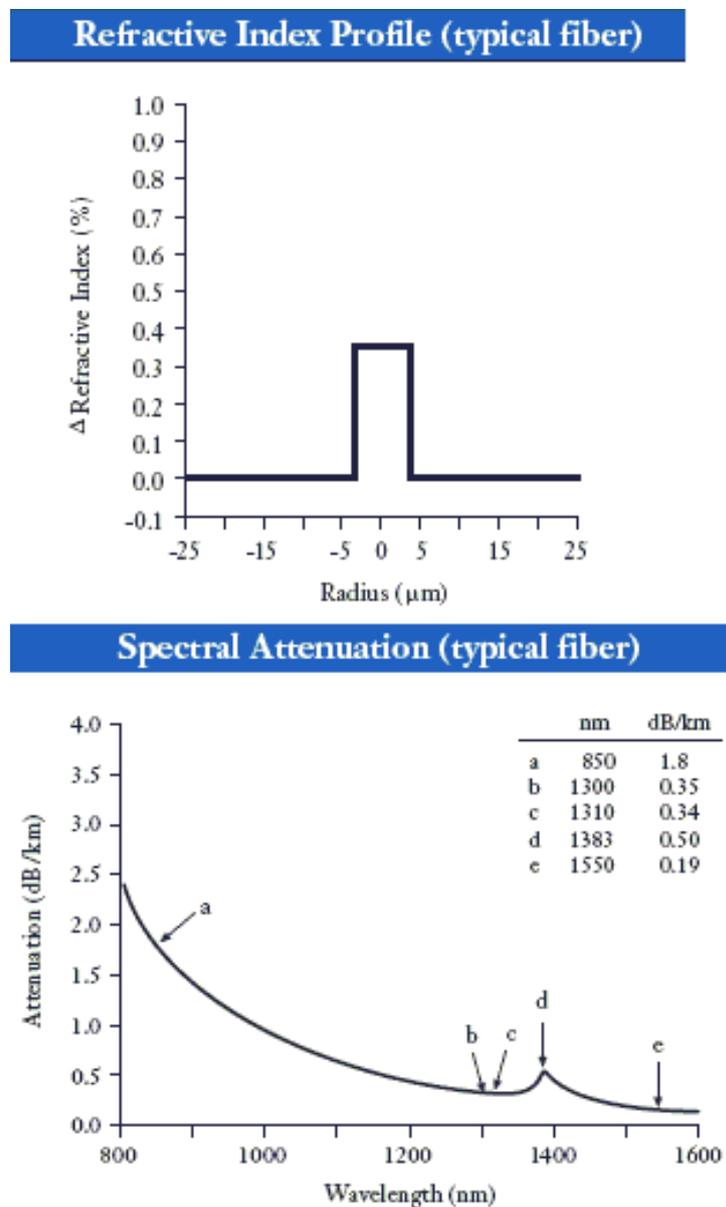


Figura 2.9. Perfil del índice de refracción y la curva de atenuación con la longitud de onda de una fibra SMF [3].

2.3. DIAPOSITIVOS ÓPTICOS

2.3.1 WDM

La multiplexación por división de longitud de onda (Wavelength Division Multiplexing) es una técnica que permite multiplexar n canales o señales sobre un sólo medio óptico (fibra óptica). A dichas señales se les asigna cierto ancho de banda, mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda procedente de un diodo LED o láser.

2.3.2 Atenuadores ópticos

El uso de atenuadores ópticos proporciona estabilidad y ecualización a los sistemas.

El atenuador es un elemento de suma importancia en los montajes. En esencia, es un mecanismo que introduce unas pérdidas a la cavidad (por ejemplo, mediante un tornillo micrométrico con el que controlan dichas pérdidas) y con ello se cambia la condición de ganancia del anillo, lo que cobra especial relevancia a la hora de conseguir emisión multilínea.

Existen principalmente dos categorías de atenuadores, los fijos y los variables. Cuando no se sabe el nivel de atenuación que se necesita, se utiliza el atenuador óptico variable (en nuestro caso de control manual), el cual ayuda a determinar de manera precisa el valor de atenuación que requiere el equipo [3].

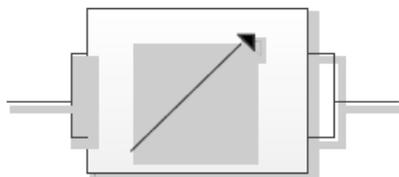


Figura 2.9. Atenuador variable óptico [3]

Generalmente este tipo de dispositivos lo que hacen es absorber la potencia extra; ya que, si la reflejase, la luz indeseada generaría ruido en nuestro sistema.

En el desarrollo de este TFG el uso de atenuadores ópticos variables ha sido clave para la consecución final del objetivo. Sin ellos los problemas de ecualización del sistema hubiesen hecho imposible la visualización correcta de los láseres de fibra óptica conseguidos.



Figura 2.10. Imagen de un atenuador variable óptico [3].

2.3.3 Acopladores

Surgen debido a la necesidad de distribución de múltiples señales ópticas. Dispone de M entradas (típicamente 1 o 2) y N salidas (2, 4, 8, 16, 32, 64), están diseñados para introducir pérdidas de inserción (IL) aproximadamente iguales para cada una de sus ramas, también se caracterizan con las pérdidas de retorno (RL).

Las características principales de los mismos son:

- Relación de acoplo
- Pérdidas de inserción
- Número de puertos de entrada y de salida
- Direccionalidad
- Selectividad de la longitud de onda
- Tipo de transmisión: monomodo o multimodo
- Sensibilidad a la polarización y pérdidas de polarización



Figura 2.11. Imagen de un acoplador comercial [3]

También existe un parámetro que caracteriza las pérdidas, llamado pérdidas en exceso (EL):

$$Excess Loss (dB) = 10 \log\left(\frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{P_{input}}\right)$$

La división de la señal no tiene por qué ser idéntica para cada una de las ramas, como veremos en las estructuras desarrolladas en la parte experimental utilizaremos acopladores con factores de acoplo 90:10 y 50:50. Los acopladores son sensibles a la dirección de propagación de la luz, aunque la mayoría son dispositivos bidireccionales [8], [9].

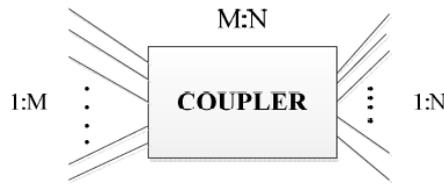


Figura 2.12. Acoplador M: N [3]

2.3.4 Aisladores

Los aisladores ópticos son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección. Su importancia en los sistemas de fibra óptica se debe a que detienen la reflexión y la dispersión de la luz, evitando que alcancen a elementos sensibles, particularmente láseres.



Figura 2.13. Aislador Óptico [3]

Su operación depende generalmente de materiales llamados rotadores de Faraday, los cuales provocan una rotación en la polarización de la luz debido al efecto Faraday. Donde el ángulo de rotación β , es siempre el mismo y viene determinado por: $\beta = vBd$; en donde v es la constante de Verdet del material, B es el flujo de densidad magnética en la dirección de propagación y d la longitud del rotador.

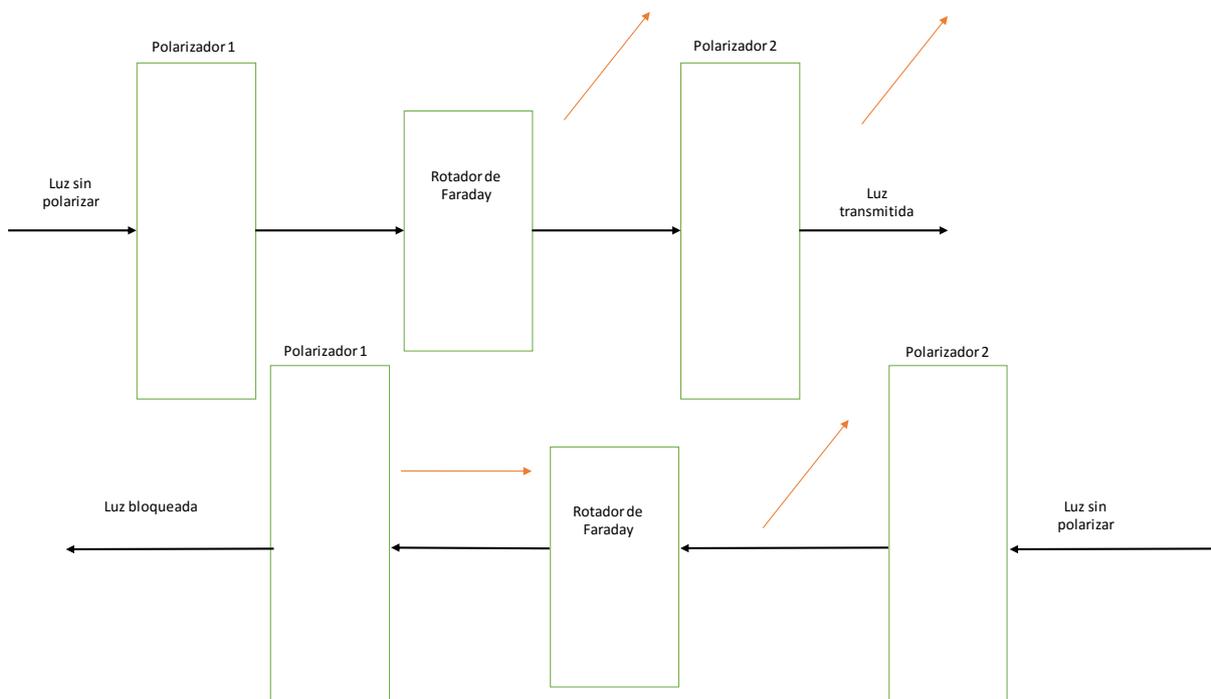


Figura 2.14. Gráfico de funcionamiento de un aislador [3]

Este diseño tiene el problema de que la mitad de luz (ya sea horizontal o vertical) es desechada, lo que suponen 3 dB de pérdidas. Existen otros diseños más complicados y refinados, que logran evitar dicho problema.

En el desarrollo de este TFG los aisladores han sido colocados dentro de un anillo de fibra con el fin de que no aparezca el efecto del *hole-burning*, es decir, hace que la señal viaje en un único sentido.

2.3.5 Controlador de polarización

Es un elemento óptico que permite modificar el estado de polarización de la luz, y que suele ser de manejo manual. Un controlador de polarización puede tener la tarea de transformar una polarización fija conocida en una arbitraria, aunque lo más general es la transformación de una polarización arbitraria en otra polarización arbitraria.

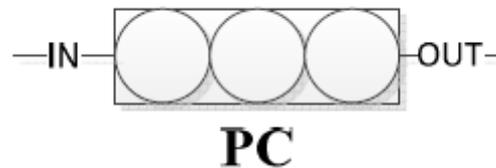


Figura 2.15. Controlador de polarización [3]

Dicho dispositivo puede obtenerse por ejemplo colocando en el camino óptico tres placas giratorias en cascada: una primera placa de $\lambda/4$ que está orientada a transformar la polarización elíptica incidente en polarización lineal, una placa $\lambda/2$ que transforma esta polarización lineal en otra polarización lineal y de nuevo una segunda placa de $\lambda/4$ que transforma la otra polarización lineal en la polarización elíptica deseada a la salida.

También pueden implementarse con óptica de espacio libre, en ese caso la luz sale de la fibra pasa a través de las tres placas, que pueden girarse con total libertad para permitir un ajuste de polarización y luego entra en la fibra. Otro modo de polarizar la luz, es mediante la aplicación de un estrés controlado a la propia fibra.

El principal inconveniente en el funcionamiento de un controlador de polarización es que deberá ser reajustado cada vez que se produzca una variación en las condiciones de la fibra.

Pueden entresarse ya cuáles serán los requisitos que deberá satisfacer un controlador de polarización para que su funcionamiento sea aceptable:

- Poder adaptar dos estados cualesquiera, es decir, ser capaz de transformar cualquier SOP (estado de polarización) que llegue a su entrada en cualquier otro que se desee.
- Funcionamiento sin fin, o capacidad para estar persiguiendo continuamente un SOP desconocido que, ya sea de forma rápida o lentamente, va variando. Como se verá, algunos de los dispositivos utilizados para el control de la polarización presentan un margen de funcionamiento finito, con lo que cabe la posibilidad de que alcancen su límite. El problema podrá solventarse implementando algoritmos de control del dispositivo que lo devuelvan a su margen correcto sin dejar de adaptar los SOP. Estos algoritmos conllevan, por regla general, utilizar en el dispositivo más elementos que los estrictamente necesarios para el control instantáneo del SOP.

- Rapidez, para que el receptor no sufra pérdidas inaceptables durante su funcionamiento debido a que el controlador no pueda seguir las variaciones introducidas por la fibra.
- Pérdidas de inserción bajas [10].

Cualquier dispositivo cuya birrefringencia sea ajustable podrá ser utilizado como controlador de polarización.

En el montaje se usan unos bucles rotables de fibra: aprovechando que al curvar una fibra se induce en ella birrefringencia, se crean elementos que, al ser rotados, se comportan como láminas retardadoras. Su principal ventaja son sus bajas pérdidas de inserción por tratarse de trozos de fibra óptica estándar. Debe ser ajustado mecánicamente, ya sea de modo manual o mediante motores, lo cual implicará lentitud, además de fatiga mecánica.

2.3.6 Redes de difracción en fibra

Una red de difracción clásica de óptica de volumen es una superficie reflexiva con una serie de líneas, o surcos, paralelas, las cuales provocan que la luz incidente se refleje con diferentes ángulos de salida en función de la longitud de onda.

Se puede desarrollar una red de difracción en el núcleo de una fibra óptica (FBG) provocando una variación periódica de su índice de refracción. Estas variaciones en el índice de refracción de la fibra provocan la refracción de la luz, el llamado efecto Bragg. La dispersión de Bragg no es exactamente igual al fenómeno de la difracción en una red de difracción. Un FBG tiene la propiedad de reflejar selectivamente una banda de frecuencias estrecha centrada en la longitud de onda de Bragg, λ_B . Esta longitud de onda es proporcional al período de variación del índice de refracción, Λ , y al índice de refracción efectivo de la guía de onda, n_{eff} .

$$\lambda = 2 n_{eff} \Lambda$$

Cada vez que la luz atraviesa una zona con un índice de refracción más grande, parte se refleja hacia atrás. Si la longitud de onda coincide con la separación de las regiones de la fibra con un índice de refracción mayor, la onda reflejada en cada una de estas zonas forma una interferencia constructiva, como se muestra a continuación.

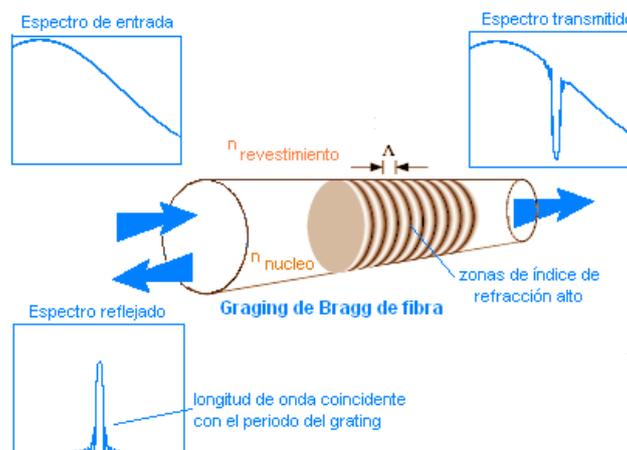


Figura 2.16. Los FBG de fibra reflejan las longitudes de onda de la luz que coinciden con el período del grating y dejan pasar el resto de longitudes de onda [11].



Existen tres tipos de FBGs periódicos: uniforme, apodizado y chirpeado [8], [9], [12].

2.3.7 Circulador Óptico

El circulador es un dispositivo con varios puertos cuya funcionalidad es permitir el paso de toda la luz que entra por uno de sus puertos hacia el siguiente puerto. Como se muestra en el siguiente esquema la luz que entra por el puerto 1 se dirige al puerto 2 y la luz que entra por el puerto 2 se dirige al 3.

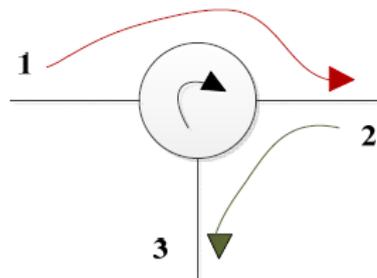


Figura 2.17. Circulador óptico [3]

En la siguiente figura se muestra el esquema de un circulador de cuatro puertos, 3 de ellos de entrada/salida y el cuarto solo de salida. El funcionamiento de este esquema se basa en el visto para el aislador óptico independiente de la polarización de la señal de entrada. Este está formado por rotadores de Faraday, laminas en $\lambda/2$ y SWP Spatial Walk-off Polarizator [3].

Como puede observarse la señal que entra por el puerto 1 se dirige únicamente al puerto 2, la señal que entra por el puerto 2 se dirige al 3 y así sucesivamente.

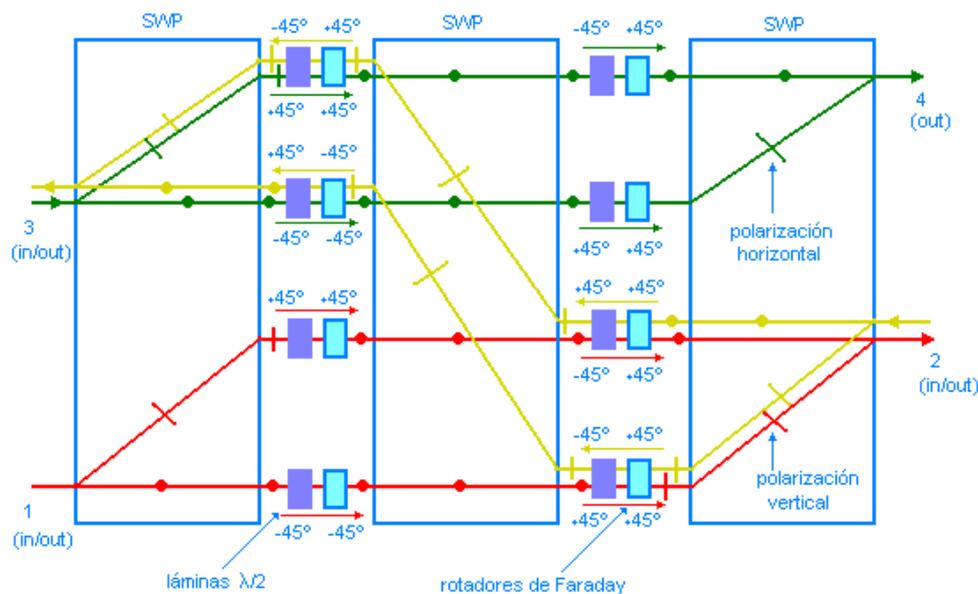


Figura 2.18. Esquema de un circulador [3]

2.4 EL LÁSER DE FIBRA ÓPTICA

2.4.1 Introducción

En un láser el concepto básico es la amplificación de la luz a partir de la emisión estimulada de radiación. Para obtener amplificación de la luz de un medio dado es necesario establecer una inversión de poblaciones entre un par elegido de niveles de energía y promover la emisión estimulada a expensas de la emisión espontánea. En la práctica, es necesario contar con algunos medios de realimentación óptica de modo que el haz estimulado pasa de ida y vuelta varias veces. La ganancia del sistema debe ser positiva. Restringiendo el modo láser entre dos espejos, uno totalmente reflejante y otro parcialmente reflejante [13].

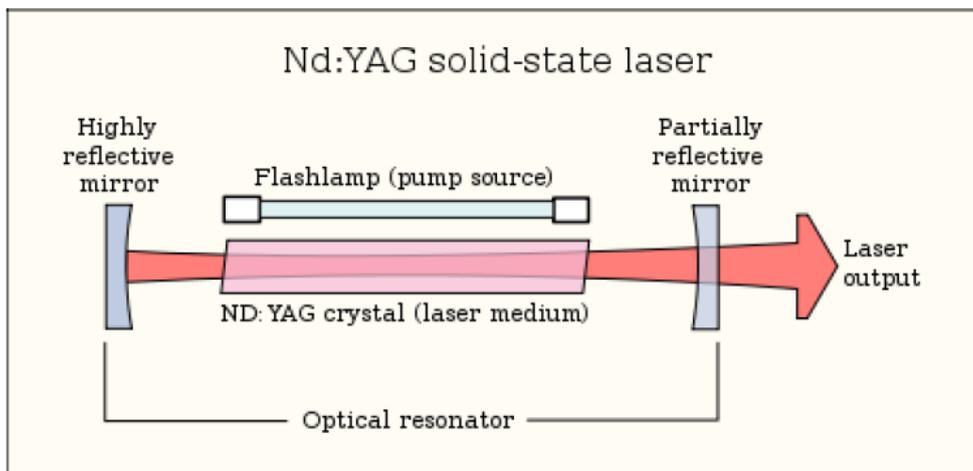


Figura 2.19. Diagrama esquemático de un láser tipo, mostrando las tres partes importantes [13].

Antes de continuar, se realizará una breve exposición del desarrollo histórico que han seguido los láseres de fibra.

Antes de los años 60 ya se conocía la capacidad de amplificación de luz de las tierras raras. En 1961, [3] Snitzer propuso usar una fibra óptica como medio amplificador y como cavidad resonante. Durante los años posteriores se siguió avanzando en esta idea, pero las fibras utilizadas presentaban muchas pérdidas. A mediados de los 80, cambios en los procesos de fabricación permitieron, por una parte, una gran disminución en las pérdidas de propagación y, por otra, incorporar iones de tierras raras en el núcleo.

En 1985 un grupo de la Universidad de Southampton consiguió el primer láser de fibra usando neodimio. Se observó que el ion de erbio trabaja mejor en la tercera ventana, la ventana de transmisión con menos pérdidas en las fibras basadas en silicio. A pesar de constituir un sistema laser de tres niveles, una vez puesto en forma de fibra el erbio permite confinar una gran potencia en poco espacio, por lo que se consigue una alta densidad de energía logrando amplificación con potencias de bombeo muy bajas. El primer laser con fibra dopada con erbio lo realizó el mismo grupo de Southampton en 1986. Fue el primer láser de tres niveles operando en modo continuo a temperatura ambiente que se consiguió, lo que indicaba el potencial de estos láseres [3]. En la actualidad existe abundante material publicado acerca de los láseres multilínea [14]-[17].

2.4.2 Tipos de láser

Existen muchos tipos de láseres diferentes. Estos se pueden clasificar por su longitud de onda de emisión, desde las microondas hasta los rayos X; por su potencia, desde milivatios hasta petavatios;



por su régimen de emisión, pulsados o continuos; por las características de su medio activo, sólidos, líquidos o gaseosos; o por otras características; y cada uno de estos tipos tiene unas utilidades muy diversas.

A continuación, se muestra una tabla según el tipo de característica:

Láser	Medio Activo	Régimen de emisión	Rango de frecuencia de emisión	Potencia de pico máxima	Utilidades
Helio-Neón	Gas	Continuo	Rojo	10 mW	Metrología, Lector códigos de barras
Ion de Ar	Gas	Continuo	Verde-Azul	10W	Bombeo, Espectáculos
CO2	Gas	Continuo o pulsado	Infrarrojo	1kW	Corte, Soldadura, Cirugía
Excímero	Gas	Pulsado	Ultravioleta	1mW	Microprocesado, Cirugía
Químicos	Gas	Continuo	Infrarrojo	1mW	Escudos antimisiles
Colorante	Líquido o sólido	Continuo o pulsado	IR-Visible-UV	1W	Espectroscopia
Rubí	Sólido	Pulsado	Rojo	1kW	Investigación
Neodimio: YAG	Sólido	Continuo o pulsado	Infrarrojo	1GW	Bombeo, Procesado de materiales
Titanio: Zafiro	Sólido	Continuo o pulsado	Infrarrojo	1PW	Investigación, Pulsos ultracortos
Semiconductor	Sólido	Continuo	Infrarrojo-Visible	1mW-1kW	Comunicaciones, CD, DVD, Bombeo
Fibra	Sólido	Continuo o pulsado	Infrarrojo-Visible	1W-1kW	Procesado materiales, Comunicaciones, Espectroscopia

Tabla 1: Láser según el tipo de característica [13].

2.4.3 El láser de fibra

Un amplificador de fibra dopada con tierras raras se puede convertir en un láser situándolo dentro de la cavidad diseñada para proporcionar realimentación óptica. Tales láseres son llamados láseres de fibra. En este tipo de láseres hay fibras ópticas que actúan como medios de ganancia, tales como fibras dopadas con erbio, con iterbio, entre otras, aunque algunos láseres con un medio de ganancia semiconductor y un resonador de fibra han sido llamados láseres de fibra.

2.4.4 Tipos de láser según el tipo de ganancia

En este apartado se presenta la configuración para la obtención de láseres de fibra en función del medio de ganancia utilizado.



2.4.4.1 Láseres de fibra dopada con Erblio (EDFL)

Los láseres de fibra dopada con Erblio (Erbium doped fiber Lasers, EDFAs) pueden operar en un amplio rango de longitudes de onda desde el visible hasta el infrarrojo. La región más atractiva es la de 1550nm, ya que es la más utilizada en comunicaciones ópticas al contar con la menor atenuación.

Los EDFLs precisan de un bombeo externo a 980nm o bien a 1480nm. Para esta función se han desarrollado láseres de semiconductor orientados únicamente al bombeo de fibras dopadas con erbio como el de la siguiente figura.

En el caso de este TFG se utiliza un controlador de temperatura e intensidad para el bombeo a 980 nm. Con este dispositivo se pretende mantener el bombeo estable con una intensidad de potencia (mA) controlable desde la pantalla del controlador (variará dependiendo de cuánta potencia se desee introducir) y una temperatura constante (de unos 25°C)



Figura 2.20. Controlador Láser

Existen dos esquemas de bombeo diferentes, uno a 980 nm y otro a 1480 nm. Este último fue preferido en un inicio ya que los de 980 nm estaban en una fase de desarrollo y mejora, en la figura 2.22 se muestra la diferencia entre ellos.

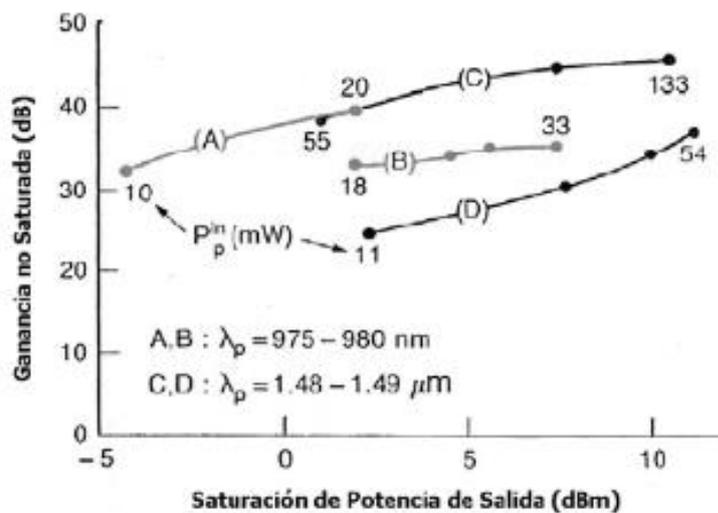


Figura 2.21. Comparación del bombeo a 980 nm y 1480 nm [18].

Entre lo más importante que podemos destacar de la figura anterior es:



- El bombeo a 980 nm es más eficiente (se obtiene más ganancia con menos vatios).
- El bombeo a 1480 nm permite obtener mayores ganancias, sobre todo mayores potencias de salida (aunque el precio a pagar es que se tiene que bombear a mayores potencias).
- Los amplificadores bombeados a 980 nm presentan mejoras frente al ruido.
- Algo que hay que tener en cuenta es que depende mucho de la aplicación que se implemente, ya que en base a eso se escoge un esquema de bombeo u otro.

La principal ventaja que hace que los EDFL sean los más empleados es la menor potencia necesaria de bombeo, de unos centenares de mW por los 1-4 vatios del caso de la amplificación Raman. Además, una segunda ventaja interesante que presentan es la posibilidad de diseñar láseres muy cortos, con lo que se reduce el número de modos longitudinales del láser, como se verá más adelante.

2.4.5. Tipos de láseres según el método de generación de las longitudes de onda

Los láseres de fibra basados en amplificación EDFA, así como amplificación Raman, precisan de algún tipo de sistema para la generación de longitudes de onda concretas. En este apartado se describen los principales métodos para conseguir esta selección, así como las características y ventajas de cada uno.

2.4.5.1. Generación mediante FBGs

El diseño de láseres mediante FBGs ha aumentado en los últimos años gracias a la evolución de las tecnologías de diseño. Actualmente se pueden conseguir FBGs con anchos de banda <0.2 nm y con reflectividades $>95\%$.

Los láseres diseñados en este proyecto se han basado en FBGs acompañados de amplificación EDFA. En la figura 2.23 se puede ver la creciente evolución en el número de publicaciones de láseres de fibra dopada con erbio con FBGs para la generación de múltiples longitudes de onda.

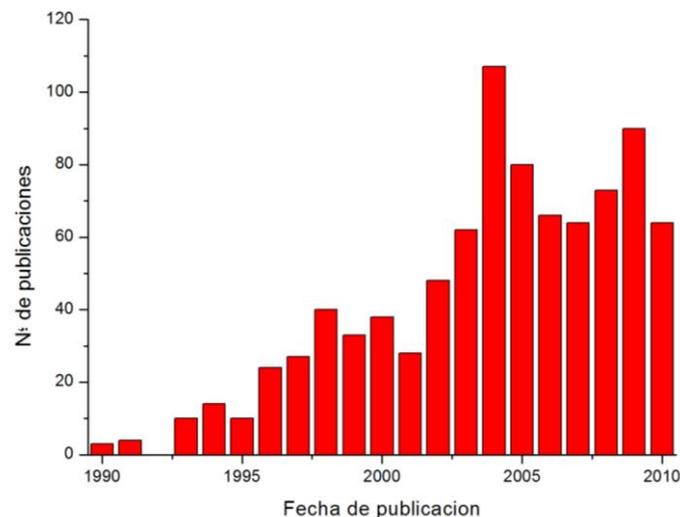


Figura 2.22. Gráfico de la evolución del Nº de publicaciones sobre EDFA con FBGs [1].

2.4.5.2. Generación mediante WDMs

Otro método parecido al anterior es la utilización de un WDM (Wavelength División Multiplexer) para la generación de las longitudes de onda. En el esquema de la figura 2.10 se puede ver como mediante un WDM se separan las longitudes de onda y de cada una se extrae parte mediante acopladores. El resto de la luz es de nuevo insertada en la cavidad mediante otro WDM y amplificada.

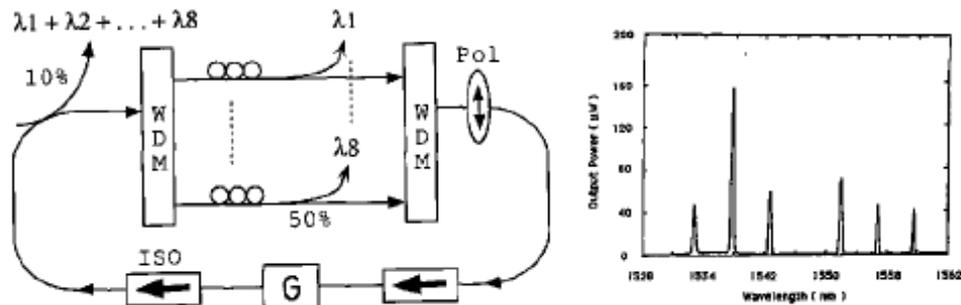


Figura 2.23. Esquema EDFL con WDM y su espectro óptico de salida [19]

En este caso y como se puede apreciar en los resultados, el sistema no está ecualizado, sin embargo, mediante la inclusión de atenuadores que controlaran cada longitud de onda se podría llegar a ese estado.

2.5. VENTAJAS Y APLICACIONES DEL LÁSER DE FIBRA

Las ventajas de los láseres de fibra con respecto a otros tipos incluyen:

- La luz ya está acoplada en una fibra flexible: el hecho de que la luz ya está en una fibra permite que sea entregado fácilmente a un elemento de enfoque móvil.
- Alta potencia de salida: los láseres de fibra pueden tener regiones activas de varios kilómetros de largo, por lo que pueden proporcionar ganancia óptica muy alta.
- De alta calidad óptica: las propiedades de guía de ondas de la fibra reducen o eliminan la distorsión térmica de la trayectoria óptica.
- Tamaño compacto: los láseres de fibra son compactos en comparación con los láseres de gas de potencia similar, debido a que la fibra puede ser doblada y enrollada para ahorrar espacio.
- Fiabilidad: los láseres de fibra presentan una alta estabilidad de vibración, mayor vida útil y está libre de mantenimiento.
- Alta potencia de pico y pulsos en nanosegundos permiten el marcado y grabado eficaz. La energía adicional y una mejor calidad del haz proporcionan bordes de corte limpios y velocidades de corte más rápidas.
- Bajo coste de obtención propia [13].

Aplicaciones de los láseres de fibra incluyen el procesamiento de materiales (marcado, grabado, corte), las telecomunicaciones, la espectroscopia, la medicina o las armas de energía dirigida.



2.6. LIMITACIONES DE LOS LÁSERES

En este apartado se presentan las principales limitaciones de los láseres de fibra óptica, así como medios y configuraciones utilizadas para reducirlos. La mayor parte de las limitaciones provienen de efectos derivados del medio de amplificación utilizada.

2.6.1. Forma de la ganancia

Uno de los principales problemas en la generación de láseres de fibra es el comportamiento de la ganancia del amplificador. Se puede diferenciar entre medio homogéneo e inhomogéneo, ambos ilustrados en la figura 2.25, donde las líneas delgadas corresponden a la curva de ganancia sin saturar y las líneas gruesas a la ganancia en saturación mediante la introducción de una señal a amplificar. [20]

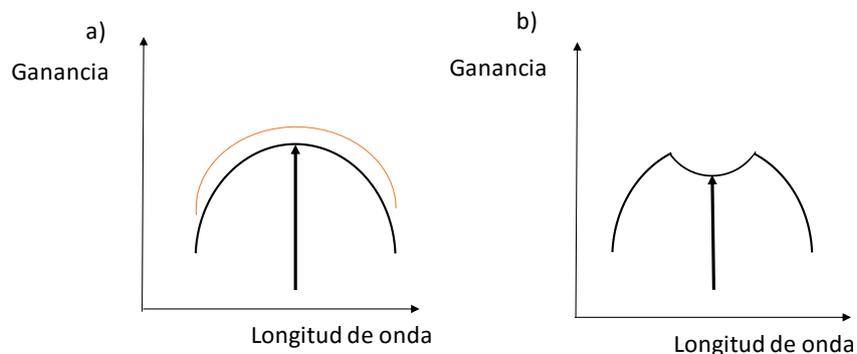


Figura 2.24. Curva de ganancia sin saturar (línea delgada) y saturada (línea gruesa) para un medio homogéneo (a) y un medio inhomogéneo (b).

Como se puede ver en el caso de un medio homogéneo, la saturación de la señal amplificada provoca que la curva de ganancia varíe en todo el espectro, mientras que en el caso inhomogéneo, sólo se satura la longitud de onda introducida manteniendo sin variación el resto del espectro.

Los EDFA tienen un comportamiento homogéneo a temperatura ambiente, la principal causa de este fenómeno es el tiempo de vida del estado excitado, al saturarse a una longitud de onda la energía de los estados excitados se reduce provocando una reducción de la emisión espontánea. Esto es un problema para la generación de EDFLs con múltiples longitudes de onda, ya que las variaciones de amplitud de una de ellas modificarán la curva de ganancia del amplificador y por lo tanto estará afectando directamente a la amplitud del resto de longitudes de onda provocando inestabilidades. Sin embargo, es posible conseguir que un EDFA se comporte de forma inhomogénea enfriando la fibra dopada a temperaturas de 77°K [24].

2.6.2. Spatial Hole Burning

El fenómeno llamado *spatial hole burning* es un proceso que se da en los láseres de fibra dopada con erbio en anillo. Cuando una señal viaja en ambos sentidos dentro del anillo se genera un patrón de interferencia dando lugar a una onda estacionaria. La inversión de población generada en la fibra dopada será consumida principalmente en los antinodos, obteniendo la amplificación en estos

puntos, mientras que en los nodos se acumularía la inversión de población sin producir amplificación. Este proceso es causante de inestabilidades del sistema [21].

La solución que se presenta es la introducción de aisladores a la salida de la EDF de forma que se asegure que la señal sólo circula en un único sentido. En determinados esquemas realizados con circuladores no son necesarios los aisladores ya que los circuladores garantizan el funcionamiento unidireccional del láser [20].

2.6.3. Láseres multilínea

Los láseres de emisión multilínea tienen gran interés en diversos campos, como en sistemas de comunicación con mecanismos multiplexores (WDM), sensores de fibra, procesado de señales, calibrado de instrumentos ópticos o espectroscopia. Por ello, es deseable conseguir un alto número de longitudes de onda, y que además sean sintonizables. También es importante que el láser opere en un gran espacio de longitudes de onda. Por el contrario, es imposible modular independientemente cada línea de emisión. Se ha conseguido emisión multilínea con láseres de semiconductor y también con láseres de fibra, normalmente en configuración de anillo.

Los requisitos para este tipo de fuentes ópticas son: elevado número de canales, moderada potencia de salida con buena señal relación ruido y espectro plano, funcionamiento SLM (Single Longitudinal Mode), capacidad de ajuste y colocación exacta de la frecuencia.

Los láseres de fibra ofrecen grandes posibilidades como fuentes de múltiples longitudes de onda. El principal reto en la producción de una salida multilínea con un láser de fibra dopado con erbio (EDFL) es el hecho de que el ion de erbio se satura homogéneamente a temperatura ambiente, evitando el funcionamiento estable de múltiples longitudes de onda.

Existen dos limitaciones principales, la ecualización de las amplitudes de cada longitud de onda y la estabilidad del sistema. Ambas limitaciones están asociadas a la amplificación, en el primer caso dependerá de cómo se reparta la ganancia disponible en el momento de ajustar el láser, mientras que en el segundo caso dependerá del comportamiento del sistema ante fluctuaciones de amplitud.

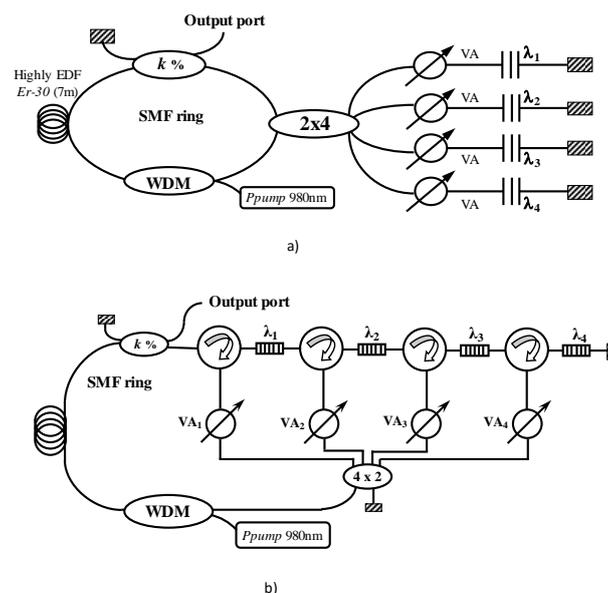


Figura 2.25. (a) Configuración experimental para la topología paralela con acopladores. (b) Configuración experimental para la nueva topología con circuladores [25].



2.6.3.1. Ecuación

La ecuación de láseres de fibra óptica multilínea que se han realizado en este TFG, se ha llevado a cabo mediante el uso de atenuadores ópticos variables para cada longitud de onda. Mediante esta configuración logramos controlar la ganancia para cada canal. Pero a cambio desperdiciamos parte de la potencia de las señales, con lo que se reduce la eficiencia de la estructura.

En el desarrollo experimental de este TFG, el control de la ecuación mediante atenuadores ópticos variables es clave para la consecución de los resultados esperados.

2.6.3.2. Estabilidad

Definimos la estabilidad del sistema como la diferencia entre el valor máximo y el mínimo de la amplitud para una longitud de onda durante un intervalo de tiempo concreto. Los EDFAs se comportan como un medio homogéneo a temperatura ambiente, lo que provoca variaciones importantes de estabilidad en los sistemas multilínea.

Uno de los métodos más utilizado en investigación es sumergir la fibra dopada con erbio en nitrógeno líquido consiguiendo así enfriarla a 77°K. A esta temperatura el medio se comporta de forma inhomogénea consiguiendo así una mayor estabilidad.

Mediante este método también se puede conseguir aumentar el número de longitudes de onda simultáneas con la condición láser, ya que la ganancia se conserva en todo el espectro y se reduce la competencia. En la figura 2.27 se puede ver una comparación de un estudio donde a temperatura ambiente sólo existe una longitud de onda con condición láser y varias longitudes de onda que no consiguen esta situación. Sin embargo, al enfriar la fibra con nitrógeno líquido desaparece esta competencia por la ganancia y aumenta el número de longitudes de onda que consiguen la condición láser [1].

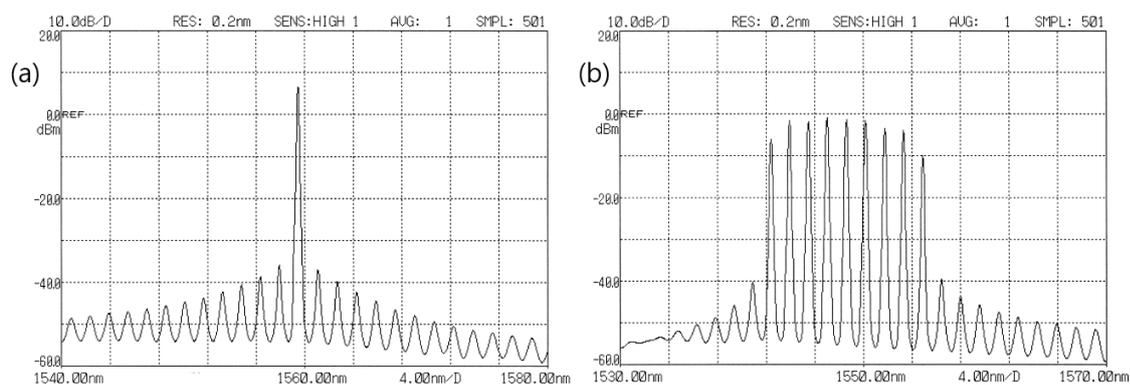


Figura 2.26. Espectro de salida del láser a temperatura ambiente (a) y después de enfriar la fibra a 77°K (b) [24].

Mediante este método se obtienen muy buenos resultados, sin embargo, fuera del campo de la investigación no es factible su utilización en redes de comunicaciones estándar, dado el elevado coste de mantenimiento que precisan los equipos refrigerados con nitrógeno líquido.



2.6.4. Modos y estabilidad

Los láseres de fibra óptica con configuración en anillo tienen una función de transferencia propia, por lo que se generan resonancia a determinadas longitudes de onda o modos longitudinales. Este es un factor importante en el diseño de láseres de fibra, ya que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Lo ideal es conseguir que el sistema sea monomodo, consiguiendo así las mejores condiciones de estabilidad.

El número de modos longitudinales de una N viene definido por la siguiente expresión, donde n es el índice de refracción de la fibra, L la longitud total del anillo y λ la longitud de onda de operación del láser.

$$N = \frac{n \cdot L}{\lambda}$$

El número de modos longitudinales del láser estará limitado por el ancho de banda de la ganancia, como se puede ver en la siguiente figura.

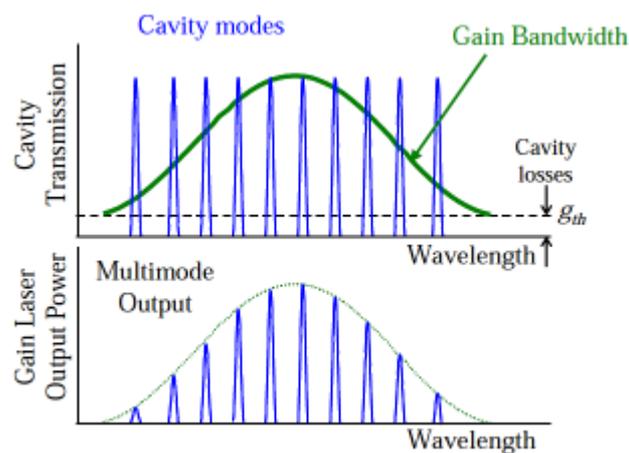


Figura 2.27. Espectro modos y curva ganancia por separado (arriba), modos amplificados (abajo) [1].

En sistemas en los que se utilizan FBGs para seleccionar las longitudes de onda de emisión del láser, el número de modos vendrá dado por el BW-3dB del FBG.

Como se ha comentado el objetivo es diseñar láseres multilínea que operen en un sólo modo longitudinal o en su defecto con el menor número de ellos. Esta característica es importante a la hora del diseño de láseres de fibra, debido a que la presencia de varios modos provoca inestabilidades al existir competencia entre ellos. Buscamos que el sistema sea monomodo, para obtener así mejores condiciones de estabilidad.

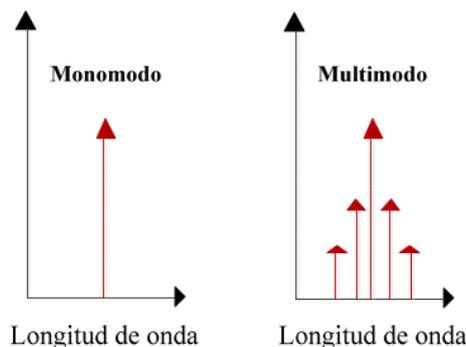


Figura 2.28. Láseres monomodo y multimodo [3].



A continuación, se presentan diferentes soluciones utilizadas para este propósito.

2.6.4.1. Absorbente saturable

Este método está basado en la fibra dopada con erbio. En este caso se introduce un tramo de determinada longitud de EDF sin que ésta sea bombeada, consiguiéndose así que se comporte como un medio absorbente provocando que muchos de los modos naturales de la cavidad no alcancen la condición de emisión láser y favoreciendo así también la estabilidad del sistema.

A mayor concentración de dopante, mayor será el efecto de absorción del medio, evitando con esto que algunos modos naturales de la cavidad de nuestro sistema no alcancen la condición de láser, favoreciendo así la estabilidad del mismo [3].

2.6.4.2. Efecto de la supresión inducida de modos longitudinales

Este efecto se consigue mediante la eualización del sistema a través de los atenuadores ópticos variables (VOA) en cada rama del mismo, de manera que ambas longitudes de onda tengan el mismo nivel de potencia óptica de salida. El objetivo es conseguir que la respuesta del láser sea monomodo y para ello utilizamos los atenuadores hasta ajustar las potencias de las diferentes longitudes de onda utilizadas en el sistema.

Nos aprovecharemos de este efecto en el desarrollo de nuestras estructuras y lo mediremos con la ayuda de un equipo llamado BOSA, para comprobar que sucede. A continuación, se muestra un ejemplo. En él se aprecia la respuesta de un láser para una longitud de onda antes de utilizar atenuadores ópticos (a) y una vez que se han introducido en el sistema consiguiendo una respuesta monomodo (b).

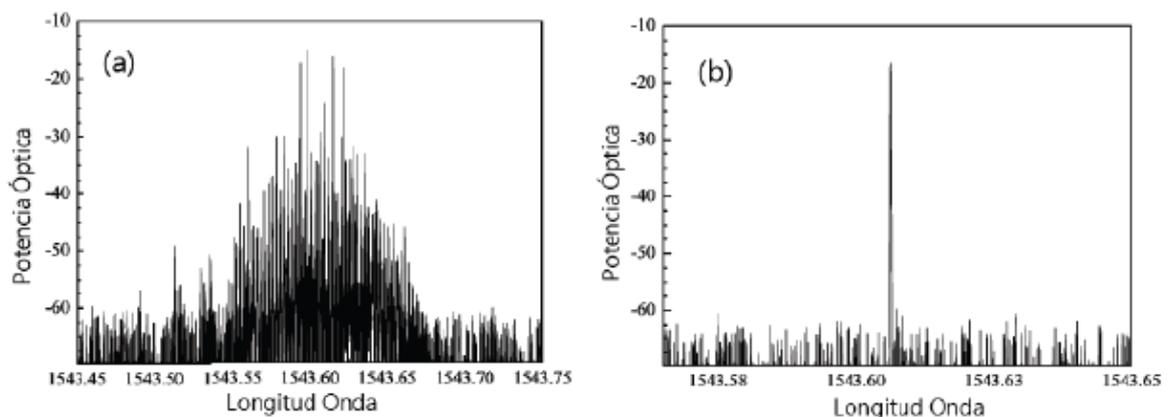


Figura 2.29. Espectro óptico salida multimodo para λ_1 (a), espectro de salida monomodo para λ_1 (b) [28].



2.7. SENSORES DE TEMPERATURA

2.7.1. Introducción

En los años noventa el campo de las telecomunicaciones se vio potenciado por el descubrimiento de las propiedades de la fibra óptica monomodo y de los amplificadores de fibra óptica dopados con erbio (EDFA).

A partir de estos descubrimientos y con el objetivo de obtener cada vez mejores velocidades de transmisión la investigación en la utilización y creación de dispositivos basados en fibra óptica ha aumentado considerablemente.

Dentro de esta serie de investigaciones se dio lugar a la creación de dispositivos conocidos como redes de difracción de Bragg (FBGs por sus siglas en inglés) que tuvieron como función inicial el filtrado de determinadas frecuencias en la transmisión de datos. En el año de 1993 se consolida la fabricación en masa de estos dispositivos debido a dos hallazgos cruciales: el método de fabricación de redes de difracción de Bragg por máscara de fase y las fibras ópticas cargadas con hidrógeno, que permiten, en primer lugar, estandarizar y optimizar el proceso de fabricación de las redes de difracción, y segundo, incrementar la fotosensibilidad de la fibra óptica a la luz, lo que permite reducir el costo de fabricación.

Las redes de difracción de Bragg no solo se han estudiado para aplicaciones en telecomunicaciones; desde su creación se ha tenido interés en aprovechar las propiedades de estos dispositivos para la medición de diferentes variables físicas dadas las múltiples ventajas que supone la utilización de la fibra óptica como instrumento de medición (entre otras: tamaño y peso reducidos, capacidad de multiplexación e inmunidad a interferencias electromagnéticas).

Los sensores basados en FBGs son una fibra óptica a la que se le ha introducido una perturbación periódica en el índice de refracción de su núcleo. Esta perturbación es usualmente inducida por la exposición de la fibra a un patrón de luz ultravioleta generado por una máscara de fase. Debido a la periodicidad de esta perturbación, una longitud de onda específica se verá filtrada cuando es transmitida a través de la fibra óptica.

Este hecho convierte automáticamente a la fibra óptica en un elemento sensor dado que las variables externas que afectan el entorno de la fibra óptica tienen un efecto en la periodicidad de la perturbación. A partir de la fabricación en masa de los sensores basados en redes de difracción de Bragg y de su estudio teórico, los esfuerzos se han centrado en la utilización y aplicación de estos dispositivos. Inicialmente los sensores de tipo FBGs fueron utilizados para tomar mediciones de temperatura y deformación, debido a que su construcción los hace inherentemente sensibles a estas variables, sin embargo, su gran aplicabilidad forzó rápidamente a que se diera su utilización en la medición de otro tipo de variables de manera indirecta. Es así como se han utilizado para el cálculo de otras variables como vibración, aceleración, presión, peso, entre otras [26].

2.7.2. FBGs

Los sensores tipo FBG son principalmente redes de difracción uniformes para las cuales se asume que la fibra óptica no tiene pérdidas en las frecuencias de interés y que sólo soportan un modo de transmisión propagante y otro contrapropagante.

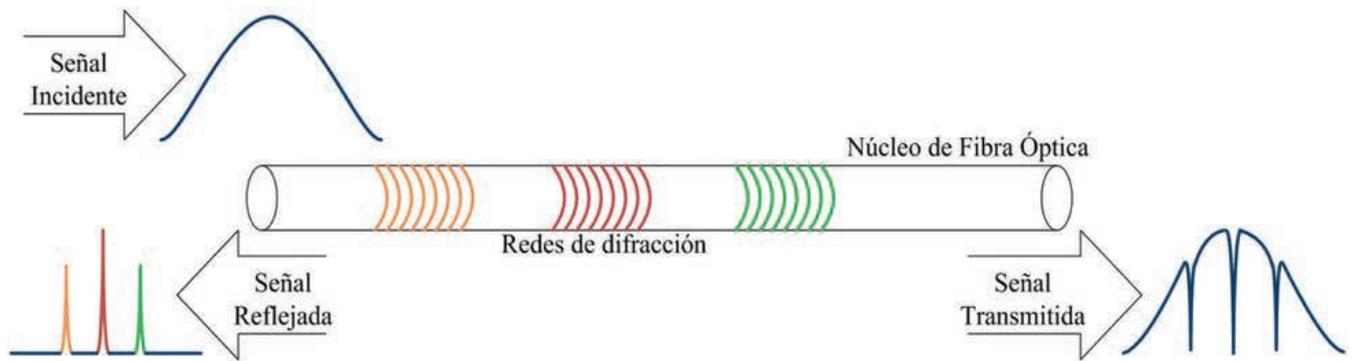


Figura 2.30. Esquema de funcionamiento de las redes de difracción de Bragg, cada rejilla o red de difracción actúa como un filtro estrecho alrededor de una longitud de onda [26]

2.7.3. Sensibilidad de los FBGs

La longitud de onda reflejada por un FBG está directamente relacionada con los cambios en tensión mecánica o temperatura que se ejercen directamente sobre el área de la fibra óptica en el cual se encuentra inscrita el FBG.

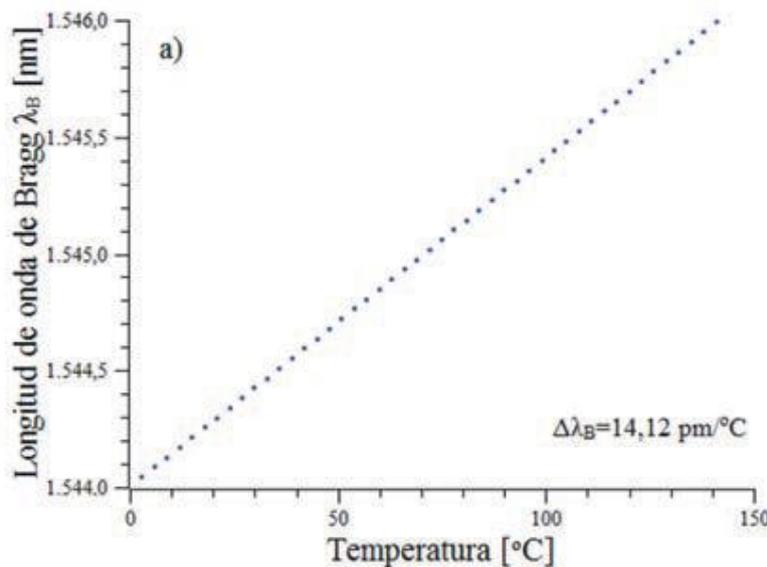


Figura 2.31. Relación teórica para una red de difracción de Bragg inscrita en 1544 nm entre la longitud de onda reflejada y la temperatura (a) de 14,1 pm [26]

2.8. MODULACIÓN

El proceso de modulación puede definirse de varias formas:

- a) Traslado del espectro de una señal en banda base a una señal en banda de paso.
- b) Variación de los parámetros (amplitud, frecuencia o fase) de una señal designada como portadora, de acuerdo a las variaciones de una señal de información o moduladora.



Para llevar a cabo la modulación es necesaria una señal senoidal de frecuencia ω_c , superior a la de la señal de información, designada como portadora que, mezclada con una señal de información en banda base producirá una señal de amplitud, frecuencia o fase variable. La modulación es, esencialmente, un proceso de mezcla [27].

2.8.1. Modulación de amplitud

En este tipo de modulación, la amplitud de la portadora varía según la señal de información, de modo que la información de amplitud y frecuencia de ésta se “montan” sobre la portadora haciendo que su envolvente varíe de acuerdo a la señal moduladora o de información. Los diversos esquemas de modulación de amplitud se designan también como de envolvente variable y comprenden los siguientes:

- AM con portadora completa y dos bandas laterales o *AM completa*.
- AM con dos bandas laterales y portadora suprimida (AM-DSB-SC5).
- AM con dos bandas laterales y vestigio o piloto de portadora.
- Banda lateral única (BLU o SSB6) sin portadora.
- Banda lateral única con piloto de portadora.
- AM con vestigio de banda lateral o AM con banda lateral vestigial (AMVSB).

Para el desarrollo de este trabajo se ha utilizado un modulador de amplitud y como esquema de modulación hemos usado la AM completa. Posteriormente, en el apartado experimental se explicará cómo afecta la modulación a nuestro montaje y qué relación tiene con la competición de ganancia [27].

2.8.2. AM con doble banda lateral y portadora completa (AM completa)

La señal de amplitud modulada completa suele expresarse en la forma siguiente:

$$\begin{aligned} s(t) &= V_c [1 + m \cos(\omega_m t)] \cos(\omega_c t) = \\ &= V_c \cos(\omega_c t) + \frac{V_c \cdot m}{2} [\cos(\omega_c + \omega_m)t + \cos(\omega_c - \omega_m)t] \end{aligned}$$

En ella, V_c representa el voltaje de pico de la portadora y m , designado como índice de modulación, está dado por $m = \frac{V_c}{V_m}$, donde V_m es el voltaje instantáneo de pico de la señal moduladora. El índice de modulación, m , puede tomar valores entre 0 y 1. El primero corresponde a la ausencia de modulación, en tanto que $m = 1$ corresponde al máximo nivel (100%) permisible de modulación.

En la siguiente figura se muestran conjuntamente la portadora sin modulación, la señal moduladora y la señal modulada al 50%, es decir con un valor de $m = 1$ [27].

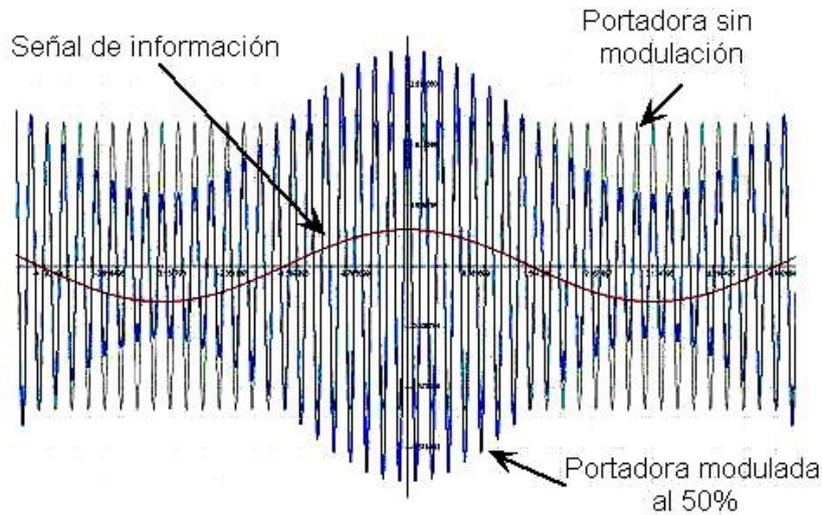


Figura 2.32. Señal modulada en amplitud en que se muestra la señal en banda base, la portadora sin modulación y la portadora modulada al 50% [27].

En la figura 2.34, se aprecian con mejor detalle los parámetros de la señal modulada en amplitud. El voltaje de la portadora sin modulación es V_c y el de la señal en banda base, que constituye la envolvente de la portadora es V_m , cuyo valor instantáneo es $\pm V_c (1 + m \cdot \cos(mt))$.

El voltaje máximo, instantáneo, de la señal modulada es $V_{max} = V_c \cdot (1 + m)$ y el mínimo, $V_{min} = V_c \cdot (1 - m)$. La señal mostrada en la figura 5.2 puede verse fácilmente en un osciloscopio, con lo que los voltajes máximo y mínimo pueden medirse y determinar, así, el índice de modulación como:

$$\frac{V_{max} - V_{min}}{V_{max} + V_{min}}$$

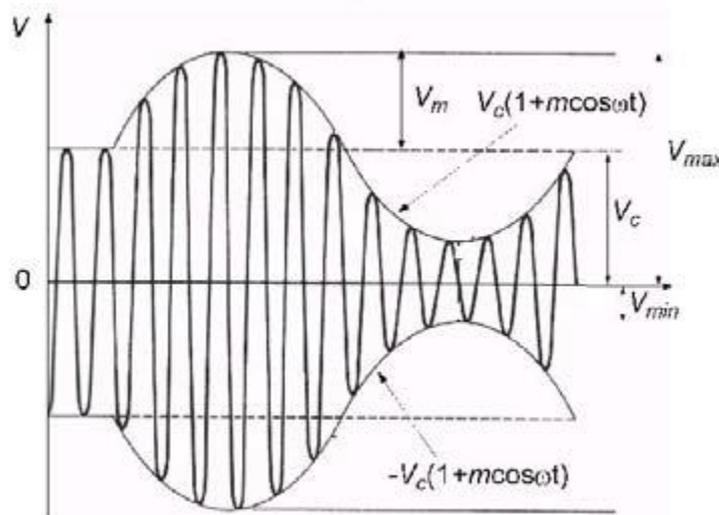


Figura 2.33. Parámetros en la señal modulada [27].



En la expresión de la página anterior se identifican señales de tres frecuencias diferentes, una de amplitud V_c y frecuencia ω_c , que corresponde a la portadora y cuya amplitud y frecuencia no dependen de la señal moduladora. Las otras dos señales tienen frecuencias $(\omega_c + \omega_m)$ y $(\omega_c - \omega_m)$, separadas por debajo y arriba de la portadora por ω_m , cada una de amplitud $m \cdot V_c / 2$. Estas dos señales se designan como bandas laterales y son simétricas respecto a la frecuencia de la portadora.

Cada una de las bandas laterales contiene toda la información necesaria para recuperar la señal, si bien las componentes frecuenciales en la banda inferior, están invertidas respecto a las de la banda superior. Es decir, si por motivos de polarización o de inestabilidad no llegamos a ver las dos bandas laterales, no supondría problema alguno, puesto que la información en su totalidad viaja en cada banda.

La portadora se transmite con su amplitud completa. En realidad, esto no sería necesario ya que la portadora, al ser de una frecuencia fija y conocida, no contiene información y puede reproducirse mediante un oscilador local en el receptor. Por consecuencia, el hecho de transmitir la portadora completa, es también un desperdicio de potencia en el transmisor.

Por lo que para finalizar este tema concluimos que, bastaría transmitir solamente una de las bandas laterales, sin la otra ni la portadora. Sin embargo, la virtud que tiene la AM completa es la sencillez de su demodulación o detección.

En términos de ancho de banda, cada banda lateral tiene un BW de f_{max} Hz, siendo el ancho de banda total de la señal modulada el siguiente:

$$B_{RF} = (f_c + f_{max}) - (f_c - f_{max}) = 2 f_{max}$$

Donde f_{max} es la componente espectral de mayor frecuencia de la señal moduladora. Al igual que en caso de modulación senoidal pura, cada banda lateral contiene totalmente la información de la señal en banda base, por lo que estrictamente, este tipo de modulación consume el doble del espectro requerido para transmitir la información requerida para recuperar totalmente la señal original en el receptor y se pueden conseguir mayores eficiencias transmitiendo sólo una de las bandas laterales.

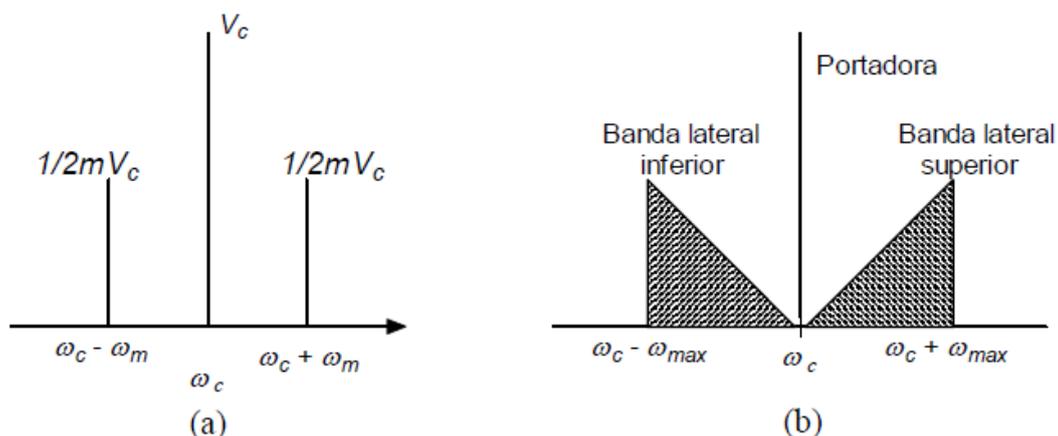


Figura 2.34. Espectro de la señal de AM completa [27].



2.9. POLARIZACIÓN

2.9.1. La polarización de la luz en las comunicaciones por fibra óptica.

Aunque la polarización de la luz fue descubierta en el siglo XVII y sus efectos en las fibras fueron vistos desde los primeros trabajos en 1960, históricamente ha desempeñado un papel menor en el ámbito de las comunicaciones por fibra óptica. La razón principal de ello se encuentra en que los receptores comerciales son sólo sensibles al nivel de potencia óptica incidente y por lo tanto insensibles a la polarización.

En los últimos años la importancia de la polarización en las comunicaciones ópticas ha crecido notablemente como resultado de tres grandes desarrollos:

1. La aparición de la amplificación óptica ha hecho que se produzca un gran incremento en las longitudes de fibra monomodo, así como en el número de dispositivos ópticos que debe atravesar la luz sin regenerarse. Como resultado de ello, pequeños efectos como la diferencia de retardos entre los modos ortogonales o las pequeñas diferencias entre las pérdidas de inserción para esos modos, pueden acumularse debido a la gran distancia a recorrer, por lo que se convierten en un parámetro a considerar en el diseño de los sistemas.
2. La posibilidad de la detección coherente en la cual el receptor es sensible al batido de los dos haces de luz y no sólo a la potencia, ha llevado también a tener que considerar el tratamiento de la polarización como uno de los puntos de investigación importantes.
3. La última razón por la que la polarización se ha convertido en un tema fundamental es el impresionante incremento que se ha dado en las velocidades de transmisión, que de nuevo lleva a que pequeños efectos se vuelvan importantes por el extremadamente pequeño tiempo de bit [10].

Así pues, queda claro que en los sistemas actuales y futuros los problemas relacionados con la polarización son uno de los escollos a salvar. El origen de los efectos de la polarización en las fibras es la no idealidad de las mismas. La estructura no perfectamente cilíndrica de la fibra óptica llevará a las distintas componentes transversales de los campos a ver índices de refracción ligeramente diferentes con lo que se producirá acoplo de energía de un modo al ortogonal y diferencias de retardo entre los modos.

En este proyecto la medida que hemos utilizado para controlar ese problema con la polarización ha sido el incluir controladores de polarización en nuestros sistemas, los cuales han sido explicados anteriormente.

Como ya se ha comentado anteriormente, el principal inconveniente en el funcionamiento de un controlador de polarización es que deberá ser reajustado cada vez que se produzca una variación en las condiciones de la fibra [10].

Cualquier dispositivo cuya birrefringencia sea ajustable podrá ser utilizado como controlador de polarización. Los distintos tipos de controladores que han sido propuestos hasta la fecha son:

- "Electromagnetic fiber squeezers" (fibra presionada): su funcionamiento consiste en inducir birrefringencia en un tramo de fibra según uno de sus ejes propios, y en otro tramo según una dirección a 45° de ese eje propio. Ello se consigue mediante presión mecánica sobre la propia



fibra. Ajustando el retardo inducido en cada dirección se alcanza a la salida el SOP deseado. Como ventajas de este tipo de elementos cabe mencionar su facilidad de construcción y sus bajas pérdidas de inserción. Como inconvenientes, la fatiga mecánica y las altas tensiones que deben aplicarse a los piezoeléctricos que se encargan de presionar la fibra.

- Cristales electroópticos: se trata de materiales (por ejemplo, el cristal líquido) que varían sus índices de refracción cuando se les aplica un campo eléctrico. Combinando varias secciones de este tipo de materiales (con sus ejes propios orientados en distintas direcciones) se consigue realizar un control de la polarización. En este caso la ventaja principal es la ausencia de fatiga mecánica.
- Láminas retardadoras: se intercalan en el camino de la señal a controlar. Son láminas de algún material birrefringente. Basta con un retardador de $1/4$ de onda (QWP) y otro de media onda (HWP), que, al ser rotados, pueden convertir el SOP incidente en cualquiera que se desee. Presentan como principal argumento a su favor poder ser montadas sobre dispositivos que permitan rotación ilimitada en un mismo sentido. Como inconveniente el que normalmente están contruidos con cristales distintos a la fibra óptica, lo que implicará pérdidas considerables, respuesta lenta puesto que deben ser físicamente rotados y fatiga mecánica.
- Bucles rotables de fibra: el principio de funcionamiento es idéntico al caso anterior. Aprovechando que al curvar una fibra se induce en ella birrefringencia, se crean elementos que, al ser rotados, se comportan como láminas retardadoras. Su principal ventaja son sus bajas pérdidas de inserción por tratarse de trozos de fibra óptica estándar. Debe ser ajustado mecánicamente, ya sea de modo manual o mediante motores, lo cual implicará lentitud, además de fatiga mecánica.
- Rotadores de Faraday: aplicando un campo magnético en la dirección paralela a la fibra se obtiene birrefringencia circular. De esta forma, aplicando las corrientes adecuadas a dos rotadores de Faraday, entre los que se intercala un QWP, colocados en cascada, se consigue controlar la polarización.
- Óptica integrada: dispositivo construido sobre un substrato de LiNbO₃, consiste en diversos elementos cada uno de los cuales puede variar, en función de las tensiones que se le aplican, tanto el módulo de su retardo como la dirección de sus ejes propios. Reúne por tanto las características de los demás siendo su principal inconveniente las altas pérdidas de inserción que presenta.

Para la realización de este proyecto nos hemos decantado por los bucles rotables de fibra debido a su fácil manejo mecánico y sus bajas pérdidas de inserción.



3. PROCESO EXPERIMENTAL

En este apartado se presentan tanto el proceso experimental como los resultados obtenidos en la realización de este trabajo fin de grado. Se ha dividido en 4 bloques en los que se analizarán los diferentes estudios llevados a cabo.

En primer lugar, se presentará un estudio práctico del comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra óptica. En el segundo estudio se ha llevado a cabo la demostración experimental de un conversor en longitud de onda para modulaciones de hasta varios GHz dentro de un láser de fibra óptica mediante el uso de redes de difracción de Bragg. Este montaje experimental ha servido además para la realización de medidas de temperatura con una mayor resolución, haciendo uso de nuevo de los FBG.

3.1. Estudio experimental del comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra

En este primer apartado se estudian tres tipos diferentes de fibras dopadas con erbio (EDF) comerciales. La finalidad de este estudio es analizar el número de modos generados dentro de un láser de fibra óptica en anillo para cada tipo de fibra diferente.

Este láser en anillo multilínea está compuesto por un controlador de intensidad y temperatura (500 mA y 25°C) junto con un bombeo óptico a 980 nm, seguido de un multiplexor en longitud de onda (WDM) comercial, el cual separa o junta señales en dos longitudes de onda diferentes (980nm y 1550nm). A continuación, colocamos un tramo de EDF consiguiendo a su salida una amplificación óptica. El propósito del aislador óptico es evitar que la señal circule en ambos sentidos dentro de la cavidad en anillo, evitando así el efecto de *hole burning*. Mediante un acoplador 50:50 dividimos la señal en dos ramas cada una con un FBG diferente.

Es preciso utilizar al menos un atenuador óptico variable (VOA) para poder conseguir equalizar los dos láseres debido a la competición de ganancia entre dichos láseres. La longitud de onda central de los láseres generados vendrá dada por la longitud de onda de las redes de difracción de Bragg que utilizemos (en nuestro caso fueron de 1552.2nm y de 1555.2nm), por lo tanto, el estudio se centrará en la evaluación del número de modos longitudinales obtenidos en torno a dichas longitudes de onda.

Este es un factor importante en el diseño de láseres de fibra, ya que la presencia de demasiados modos puede provocar inestabilidades tanto en los niveles de potencia óptica de salida como en la longitud de onda de emisión del láser debido a la existencia competición entre ellos. La competición entre modos también conocida como competición de ganancia será un factor muy importante y a tener en cuenta en todo el proyecto, debido a que en los láseres multilínea de fibra óptica para varias longitudes de onda, la alteración de la amplitud en una de ellas provocará que el resto de longitudes de onda experimenten variaciones, generándose problemas con la estabilidad del sistema.

Para la mayoría de las aplicaciones, el objetivo es conseguir diseñar láseres muy estrechos o, a ser posible, monomodo. En ese caso, el número de láseres o sensores ópticos que se podrán multiplexar aumenta, optimizando además las prestaciones de dichos láseres.

Por último, utilizaremos otro acoplador, en este caso 90:10, con el que sacaremos un 10% de la señal para medirla con el BOSA o el OSA y el resto (90%) seguirá recirculando por el anillo.

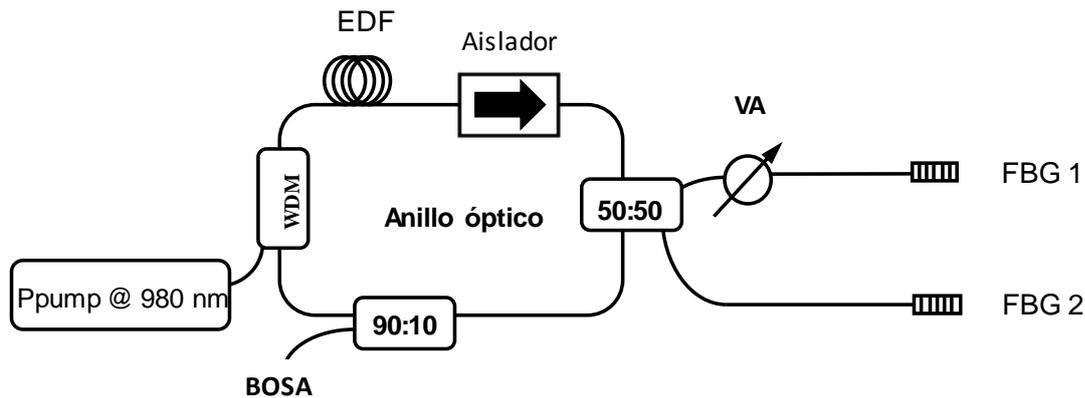


Figura 3.1. Estructura en anillo de fibra en combinación de dos FBGs, centrados en 1552.2 nm y 1555.2 nm

En la anterior figura se muestra el montaje utilizado en nuestro primer estudio experimental. Dicho montaje utiliza 3 tipos de EDF comerciales diferentes. Como presentaremos a continuación, la fibra M-12 presenta unas ventajas importantes si la comparamos con el resto de EDFs que someteremos a estudio. Por poner algún ejemplo, gracias al uso de esta fibra, la equalización de los dos láseres generados será mucho más sencilla (haciendo necesario un único atenuador óptico variable) y obteniendo también el menor número de modos para los láseres estudiados.

Se analizarán experimentalmente 3 fibras ópticas diferentes: M-12, I-25 y Er-30, cuyas especificaciones técnicas vienen detalladas en el Anexo A.

Una vez observados los resultados experimentales junto con las características técnicas de cada fibra, se puede asegurar que de entre las tres fibras la que hace que la respuesta del láser tenga un menor número de modos es la M-12, seguida de la I-25 y en tercer lugar la Er-30.

Atendiendo a la posición relativa del núcleo con respecto al revestimiento de la fibra óptica, podemos obtener una clara información de cómo de concéntrico es el núcleo respecto a la cubierta de dicha fibra. Este es un aspecto importante en cuanto a pérdidas por conexión y por fusión se refiere. Además, como el modo fundamental tiene que ser transmitido por el núcleo, al estar menos centrado dificulta la obtención de un láser más estrecho, es decir, con un menor número de modos.



Figura 3.2. Representación de cómo de concéntrico es el núcleo de la fibra [7]

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas para cada fibra óptica estudiada. En dichas gráficas se pueden observar las diferencias de la respuesta del EDFL (láser de fibra óptica dopada con erbio) en cuanto al número de modos dentro de la cavidad para uno u otro tipo de EDF.

En todos estos estudios, la única modificación que se ha hecho en el montaje ha sido el tipo y la longitud de fibra dopada utilizada por lo que el estudio se centrará siempre en torno a las mismas



longitudes de onda, esto es, las longitudes de onda de emisión de los FBGs utilizados que fueron de 1552.2nm y 1555.2 nm, como se muestra en la figura 3.1.

Para realizar las medidas se han utilizado dos tipos de analizadores de espectros ópticos: un OSA (Optical Spectrum Analyzer) y un BOSA o analizador de espectros ópticos de alta resolución basado en el efecto Brillouin (High Resolution Optical Spectrum Analyzer). Ambos analizadores se utilizan para medir y visualizar a la salida del láser el espectro de la señal que circula por el anillo de fibra óptica. El BOSA opera con una resolución de 0.08 pm mientras que el OSA lo hace con una de 0.01 nm. Para saber si el analizador utilizado muestra correctamente los modos del láser tenemos que comprobar que su resolución es inferior que la distancia que hay entre modos.

Para ello se utiliza la siguiente fórmula:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n * L}$$

Comprobamos por ejemplo que, para el láser centrado en 1552.2 nm que la resolución del BOSA es menor que la separación entre modos y por tanto óptima:

$$0.08 \text{ pm} < 0.16 \text{ pm}$$

Siendo $\Delta\lambda$ la distancia entre dos modos consecutivos, λ la longitud de onda del FBG con el que de operación, n el índice de refracción de la fibra y L la longitud de la cavidad del anillo.

Se toman los siguientes valores para dichas variables: $n=1.5$, $L=10$ metros (longitud de la cavidad) y λ dependerá de la longitud de onda a la que estemos operando.

Teniendo en cuenta todo lo anteriormente citado, utilizando el BOSA obtendremos resultados con una mejor resolución que con el OSA, siendo capaces así de medir más cantidad de modos en el mismo span.

A continuación, se presentan, para los tres tipos de fibra utilizados en este primer montaje, diferentes gráficas en las que podemos observar los dos láseres ecualizados (centrados en 1552.2 nm y 1555.2 nm) así como cada uno de ellos por separado.



Er-30

Para este tipo de fibra dopada con erbio analizaremos los dos láseres en conjunto utilizando como analizador el BOSA, en las longitudes de onda 1552.2 y 1555.2. La fibra Er-30 utilizada tiene una longitud aproximada de 7 metros.

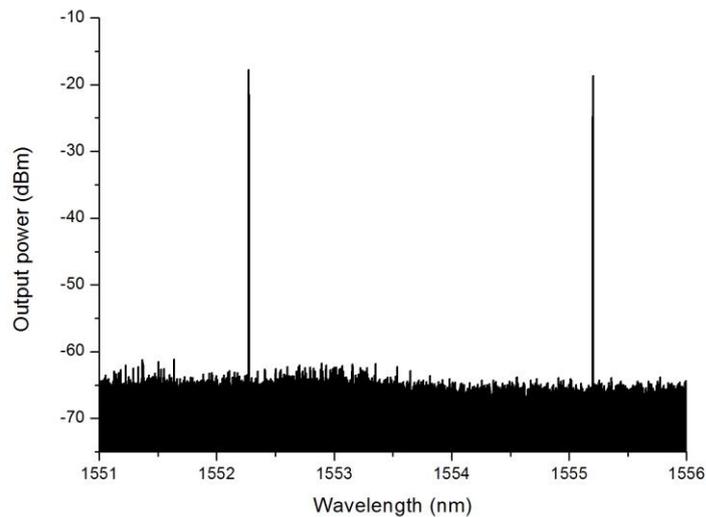


Figura 3.3. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica utilizando 7m de EDF del tipo Er-30

En esta figura se aprecian los dos láseres centrados en 1552.2 nm y en 1555.2 nm respectivamente, se observa además que la amplitud de la potencia óptica de salida se encuentra alrededor de los -18dBm y que tienen una OSNR de unos 50dBm.

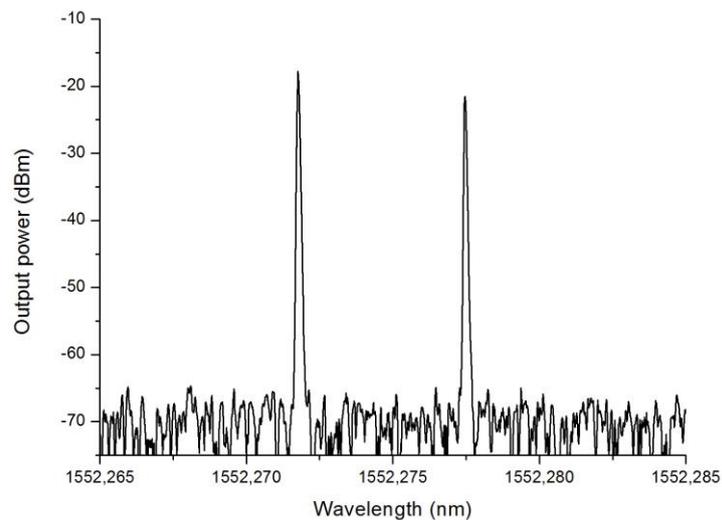


Figura 3.4. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1552.2nm utilizando 7m de EDF del tipo Er-30



En esta figura se pueden ver, para el láser centrado a 1552.2 nm, dos modos longitudinales resultado de ampliar la figura 3.3. Cabe destacar que utilizando este tipo de fibra no se ha logrado una respuesta del láser completamente monomodo dentro de la cavidad del anillo, pero si se ha reducido considerablemente el número de modos respecto al uso de otras EDFs menos dopadas.

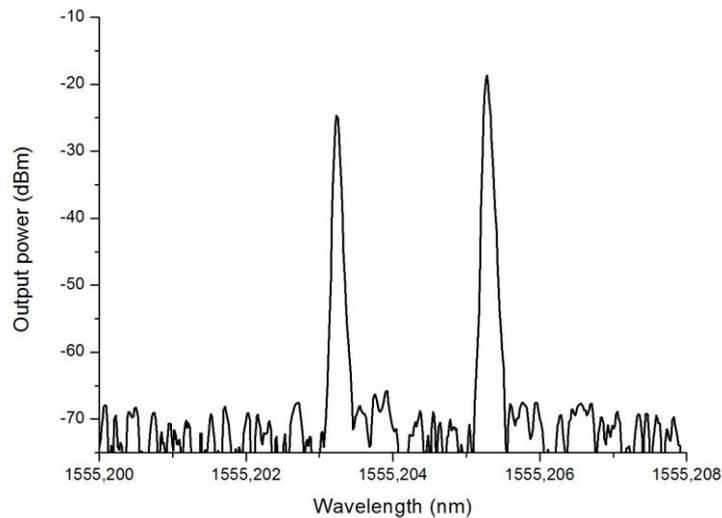


Figura 3.5. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1555.2nm utilizando 7m de EDF del tipo Er-30

Al igual que en la figura 3.4 en esta se muestra los modos longitudinales del láser centrado a 1555.2 nm, observándose que para este láser tampoco se ha conseguido visualizar un único modo longitudinal, sino dos modos simultáneamente.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores para cada láser se obtienen dos modos longitudinales, cuya obtención ha sido laboriosa (la figura mostrado se corresponde a la mejor traza obtenida). Cabe destacar que, durante un tiempo aproximado de tres horas de medición, no se consiguió en ningún instante que apareciera un único modo por longitud de onda. Para conseguir visualizar estos modos se ha utilizado el atenuador óptico variable para equalizar los dos láseres y, como ya se ha citado antes, esas variaciones de potencia de salida producen una considerable inestabilidad en el sistema.



I-25

Para este tipo de fibra analizaremos los dos láseres en conjunto utilizando como analizador el BOSA, en las longitudes de onda 1552.2 y 1555.2. En este caso la longitud de la fibra óptica I-25 fue de unos 5 metros aproximadamente.

Para las longitudes de onda 1552.2 y 1555.2 se muestran las figuras de la respuesta que tiene el EDFL con dicha fibra una vez que se ha ecualizado, observando la respuesta con menos modos longitudinales posible.

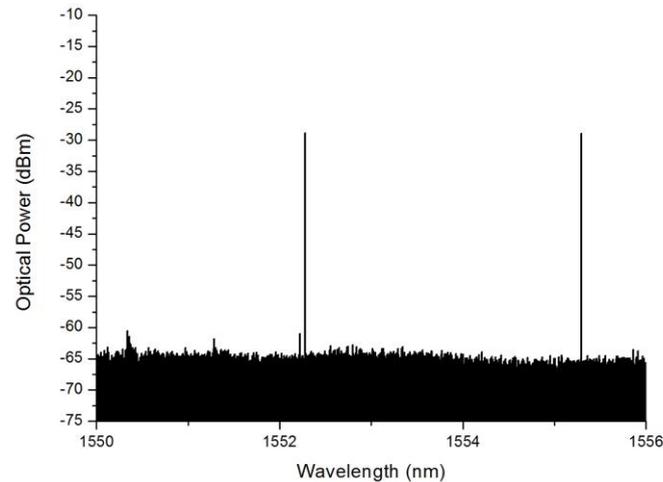


Figura 3.6. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica utilizando 5m de EDF del tipo I-25

En esta figura se aprecian los dos láseres situados en 1552.2 nm y en 1555.2 nm respectivamente, se observa además que la amplitud de la potencia óptica de salida se encuentra alrededor de los -30dBm y que tienen una OSNR de unos 35dBm.

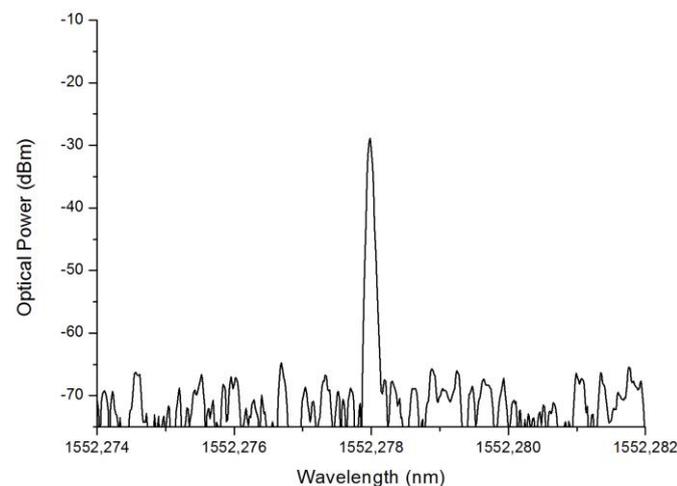


Figura 3.7. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1552.2nm utilizando 5m de EDF del tipo I-25



Ampliando la gráfica 3.6 en la que se muestran los dos láseres observamos que en el láser centrado a 1552.2 nm aparece solo un modo longitudinal por lo que podemos afirmar que con la fibra I-25 hemos conseguido una respuesta de nuestro láser monomodo.

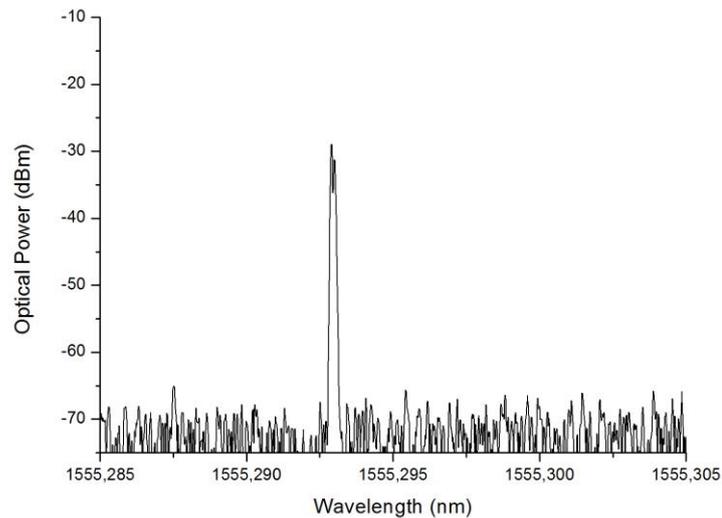


Figura 3.8. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1555.2nm utilizando 5m de EDF del tipo I-25

Como se puede apreciar, con este tipo de fibra los láseres obtenidos poseen un modo longitudinal cada uno, reduciéndose el número de modos con respecto al caso anterior (fibra Er-30). Esto es debido a que la fibra tiene características que hacen que el comportamiento del láser sea más monomodo.



M-12

Por último, se exponen los resultados obtenidos utilizando el tipo de fibra dopada con erbio M-12, cuya longitud es de aproximadamente 4 metros.

Para las longitudes de onda 1552.2 y 1555.2 se muestran las figuras de la respuesta que tiene el EDFL con dicha fibra una vez que se ha ecualizado, observando la respuesta con menor número de modos longitudinales obtenida.

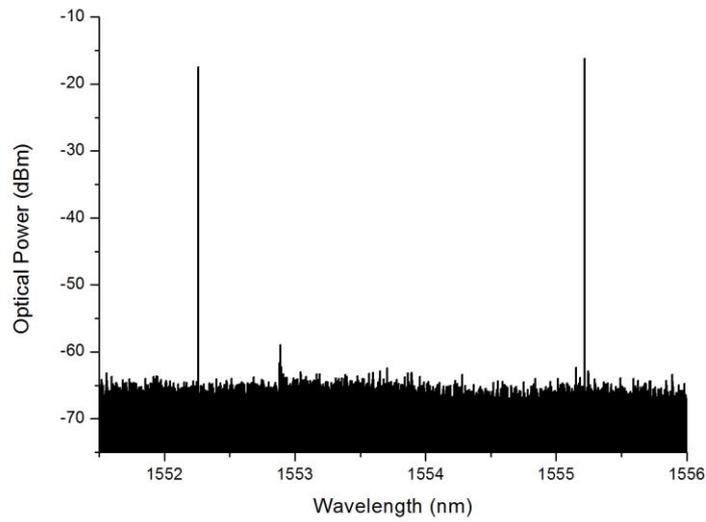


Figura 3.9. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica utilizando 4m de EDF del tipo M-12

En esta figura se aprecian los dos láseres situados en 1552.2 nm y en 1555.2 nm respectivamente, se observa además que la amplitud de la potencia óptica de salida se encuentra alrededor de los -17dBm y que tienen una OSNR de unos 48dBm.

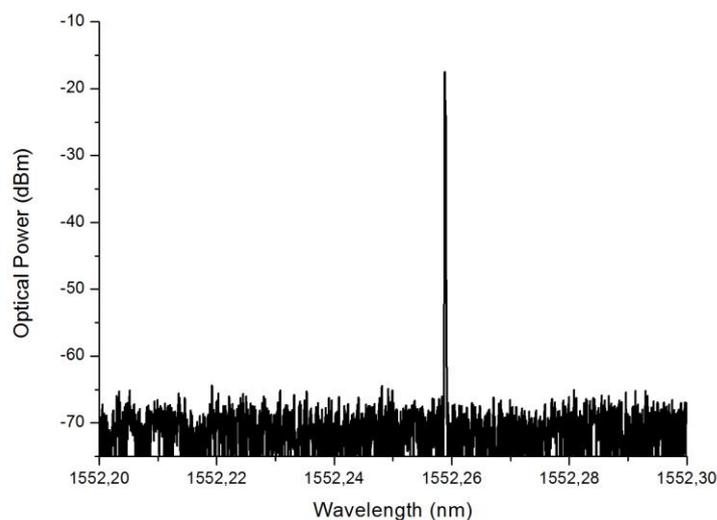


Figura 3.10. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1552.2nm utilizando 4m de EDF del tipo M-12



Una vez más queremos comprobar si para cada láser de fibra aparece representado un único modo de su cavidad. En 1552.2nm observamos que efectivamente la respuesta de nuestro láser es monomodo.

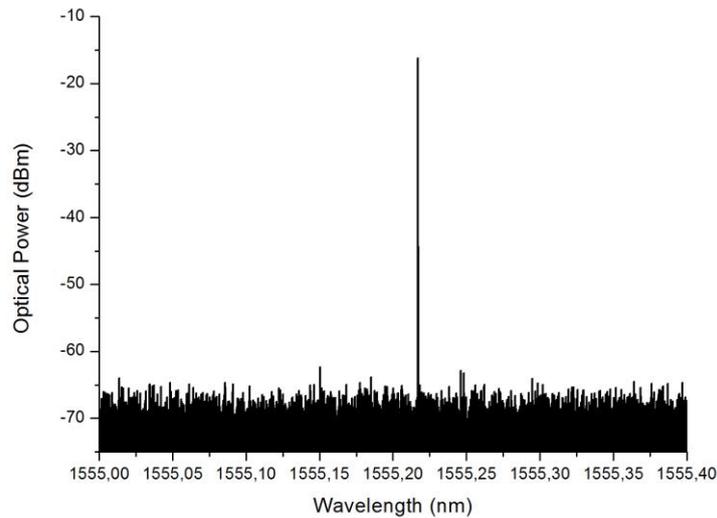


Figura 3.11. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica centrado en 1555.2nm utilizando 4m de EDF del tipo M-12

Para el láser centrado en 1555.2 nm, al igual que en el de 1552.2nm, vemos que aparece un solo modo longitudinal, siendo una respuesta óptima para nuestro diseño.

Como se puede observar en las figuras sobre la fibra M-12, cada láser sigue teniendo un modo longitudinal, pero observamos que presentan más potencia óptica de salida que en el caso de la fibra I-25, por lo que elegiremos este tipo de fibra para desarrollar el resto de montajes del proyecto. Para finalizar este apartado mostraremos una última figura en la que encontramos las dos longitudes de onda sin ecualizar y vemos la importancia de los atenuadores para conseguir una respuesta con el menor número de modos posible. Se ha demostrado experimentalmente que, si dos láseres tienen aproximadamente la misma potencia de salida, el número de modos se reduce, y se observa que el uso de atenuadores para lograrlo es de suma importancia [28].

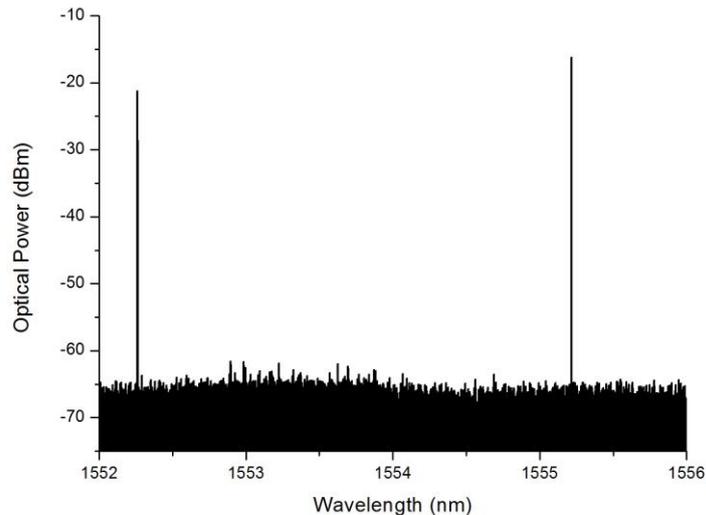


Figura 3.12. Espectro óptico de la salida del láser de fibra óptica no ecualizado, utilizando 4m de EDF del tipo M-12

Uno de los mayores problemas en los anillos de fibra en láseres multilínea es la oscilación del umbral de la potencia óptica para cada longitud de onda, siendo ésta diferente. Esto es debido al perfil de ganancia no uniforme de la fibra dopada con erbio. Consecuentemente se utilizan los atenuadores ópticos variables, conectados delante de cada FBG (siempre que sea necesario) para ajustar las pérdidas de dentro de la cavidad del anillo para cada longitud de onda y lograr la oscilación deseada.

Como conclusión a este apartado tenemos que destacar la importancia que tiene la competición de ganancia en los sistemas de láseres multilínea ya que esas variaciones en amplitud provocan inestabilidad en el sistema, lo que se trata de un problema a la hora de diseñar un láser de fibra óptica.

Además, nos interesa que nuestros dos láseres estén ecualizados para presentar una potencia óptica de salida similar y será mediante los atenuadores ópticos variables como se consigue.

Se utilizará la fibra óptica M-12 en el resto del proyecto debido a que se ha demostrado que con ella el comportamiento de los dos láseres es monomodo y que la potencia óptica de salida alcanza los mejores niveles.

Estas gráficas han sido elaboradas con el software Origin y se ha utilizado para cada fibra un span diferente ya que los modos de los láseres no aparecen siempre a las mismas longitudes de onda, produciéndose pequeñas variaciones del orden de 0.01nm.

En definitiva, lo que buscamos es un láser de fibra óptica con varias longitudes de onda generadas mediante FBGs, con un único modo longitudinal para cada longitud de onda. Este efecto se puede conseguir mediante la ecualización del sistema a través de los atenuadores ópticos variables de cada rama de manera que ambas longitudes de onda tengan el mismo nivel de potencia.

3.2. Estudio experimental de un conversor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.

Para la realización de éste estudio experimental se ha utilizado un láser de fibra con cavidad en anillo en el que como medio activo se han empleado 4m de EDF. A la vista de los resultados mostrados en el apartado anterior, el tipo de EDF utilizado fue la M-12, cuyos resultados fueron los más apropiados para nuestro propósito.

Nuestro objetivo es poder conseguir que, modulando un láser a una determinada longitud de onda y debido al efecto de competición de modos, se origine modulación en amplitud en otro láser el cual no ha sido modulado.

La figura 3.13 muestra la configuración de la estructura utilizada en este estudio experimental.

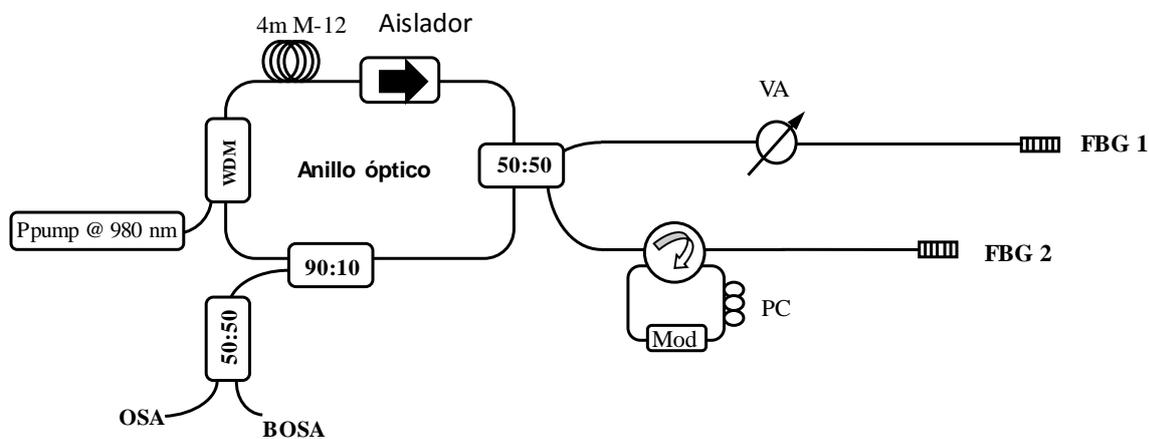


Figura 3.13. Estructura en anillo SMF, utilizando 4m de EDF del tipo M-12, un modulador y 2FBGs

Para este segundo montaje se vuelve a utilizar una cavidad en anillo de fibra óptica en combinación con las redes de difracción de Bragg. Este láser está compuesto por un controlador de intensidad y temperatura, emitiendo con una intensidad de 500 mA y manteniéndose estable en 25°C junto con un láser de bombeo a 980 nm, seguido de un WDM comercial, el cual separa o junta las señales en dos longitudes de onda diferentes (980nm y 1550nm en nuestro caso).

A continuación, colocamos nuestra fibra dopada con Erblio de tipo M-12 consiguiendo a su salida una amplificación óptica. De nuevo se ha utilizado un aislador óptico para evitar el efecto de *hole-burning*. Mediante un acoplador 50:50 dividimos la señal en dos ramas y situamos un FBG en cada una de ellas. Uno de estos FBGs irá conectado directamente al acoplador. En la otra rama incluiremos un circulador de 4 puertos con el que modularemos la respuesta obtenida por el FBG conectado a continuación. La inclusión del circulador en el montaje se debe a que el modulador no es bidireccional, es decir, funciona en un único sentido por lo que, para modular el láser centrado en la longitud de onda del FBG de esa rama, tiene que pasar por la entrada del modulador cuando ésta vuelve hacia el anillo.

Como se ha explicado en el apartado teórico del proyecto uno de los factores más relevante a la hora de trabajar con modulaciones es la aparición de un fenómeno llamado polarización. El origen de los efectos de la polarización en las fibras es la no idealidad de las mismas. La estructura no perfectamente cilíndrica de la fibra óptica llevará a las distintas componentes transversales de los campos a ver índices de refracción ligeramente diferentes con lo que se producirá acoplo de energía



de un modo al ortogonal y diferencias de retardo entre los modos. Para evitar este efecto se coloca justo a la entrada del modulador un controlador de polarización (CP) manual. Aprovechando que al curvar una fibra se induce en ella birrefringencia, se crean elementos que, al ser rotados, se comportan como láminas retardadoras. Su principal ventaja son sus bajas pérdidas de inserción por tratarse de trozos de fibra óptica estándar. Se ajusta manualmente, lo que implica lentitud a la hora de tomar medidas, es decir, para cada medida tomada, se ha tenido que ajustar la polarización con anterioridad, ya que no es una propiedad que se mantenga constante.

Finalmente añadimos un acoplador 90:10 en la cavidad del anillo, seguido de otro acoplador con el que dividimos ese 10% de la señal en dos partes iguales para poder hacer una medida simultánea tanto con el OSA como con el BOSA.

Otro de los objetivos importantes de conseguir modular un láser que no está conectado a un modulador es precisamente ahorrarnos el uso de otro modulador. El alto precio de estos aparatos hace que el coste de una estructura con varios moduladores sea muy elevado.

Recordando lo redactado en el apartado teórico de esta memoria sabemos que la presencia de numerosos modos longitudinales provoca inestabilidades en el sistema debido a la competencia entre ellos. Lo ideal es conseguir que el sistema sea monomodo, consiguiendo así las mejores condiciones de estabilidad.

Esas longitudes de onda (que actuarán como portadoras) aparecen con una o dos bandas laterales generadas a consecuencia del efecto del modulador en ellas. Recordamos que se ha utilizado en todo este TFG una modulación AM completa (explicada en el apartado teórico).

Es importante añadir lo valiosa que es la información modulada en el campo de las comunicaciones ópticas, siendo este otro de los motivos por los cuales se realiza este estudio.

El controlador de polarización (PC) que aparece justo antes del modulador es uno de los elementos con más importancia dentro del montaje debido a que la polarización es uno de los factores limitantes a la hora de modular un láser.

Para la obtención de los resultados experimentales se han utilizado dos analizadores de espectro ópticos diferentes: un OSA (Optical Spectrum Analyzer) con una resolución de 0.01 nm y un BOSA (High Resolution Optical Spectrum Analyzer), o analizado de espectros ópticos de alta resolución, cuya resolución es de 0.08 pm.

Estudios anteriores, y que se encuentran en proceso de revisión para su publicación en una revista de alto factor de impacto, demostraban la viabilidad de esta técnica para frecuencias que iban desde los pocos kilohercios hasta varios megahercios. En los siguientes apartados se explica paso a paso cómo la demostración de dicho fenómeno para un rango de frecuencias que va desde los 4 a los 20 gigahercios.

3.2.1. Modulación entre 16 GHz y 20 GHz

En esta primera fase se ha utilizado un modulador PowerLog™ AM-20; AM-40, con el que se ha realizado un barrido frecuencial que va de los 16 GHz hasta los 20 GHz. El rango de frecuencias está limitado debido a las características técnicas del aparato restringiendo el rango de operación (Anexo B).

Como se ha comentado con anterioridad en este TFG, el uso de la competición de modos es un efecto indeseado para la fibra, pero hacemos uso de él para conseguir nuestro objetivo. Dado que utilizamos las propiedades de la competición entre modos, en nuestro caso no será tan importante que los láseres estén sin equalizar (en algunas gráficas no aparecen totalmente equalizados).



Como aparatos de medición para este apartado se han utilizado el OSA y el BOSA con resoluciones de 0.01 nm y 0.08 pm respectivamente. La dinámica de trabajo ha sido la recopilación de datos de las medidas para su posterior tratamiento y análisis.

Los láseres para este caso se encuentran centrados en 1552.1 nm y en 1553.5 nm.

En la siguiente figura el láser modulado a una frecuencia de 19.7 GHz aparece junto con el láser no modulado, en el que mediante la competición de ganancia se obtiene una modulación AM.

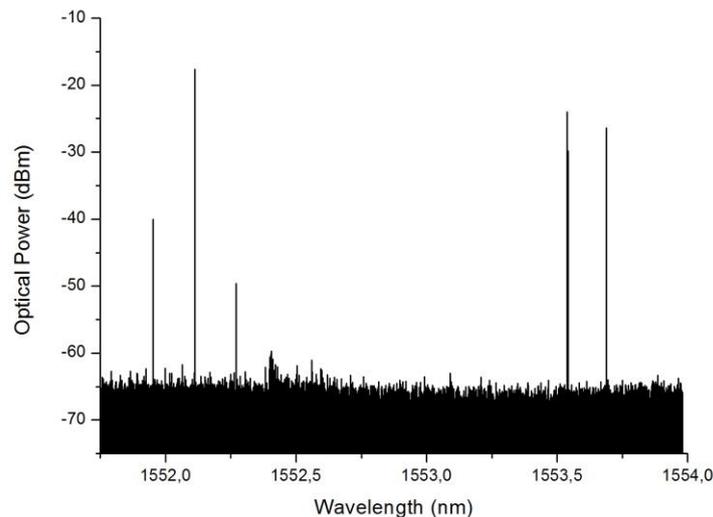


Figura 3.14. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 19.7 GHz centrados en 1552.1 nm y en 1553.5 nm usando EDF del tipo M-12

En la figura se aprecia un láser modulado a 19.7 GHz centrado en 1552.1 nm (longitud de onda que actúa como portadora) junto con las bandas laterales situadas a una determinada distancia. Además, aparece un láser que no ha sido modulado directamente, sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos. Como se ha explicado antes, los láseres no tienen la misma potencia óptica de salida ya que esto potenciará el efecto de la competición de modos.

Como se aprecia en la figura solo aparece una banda lateral y esto es debido a la alta influencia que tiene la polarización en el sistema y a lo complicado que es obtener el punto de polarización óptimo. Como controlador de polarización se usa unos bucles rotables de fibra, o PC manual, los cuales se van rotando manualmente hasta conseguir el resultado deseado.

Como la información de la frecuencia moduladora se encuentra en la separación entre la portadora y la banda lateral, con que aparezca una de las bandas junto con la portadora serviría para comprobar que efectivamente la frecuencia que modula el láser situado en 1553.5 nm es la misma que la que modula el láser centrado en 1552.1 nm. Es más, si solo apareciese una de las bandas laterales y por inestabilidades del montaje no apareciera ni tan siquiera la portadora, no importaría puesto que sabemos dónde está centrada y por consiguiente sabemos la distancia que la separa de la banda lateral.

Matemáticamente se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta f = \frac{\Delta \lambda * c}{\lambda^2}$$



Donde $\Delta\lambda$ (nm) es la distancia entre la portadora y la banda lateral, c (m/s) es la velocidad de la luz en el vacío, λ^2 (nm²) es la longitud de onda donde está centrado el láser (portadora) y Δf (GHz) es la frecuencia moduladora, la cual tiene que coincidir con la frecuencia medida en el láser no modulado.

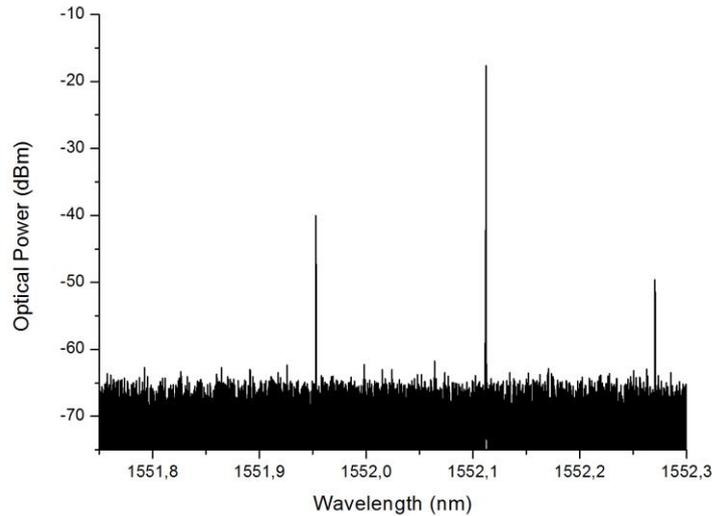


Figura 3.15. Espectro de un láser de fibra centrado en 1552.1 nm y modulado a 19.7 GHz

En esta figura se ha ampliado la zona del láser modulado a 1552.1 nm. Se aprecia claramente que la potencia óptica de salida es de -20 dBm y que la OSNR es de 45 dBm. La medida ha sido realizada con el BOSA.

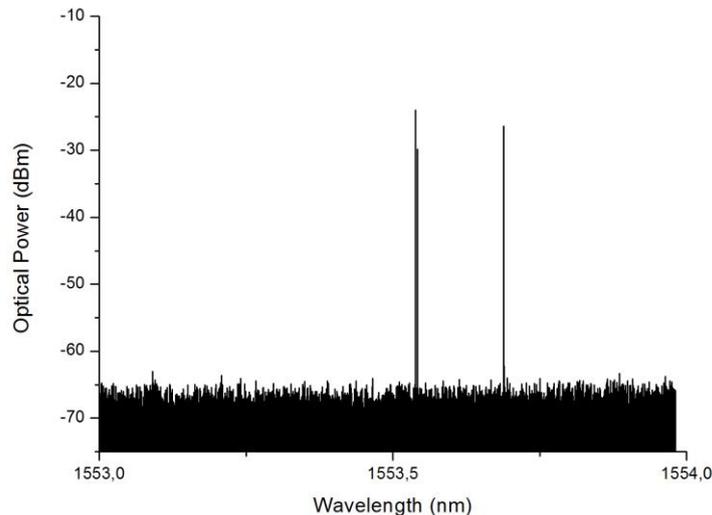


Figura 3.16. Espectro de un láser de fibra modulado a 19.7 GHz con portadora en 1553.5 nm

En esta figura aparece el láser centrado en 1553.5 nm junto con una banda lateral fruto de la modulación originada mediante la competición de modos que existe en el sistema. Al igual que en la anterior figura, la medida ha sido tomada con el BOSA. Aparece con una sola banda lateral y es debido a la fuerte dependencia del sistema con la polarización.



A continuación, se muestran algunas figuras relativas a diferentes frecuencias tomadas con ambos analizadores (OSA y BOSA) en los que se produce el mismo fenómeno citado en este apartado.

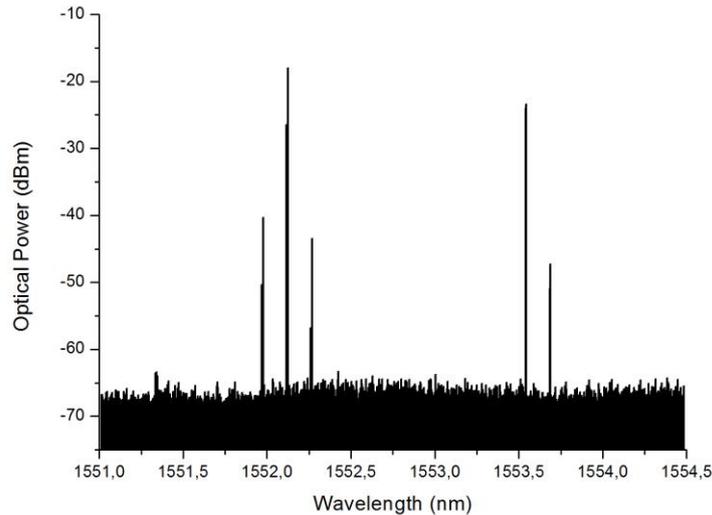


Figura 3.17. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 18 GHz con portadoras en 1552.1 nm y en 1553.5 nm

En la figura se aprecia un láser modulado a 18 GHz centrado en 1552.1 nm (portadora) junto con las bandas laterales situadas a una determinada distancia. Además, aparece un láser que no ha sido modulado inicialmente (centrado en 1553.5 nm). De nuevo el láser centrado en 1553.5 nm aparece con una sola banda lateral, debido a la fuerte dependencia del sistema con la polarización. Aunque aparezcan dos bandas laterales, una de ellas no coincide con la frecuencia de modulación. Durante la toma de medidas

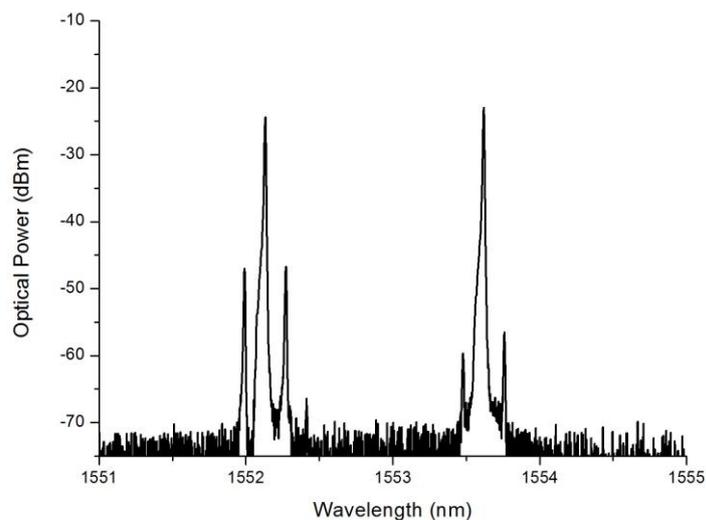
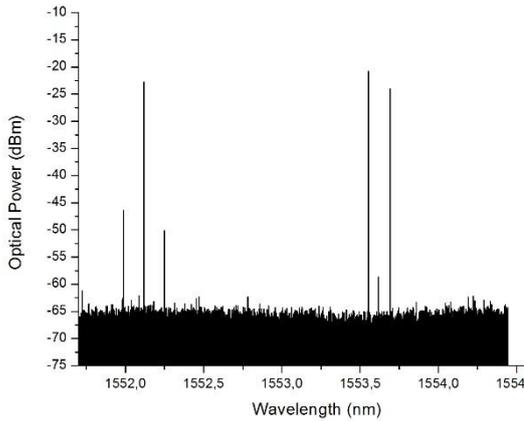


Figura 3.18. Espectro de dos láseres modulados a 17.5 GHz con portadoras en 1552.1 nm y en 1553.5 nm

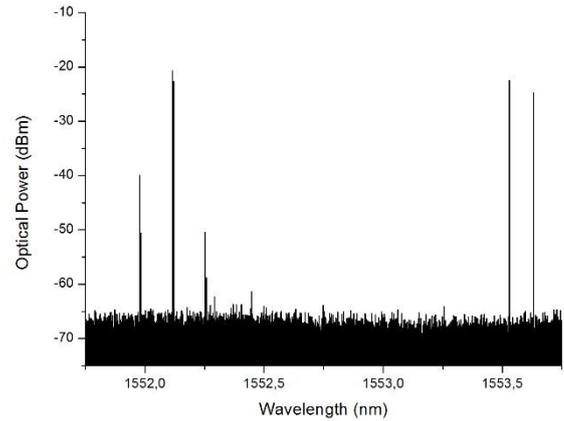


En la figura 3.18 se puede ver el espectro obtenido mediante el OSA, cuya resolución es inferior a la del BOSA. En ella se observan 2 láseres modulados a 17.5 GHz, quedando claro que se produce conversión en longitud de onda para esta frecuencia.

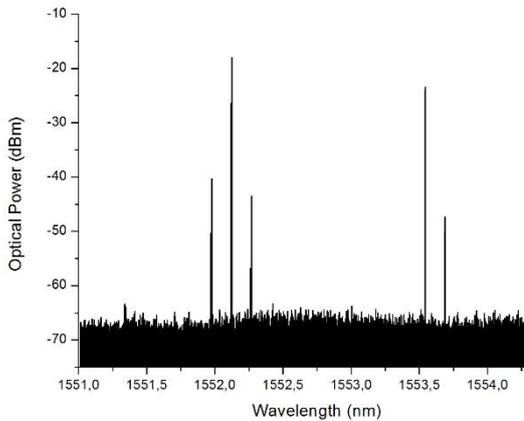
En las siguientes figuras se recogen, para 4 frecuencias diferentes: 16 GHz, 17 GHz, 18 GHz y 19.7GHz, los resultados representados con el BOSA a la salida de mi sistema.



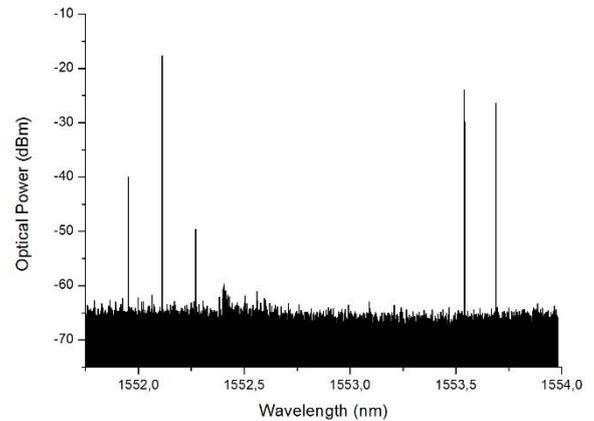
16 GHz



17 GHz



18 GHz



19 GHz

Evidentemente se produce la conversión en longitud de onda y el fenómeno de la modulación se genera en ambas longitudes de onda, reflejando que nuestros resultados experimentales se extienden en un rango más amplio de frecuencias.

Con los datos de las medidas tomadas se procede a realizar una gráfica en la que se muestra si verdaderamente la frecuencia con la que se modula coincide con la separación entre la banda lateral y la portadora del láser centrado en 1553.5 nm.

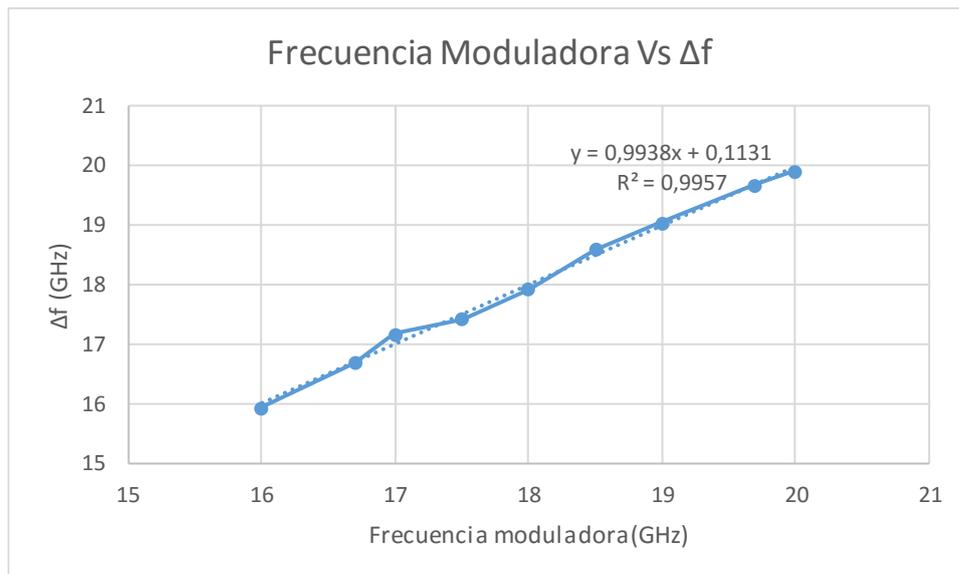


Figura 3.19. Representación gráfica de la frecuencia moduladora teórica vs practica para el láser centrado en 1552.1 nm

En esta gráfica se representa la frecuencia con la que se modula el láser de 1552.1 nm y frente a la frecuencia medida en el láser que sin modular (1553.5 nm). Como se puede apreciar el comportamiento es prácticamente lineal. El ajuste lineal realizado nos muestra un valor de R^2 de 0.9957 (valor que nos indica cómo buena es la aproximación lineal y cuyo rango va de 0 a 1, siendo 1 el nivel que más se aproxima a la ecuación de la recta).

Aunque lo ideal hubiese sido obtener una línea recta, el valor de R^2 obtenido, tan próximo a 1, nos indica que el comportamiento de nuestro sistema es prácticamente lineal, la precisión para este caso es muy elevada.

Podemos concluir que se está produciendo modulación en ambos láseres, confirmando que con un solo modulador y mediante el fenómeno de la competición de modos se puede modular al menos 2 láseres simultáneamente.

Dentro de este apartado también se comprobó que cuando el modulador no está operativo, los láseres correspondientes a las dos longitudes de onda carecen de dichas bandas laterales.

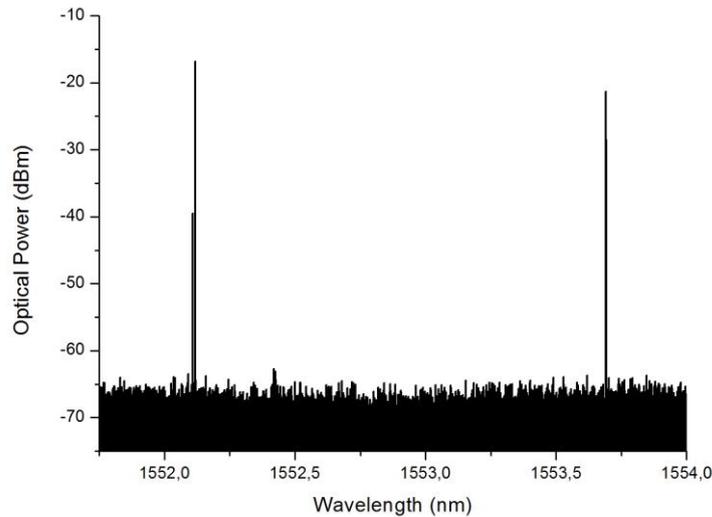


Figura 3.20. Espectro de dos láseres de fibra sin modular centrados en 1552.1 nm y en 1553.65 nm

Durante la realización de las medidas de este apartado, surgió la idea de que la posición del controlador de polarización, situado dentro del circulador a la entrada del modulador, podía estar influyendo en la no visualización de la segunda banda lateral en el FBG no modulado.

Se procedió a colocarlo antes del circulador, siendo nuestro nuevo montaje como muestra la figura 3.21:

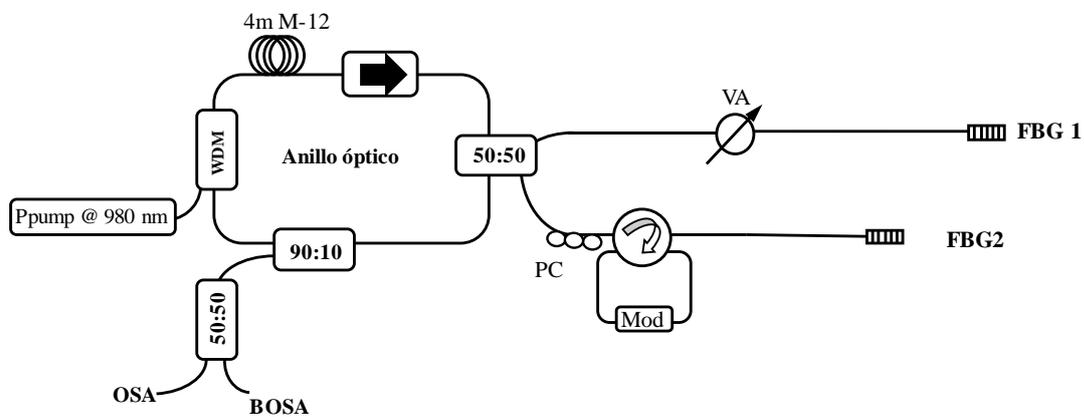


Figura 3.21. Estructura en anillo SMF, utilizando 4m de EDF del tipo M-12, un modulador y 2FBGs

El único cambio con respecto al montaje utilizado a lo largo de todo este apartado es la colocación del controlador de polarización. Antes se encontraba a la entrada del modulador y ahora se coloca a la entrada del circulador.

Tras este cambio de posición del PC no se observaron mejoras en los resultados obtenidos, puesto que se siguió visualizando solamente una de las bandas laterales en el láser no modulado.

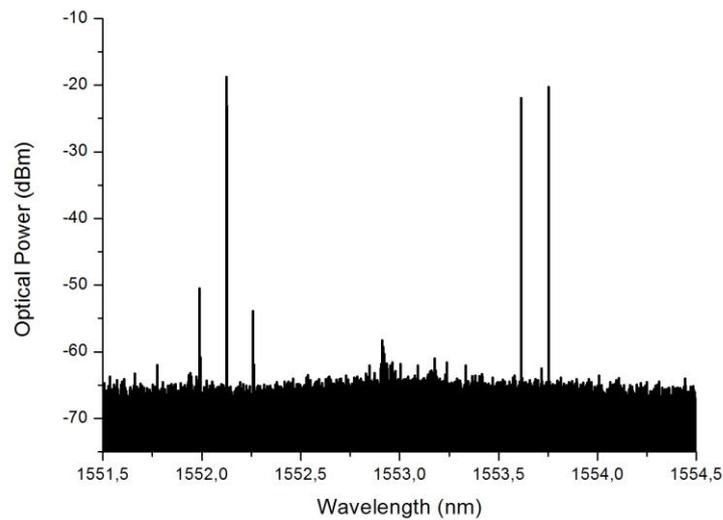


Figura 3.22. Espectro de dos láseres de fibra centrados en 1552.5 nm y en 1553.6 nm y modulados a 16.7 GHz

Esta medida ha sido realizada con el BOSA (resolución de 0.08 pm) y se comprueba que, pese al cambio del controlador de polarización en el montaje, se sigue visualizando una única banda lateral en el láser de 1553.3 nm.

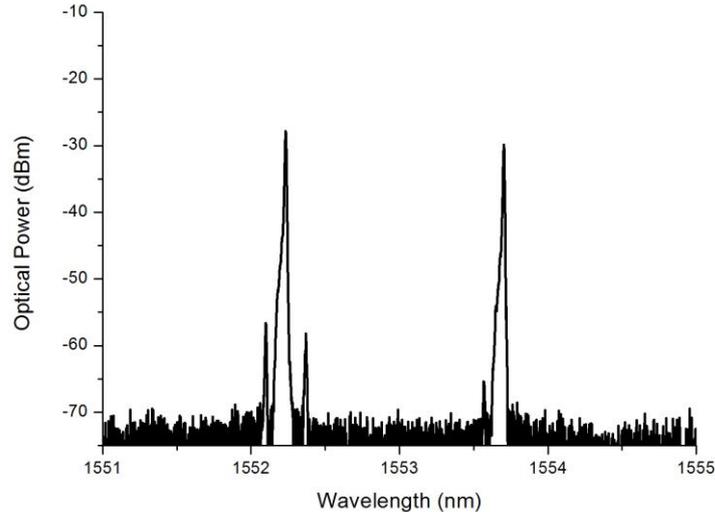


Figura 3.23. Espectro de dos láseres de fibra centrados en 1552.5 nm y en 1553.6 nm y modulados a 16.7 GHz

Esta misma medida ha sido también realizada con el OSA (resolución de 0.01 nm), obteniendo resultados similares donde, pese al cambio del controlador de polarización en el montaje, se sigue visualizando una única banda lateral en el láser centrado en 1553.3 nm.



En conclusión, en este apartado se ha demostrado que, para un rango de frecuencias de 16 GHz a 20 GHz, mediante el fenómeno llamado competición de modos se puede llegar a modular al menos dos láseres centrados en diferentes longitudes de onda utilizando un solo modulador en un montaje formado por un anillo de fibra óptica en combinación con redes de difracción de fibra. Esto supone un ahorro económico considerable a la hora de utilizar en la práctica este tipo de montajes.

3.2.2. Modulación entre 4 GHz y 12 GHz

En este segundo apartado, y con el fin de ampliar el rango de estudio, se realiza un cambio en el montaje, sustituyendo el modulador (PowerLog™ AM-20; AM-40) con el que se realizó el análisis desde 16GHz hasta 20 GHz por otro modulador (PowerBit™ F-10) que permite hacer un barrido frecuencial desde 1 GHz hasta 12.5 GHz. Se estudia el rango comprendido entre 4 GHz y 12 GHz, ya que para frecuencias menores no es posible distinguir las bandas laterales de los láseres modulados con claridad debido a la resolución de los analizadores disponibles. Como se ha comentado con anterioridad, la competición de modos es un efecto indeseado en la mayoría de los láseres, sin embargo, en este estudio, es uno de los factores claves para conseguir nuestro objetivo. Puesto que utilizamos la competición de modos en nuestro caso no será tan importante que los láseres estén sin ecualizar (en algunas graficas no aparecen totalmente ecualizados). Los láseres para este caso se encuentran centrados en 1550.4 nm y en 1552.2 nm. En este caso el láser centrado en 1552.2 nm es el que se modula directamente con el modulador que se encentra en una de las ramas del circulador.

En la siguiente figura el láser modulado a una frecuencia de 7.1 GHz aparece junto con el láser no modulado, en el que mediante la competición de modos genera esa modulación AM.

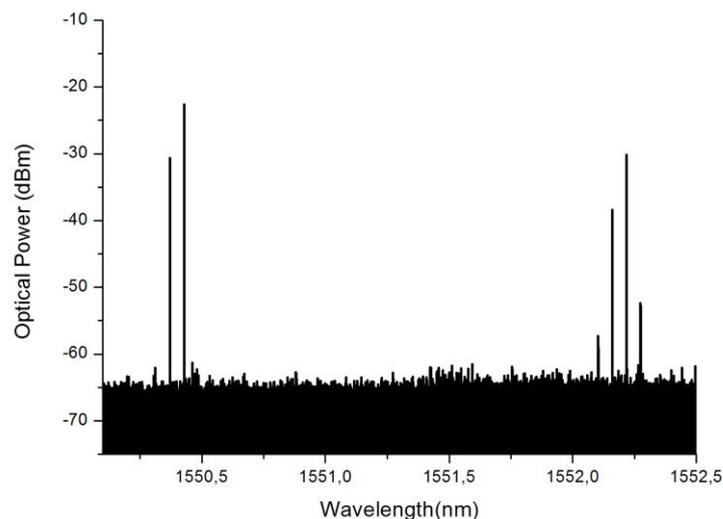


Figura 3.24. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 7.1 GHz con portadoras situadas en 1550.4 nm y en 1552.2 nm

En la figura se aprecia un láser modulado a 7.1 GHz centrado en 1552.2 nm (portadora) junto con las bandas laterales situadas a una determina distancia. Además, aparece un láser que no ha sido modulado directamente, sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos.



Como se aprecia en la figura 3.24 solo aparece una banda lateral y debido a la alta influencia que tiene la polarización en el sistema y a lo complicado que es hallar el punto de polarización óptimo. En este experimento se han utilizado el mismo tipo de controladores de polarización manuales que en el estudio anterior.

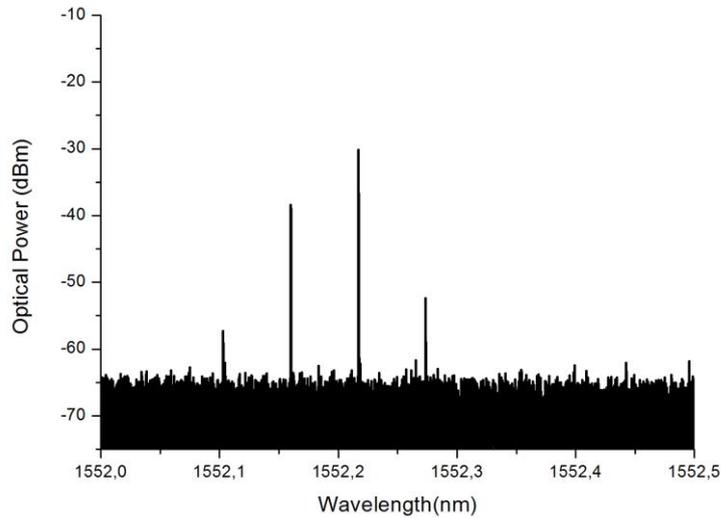


Figura 3.25. Espectro de un láser de fibra modulado a 7.1 GHz con portadora en 1552.2 nm

En esta figura se ha realizado un zoom sobre la zona del láser modulado y centrado a 1552.2 nm medido con el BOSA. Se aprecia claramente que la potencia óptica de salida en este caso es de -30 dBm y que la OSNR es de 35 dBm.

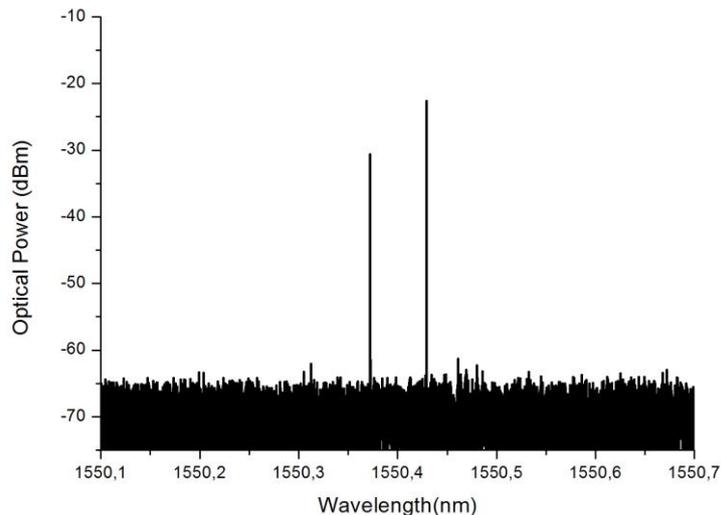


Figura 3.26. Espectro de un láser de fibra modulado a 7.1 GHz centrado en 1550.4 nm

En esta figura aparece el láser centrado en 1550.4 nm junto con una de las bandas laterales fruto de la modulación originada mediante la competición de modos que existe en el sistema. Al igual que en la anterior figura, la medida ha sido tomada con el BOSA. En este caso



la potencia óptica de salida es de -20 dBm, con una OSNR de 45 dBm. Aparece con una sola banda lateral debido a la fuerte dependencia del sistema con la polarización y la dificultad para conseguir una polarización que nos permita visualizar las dos bandas laterales.

A continuación, se muestran algunas figuras relativas a diferentes frecuencias tomadas con ambos analizadores (OSA y BOSA) en los que se produce el mismo fenómeno visto en este apartado.

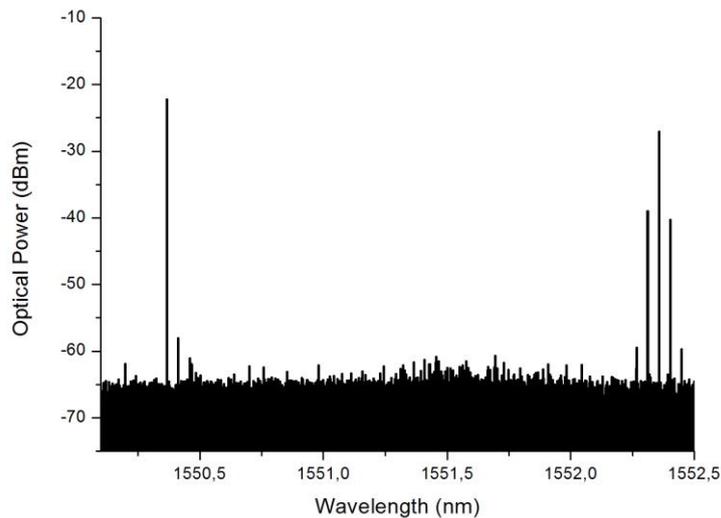


Figura 3.27. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 5.7 GHz con portadoras en 1550.4 nm y en 1552.2 nm

En la figura se aprecia un láser modulado a 5.7 GHz centrado en 1552.2 nm junto con las bandas laterales. Además, aparece un láser que no ha sido modulado con el modulador (portadora en 1550.4 nm). El láser centrado en 1550.4 nm aparece, en este caso, con una sola banda lateral.

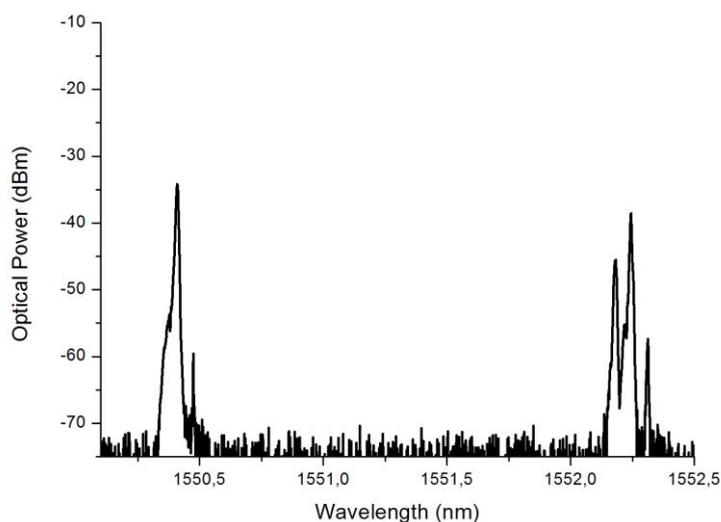
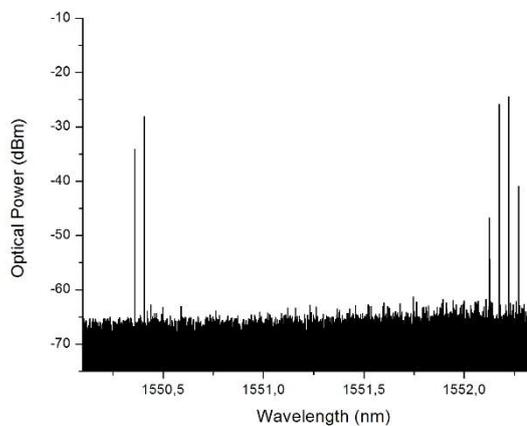


Figura 3.28. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 8 GHz centrados en 1550.4 nm y en 1552.2 nm

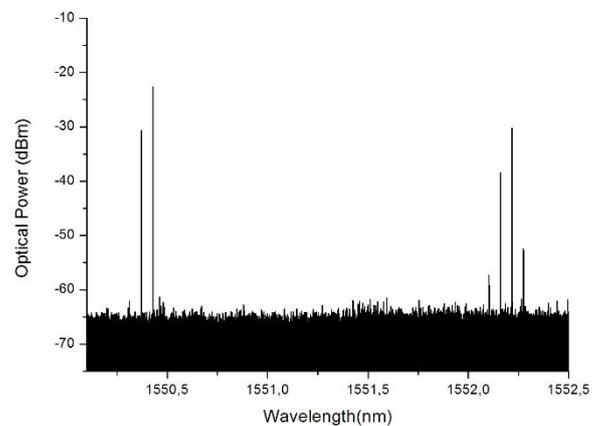


En este caso el analizador utilizado es el OSA, cuya resolución es inferior a la del BOSA. En la figura se aprecia un láser modulado a 8 GHz centrado en 1552.2 nm (longitud de onda que actúa como portadora) junto con las bandas laterales situadas a una distancia relacionada con la frecuencia de modulación. Además, aparece un láser que no ha sido modulado con el modulador (centrado en 1550.4 nm), sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos. Con los datos de las medidas tomadas se procede a realizar una gráfica en la que se muestra si verdaderamente la frecuencia con la que se modula coincide con la separación entre la banda lateral y la portadora del láser centrado en 1550.4 nm.

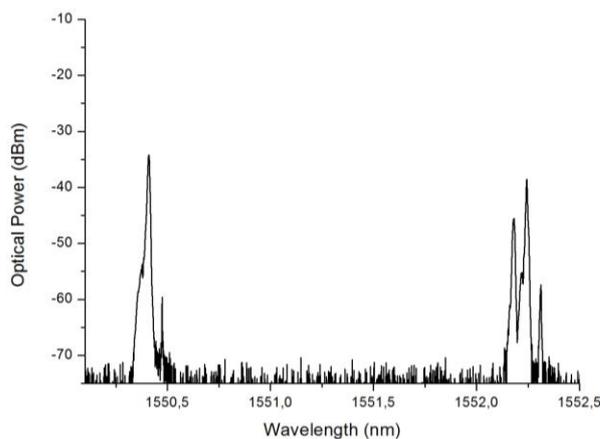
Como se hizo con el otro modulador, se muestran a continuación, una serie de espectros que corresponden a láseres a los que se les aplica diferentes frecuencias de modulación.



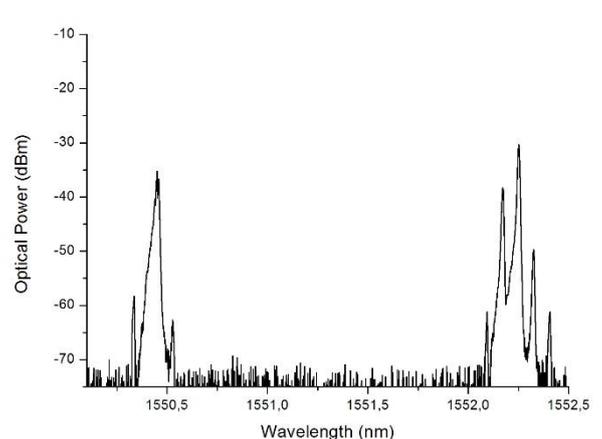
6GHz



7.1GHz



8GHZ



9.7GHz

Para su obtención se requirieron los analizadores ópticos OSA y BOSA, quedando demostrado que se produce modulación en ambas longitudes de onda, apreciándose mejor en el BOSA.



En la gráfica 3.29 se representa la frecuencia de modulación a la que ajustamos manualmente el modulador en función de la frecuencia que calculamos al analizar la distancia entre la portadora y las bandas laterales.

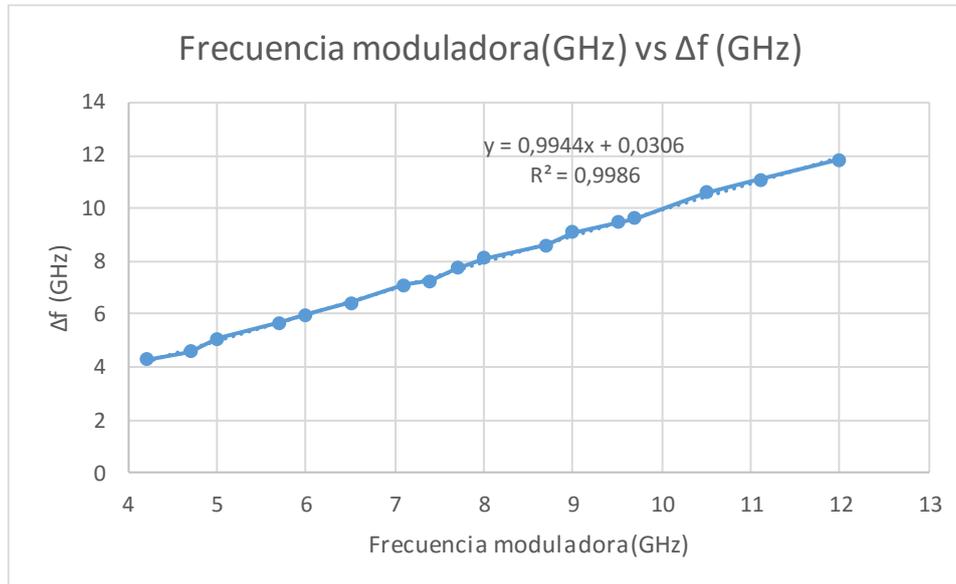


Figura 3.29. Representación gráfica de la frecuencia moduladora teórica vs práctica para un láser de fibra con portadora en 1552.2 nm

En esta gráfica se representa la frecuencia de modulación del láser centrado en 1552.2 nm respecto a la frecuencia obtenida en el láser en el cual no se aplica modulación alguna (1550.4 nm). Como se puede apreciar la respuesta es prácticamente lineal, obteniendo un valor de R^2 muy próximo a la unidad, 0.9986, confirmando lo que se aprecia gráficamente.

De nuevo podemos concluir que se está produciendo modulación en ambos láseres, confirmando que con un solo modulador y mediante el fenómeno de la competición de modos se puede modular al menos 2 láseres simultáneamente.

En conclusión, en este apartado se ha demostrado que, para un rango de frecuencias de 4GHz a 12 GHz, mediante la competición de modos se puede llegar a modular al menos dos láseres centrados en diferentes longitudes de onda utilizando un solo modulador en un montaje formado por un anillo de fibra óptica en combinación con redes de difracción de fibra.

3.3. Estudio experimental de un conversor de longitud de onda basado en un láser de fibra óptica basado en circuladores para diferentes frecuencias de modulación.

Una vez que hemos demostrado que para estructuras en anillo y mediante FBGs podemos modular un láser, el cual no está conectado a un modulador, a partir de la competición de modos que se genera dentro del sistema, se pasa a demostrar que, para otra estructura diferente también se consigue esa conversión en longitud de onda.

Se ha utilizado un modulador PowerBit™ F-10, con el que se ha realizado un barrido frecuencial que va de los 16 GHz hasta los 20 GHz. El rango de frecuencias está limitado debido a las características técnicas del aparato restringiendo el rango de operación (Anexo).

La cavidad analizada en este caso es una estructura en serie basada en circuladores en lugar de acopladores ópticos y que también hace uso de las redes de difracción de Bragg para seleccionar las longitudes de onda de emisión de los láseres generados. Esta estructura se puede ver en la figura 3.30 Los circuladores, en comparación con los acopladores, tienen menos pérdidas de inserción, son más selectivos en longitud de onda y funcionan en un solo sentido, evitando posibles reflexiones. Todas estas características junto con el hecho de que el control de la polarización resultó más sencillo a la hora de obtener los resultados, hacen de esta estructura una mejor opción que la analizada anteriormente.

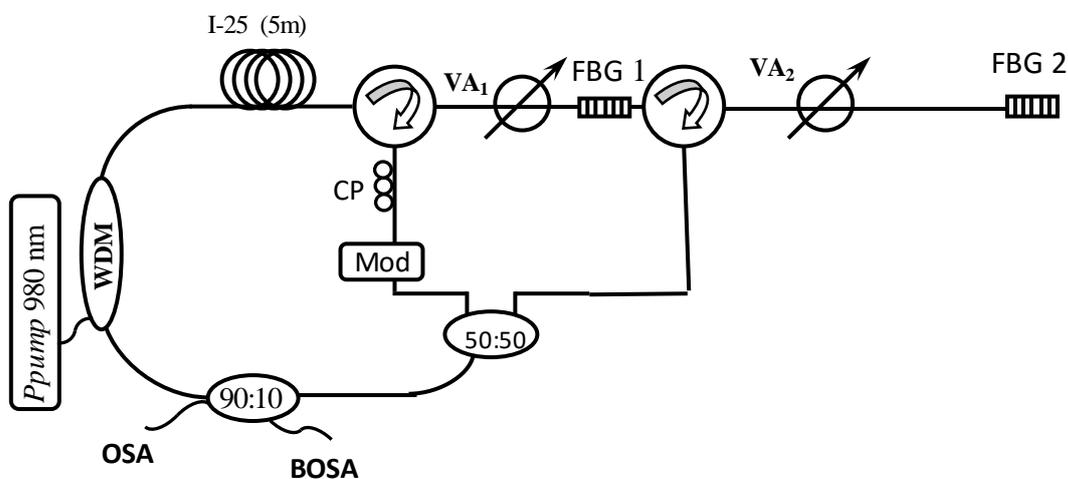


Figura 3.30. Estructura en paralelo basada en circuladores con un modulador para dos FBGs

Este láser de fibra óptica multilínea está basado en una estructura en paralelo de circuladores de tres puertos. Está compuesto por un controlador de temperatura e intensidad junto con un láser de bombeo a 980 nm, seguido de un WDM comercial. A continuación, se coloca un tramo de erbio consiguiendo a su salida una amplificación óptica. A la salida de la fibra se coloca el primer circulador del sistema por el puerto (1). En uno de sus puertos, (el 3), se coloca el controlador de polarización junto con el modulador, y en el otro (puerto 2) se conecta el FBG que se va a modular. El otro circulador se sitúa a continuación, colocando en uno de sus puertos un atenuador óptico en su puerto 3 variable y otro FBG (no modulado), en el puerto 2

Los FBGs utilizados en esta estructura están centrados en 1552.1 nm y en 1553.4 nm.

Al igual que en los apartados anteriores, donde el montaje estaba formado por una estructura en anillo en combinación con FBGs, se busca generar una modulación AM.

En la siguiente figura el láser modulado a una frecuencia de 16 GHz aparece junto con el láser no modulado, en el que mediante la competición de modos genera esa modulación AM.

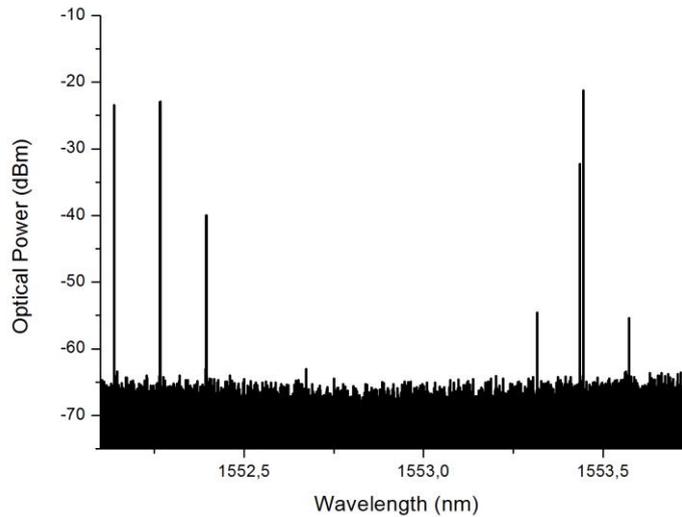


Figura 3.31. Espectro de dos láseres de fibra modulados a 16 GHz con portadoras en 1552.1 nm y en 1553.4 nm

En la figura 3.31, obtenida con el BOSA, se aprecia un láser modulado a 16 GHz centrado en 1552.1 nm (portadora) junto con las bandas laterales. Además, aparece un segundo láser, el cual no ha sido modulado inicialmente con el modulador, sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos. En este caso los láseres obtenidos presentan potencia óptica de salida similar (de unos -22 dBm). En el láser centrado en 1553.4 nm aparecen las dos bandas laterales junto con la portadora debido a la competición de modos que sufre el sistema.

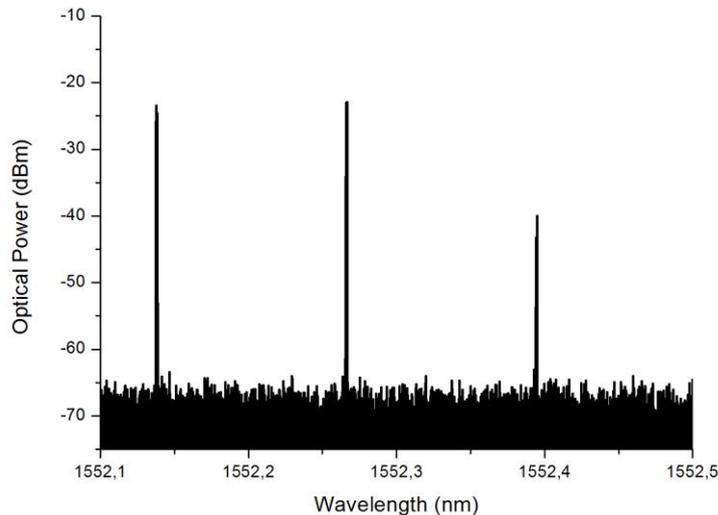


Figura 3.32. Espectro de un láser de fibra modulado a 16 GHz centrado en 1552.1 nm

En esta figura se ha realizado zoom sobre la zona del láser modulado a 1552.1 nm, donde se aprecian claramente las bandas laterales. Como se ha mencionado anteriormente, la potencia óptica de salida es de unos -22 dBm y presentan una OSNR de alrededor de 45 dBm.

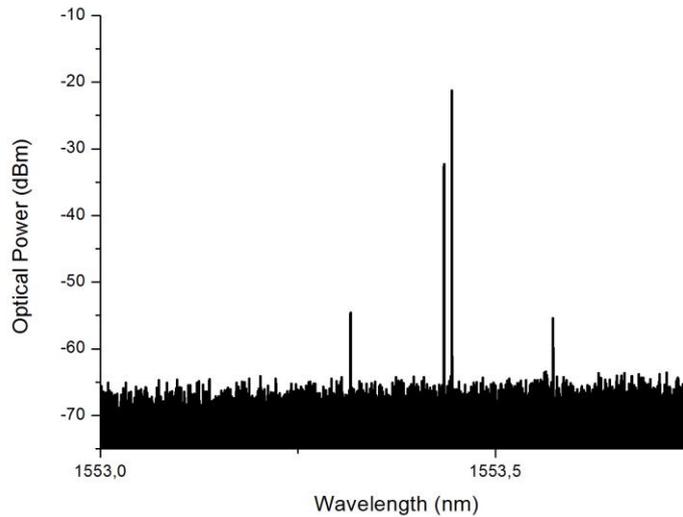


Figura 3.33. Espectro de un láser de fibra modulado a 16 GHz centrado en 1553.4 nm

En esta figura aparece el láser centrado en 1553.5 nm junto con dos bandas laterales fruto de la modulación originada mediante la competición de modos que existe en el sistema. Al igual que en la anterior figura, la medida ha sido tomada con el BOSA. Cabe destacar que aparecen las dos bandas laterales y es debido a que, al ser una estructura más estable, parámetros como la polarización son más fáciles de ajustar.

Con los datos obtenidos se procede a realizar una gráfica en la que se muestra si verdaderamente la frecuencia con la que se modula el láser centrado en 1552.1 nm coincide con la separación entre la banda lateral y la portadora del láser centrado en 1553.4 nm, es decir, del láser no modulado.

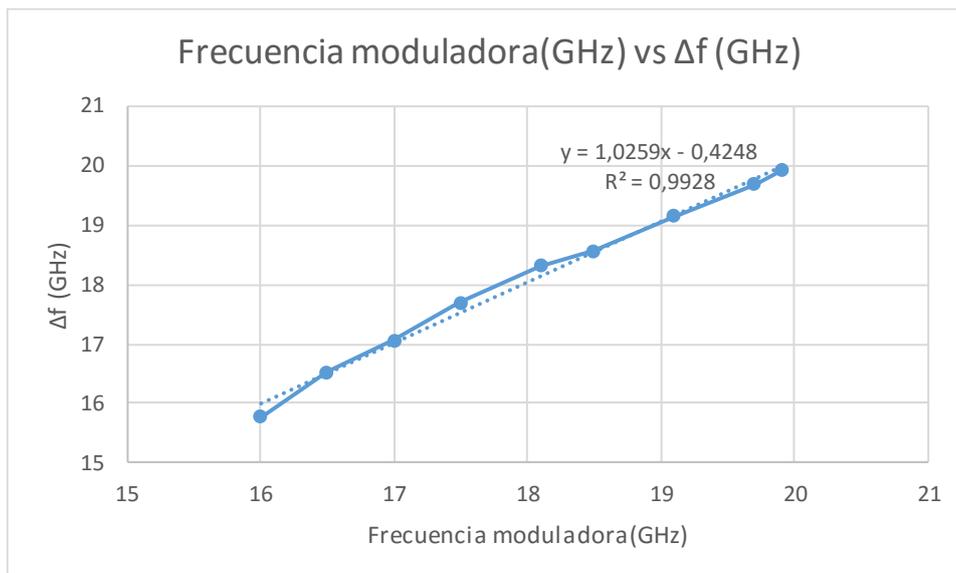


Figura 3.34. Representación gráfica de la frecuencia moduladora teórica vs práctica, perteneciente al láser centrado localizado en 1553.4



Como se ha hecho con anterioridad, como esta gráfica es lineal, se puede afirmar que la frecuencia con la que se modula el láser centrado en 1552.1 nm es la misma frecuencia que la que modula respecto al láser centrado en 1553.4 nm.

En conclusión, en este apartado se ha demostrado que, para un rango de frecuencias de 16 GHz a 20 GHz, mediante el fenómeno llamado competición de modos se puede llegar a modular al menos dos láseres centrados en diferentes longitudes de onda utilizando un solo modulador en un montaje formado por una estructura en paralelo con circuladores en combinación con redes de difracción de fibra. A pesar de que los circuladores son dispositivos más caros que los acopladores, la mejora introducida en el sistema (mayor estabilidad, mejor control de la polarización, etc.) hacen que este aumento de precio sea despreciable frente a las mejoras introducidas. Además, el ahorro de uno o varios moduladores supone una disminución mucho mayor en el coste del sistema que lo que puede aumentar su precio el uso de circuladores.

Se puede afirmar que las previsiones que teníamos en un principio, en las que se comenta las ventajas de este tipo de estructuras frente a las formadas por anillos en combinación con FBGs, se han cumplido. El tiempo de obtención de datos ha sido mucho inferior y es gracias a la mayor estabilidad del sistema, como consecuencia de un efecto menos fuerte de la polarización.

3.4. Estudio experimental de un conversor de varias longitudes de onda basado en un láser de fibra óptica en anillo para diferentes frecuencias de modulación.

Para la realización de éste estudio experimental se ha utilizado una vez más el mismo láser de fibra con cavidad en anillo que en apartados anteriores. A la vista de los resultados mostrados previamente, y una vez demostrado que, modulando un láser a una determinada longitud de onda, debido al efecto de competición de modos, se origina modulación en otro láser el cual no ha sido modulado, vamos a comprobar si esta transferencia de modulación se produce para más de un láser. Es por ello que en este montaje añadiremos otro láser más sin modular, con el objetivo de ver ese fenómeno en ambos láseres no modulados. El láser modulado estará centrado en 1552.1 nm y los otros dos en 1548.5nm y en 1550.4nm.

La figura 3.35 muestra la configuración de la estructura utilizada en este estudio experimental.

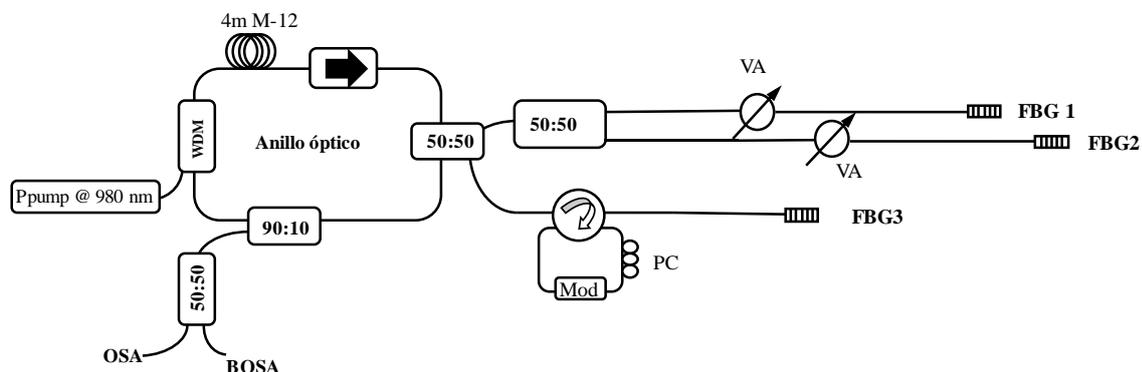


Figura 3.35. Estructura en anillo combinada con 3 FBGs

Para este nuevo montaje se vuelve a utilizar una cavidad en anillo de fibra óptica en combinación con las redes de difracción. La única diferencia con respecto a la estructura anterior es que ahora tendremos 3 FBGs en nuestra cavidad en anillo: dos de ellos sin modular y un tercero modulado.



En este caso, la medida del espectro óptico de salida ha sido medido haciendo uso del BOSA, cuya resolución es de 0.08pm. Esta resolución nos permitirá diferenciar claramente las bandas laterales para el rango de frecuencias realizado.

Para el barrido frecuencia se ha utilizado el modulador (PowerLog™ AM-20; AM-40) que permite hacer un barrido frecuencial desde 1 GHz hasta 12.5 GHz.

En la siguiente figura el láser modulado (1552.1 nm) a una frecuencia de 5 GHz aparece junto con los dos láseres no modulados, en los que mediante la competición de modos genera esa modulación AM.

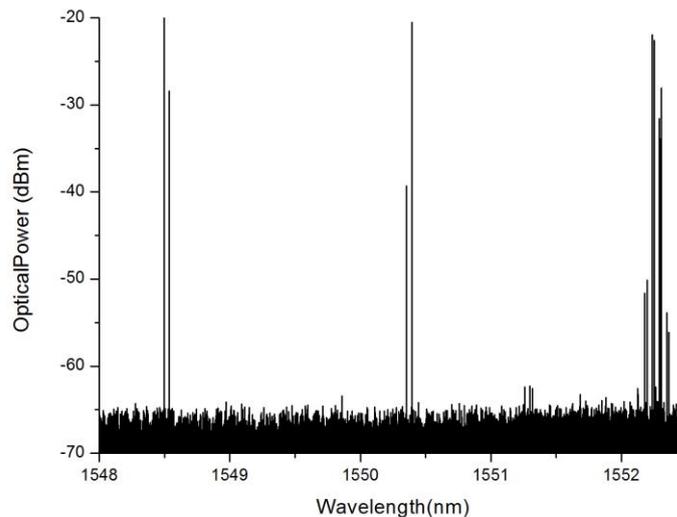


Figura 3.36. Espectro de tres láseres modulados a 5 GHz centrados en 1552.1 nm, en 1548.5 nm y en 1550.4 nm

En la figura se aprecian 3 láseres diferentes, uno modulado a 5 GHz centrado en 1552.1 nm. Además, aparecen dos láseres que no han sido modulados directamente con el modulador, sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos.

Como se aprecia en esta figura solo aparece una banda lateral para los dos láseres no modulados lo que es debido a la falta de precisión a la hora de ajustar la polarización de forma manual.

Como la información de la frecuencia moduladora se encuentra entre la portadora y la banda lateral, con que aparezca una de las bandas junto con la portadora serviría para comprobar que efectivamente la frecuencia que modula los láseres situados en 1548.5 nm y en 1550.4 nm es la misma que la que modula el láser centrado en 1552.1 nm.

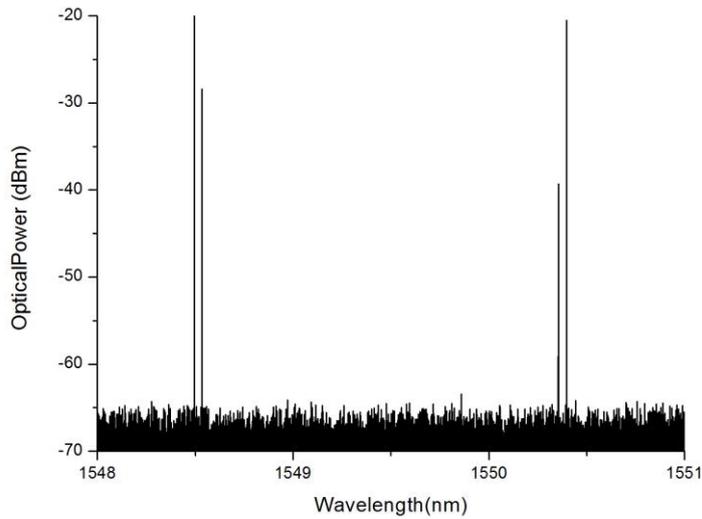


Figura 3.37. Espectro de dos láseres modulados a 5 GHz centrados en 1548.5 nm y en 1550.4 nm

En esta figura 3.37 aparecen los láseres centrados en 1548.5 nm y en 1550.4 nm junto con una banda lateral fruto de la modulación originada mediante la competición de modos que existe en el sistema. Al igual que en la anterior figura, la medida ha sido tomada con el BOSA.

Con los datos de las medidas tomadas se procede a realizar dos gráficas en las que se muestra si verdaderamente la frecuencia con la que se modula uno de los láseres coincide con la separación entre la banda lateral y la portadora del láser centrado en 1552.1 nm. Los resultados mostrados en la figura 3.38 confirman el buen funcionamiento de nuestro sistema, obteniendo una relación lineal entre ambos parámetros.

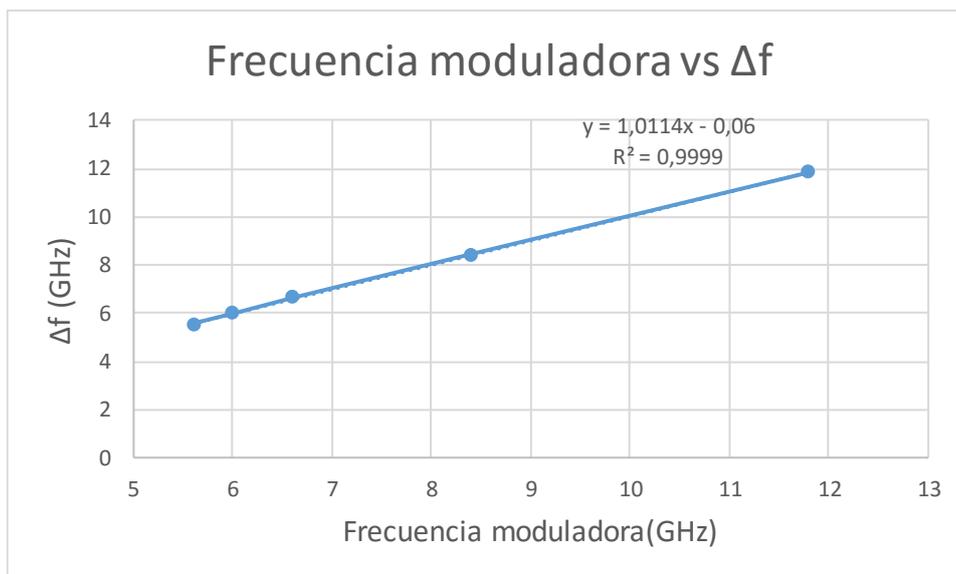


Figura 3.38. Representación gráfica de la frecuencia moduladora teórica vs práctica correspondiente al láser centrado en 1548.5. nm



Los resultados para el caso del láser centrado en 1550.4 nm se muestran en la figura 3.39, verificando nuevamente el correcto ajuste entre la modulación introducida en el láser y la modulación medida en el láser sin modular centrado a 1550.4 nm.

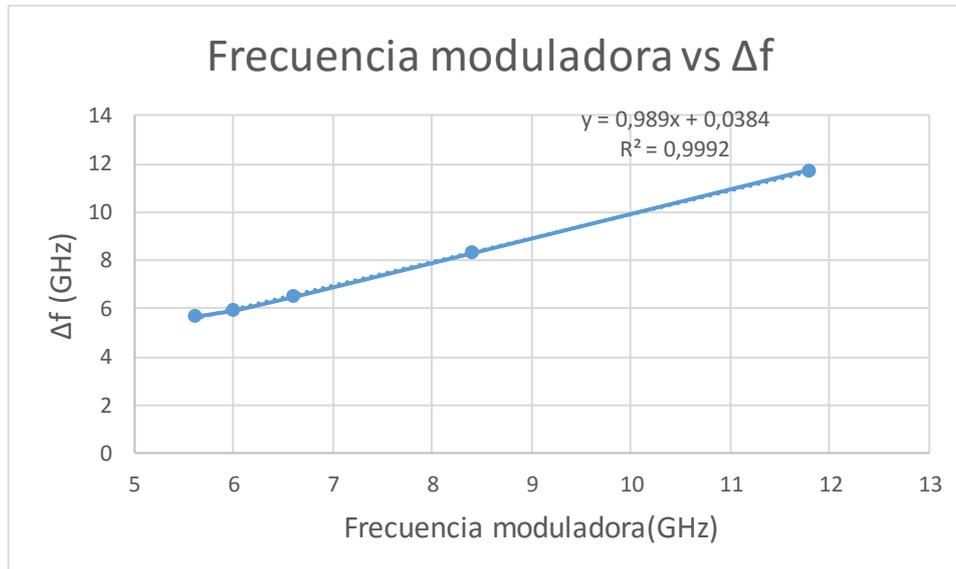


Figura 3.39. Representación gráfica de la frecuencia moduladora teórica vs práctica correspondiente al láser centrado en 1548.5. nm

En conclusión, se demuestra que modulando un láser de fibra óptica multilínea en anillo en combinación con FBGs centrado en una determinada longitud de onda, se puede modular al menos 2 láseres más al simultáneamente gracias a la competición de modos existente. El hecho de modular dos láseres sin utilizar un modulador, supone un gran avance y un ahorro económico muy importante en el campo de las comunicaciones ópticas.

3.5. Estudio experimental de un conversor de longitudes de onda y su aplicación como sensores de temperatura de mayor precisión.

Como es bien sabido, una de las aplicaciones de los láseres de fibra óptica es su uso como sensores de temperatura mediante la utilización de redes de difracción de Bragg. La novedad que se consigue en este TFG es que se consigan diferentes medidas simultáneas sobre el mismo parámetro.

Un hecho que ya está demostrado y que se ha comentado previamente en el apartado teórico del proyecto es que, si sometemos a variaciones de temperatura a uno o varios FBGs, estos se van desplazando en longitud de onda a medida que la temperatura varía.

En los apartados anteriores se ha demostrado que, gracias a la competición de modos, es posible modular uno o más láseres sin necesidad de utilizar más de un modulador en nuestro montaje. En este último apartado del proyecto, se tiene como objetivo poder crear un sensor con una precisión mucho mejor que si no existiese modulación en el proceso ya que si el láser está modulado, la información referente a la temperatura se encontrará no solo en una longitud de onda sino en dos (si aparece una única banda lateral) o en tres (si conseguimos obtener las dos bandas laterales). De esta

forma se obtendrá el doble de precisión si en el láser, genera una única banda lateral junto con la portadora o, en el caso de modularse junto con las dos bandas laterales, tendremos el triple de precisión, es decir se conseguirán tres medidas de un mismo parámetro simultáneamente.

3.5.1. Estudio de dos láseres de fibra óptica modulados y empleados como sensores de temperatura

El montaje utilizado en este apartado es el mismo que en los apartados anteriores. La única diferencia está en que en esta ocasión uno de los FBGs será medido dentro de una cámara climática en la que se verá sometido a variaciones de temperatura. El esquema de esta estructura se muestra en la figura siguiente:

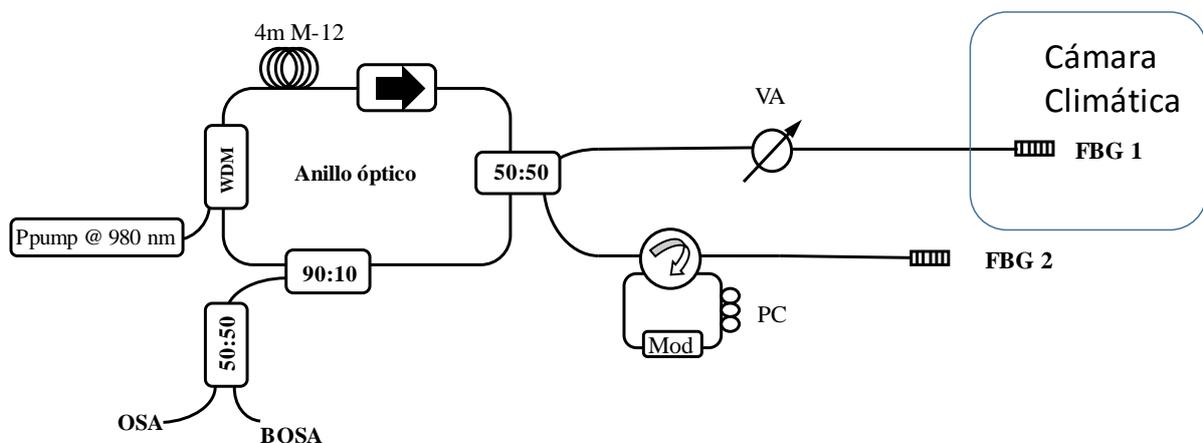


Figura 3.41. Estructura en anillo con en combinación con dos FBGs, uno de ellos en cámara climática, y el otro conectado a un modulador de amplitud

El estudio para dos láseres se ha realizado a dos frecuencias de modulación diferentes mediante el uso de dos moduladores distintos. Para la primera frecuencia estudiada se ha utilizado el modulador PowerLog™ AM-20; AM-40 (frecuencias entre 16 GHz y 20 GHz) y para la segunda el modulador PowerBit™ F-10 (frecuencias entre 1 GHz y 12.5 GHz). Las frecuencias utilizadas han sido de 17.3GHz para el primer estudio y de 9 GHz para el segundo.

Para el caso de una frecuencia de modulación de 17.3 GHz, el espectro obtenido mediante el OSA es el que se muestra en la figura siguiente:

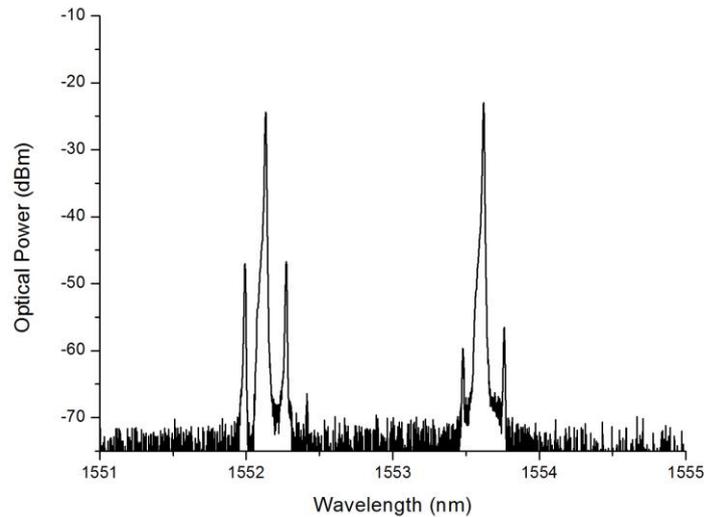


Figura 3.42. Espectro de dos láseres modulados a 17.3 GHz centrados en 1549.6 nm y en 1550.3 nm a una temperatura de 24°C

En la figura se aprecia un láser modulado a 17.3 GHz centrado en 1549.6 nm (longitud de onda de la portadora) junto con las bandas laterales situadas a una determinada distancia. Además, podemos observar la aparición de una de las bandas laterales en el láser que no ha sido modulado (centrado en 1550.3 nm) tal y como se ha visto en apartados anteriores. En este caso los láseres no presentan la misma potencia óptica de salida (unos -15 dBm y -20 dBm respectivamente). Este hecho no es tan importante en este caso, puesto que lo que nos interesa es que prevalezca el efecto de la competición de modos y por lo tanto el que haya una transferencia de modulación de un láser a otro.

Al principio del experimento, el FBG centrado en 1550.3 nm se encuentra dentro de una cámara climática a 24°C.

En la siguiente figura se muestra la variación de la longitud de onda central del láser al someter al FBG a variaciones de temperatura. En este caso la figura muestra la variación de la longitud de onda de la portadora del láser centrado en 1550.3 nm. Se observa que conforme aumenta la temperatura, desde 24°C hasta 54°C dicho láser se desplaza en longitud de onda hasta los 1550.7 nm. Además, se observa que, para temperaturas altas, aparecen las dos bandas laterales. Esto podría ser debido a que a mayor temperatura se tiene mayor competición de ganancia y por consiguiente es más fácil que aparezcan las dos bandas laterales junto con la portadora. El inconveniente es que para conseguir una visualización de la modulación óptica los atenuadores ópticos variables juegan un papel importante, haciendo que en la gráfica no se aprecie el otro láser. Sin embargo, dado que conocemos la longitud de onda central de los FBGs, así como la frecuencia de modulación aplicada, este problema no es grave ya que conocemos dónde estará centrado nuestro láser y la separación entre su portadora y la banda lateral.

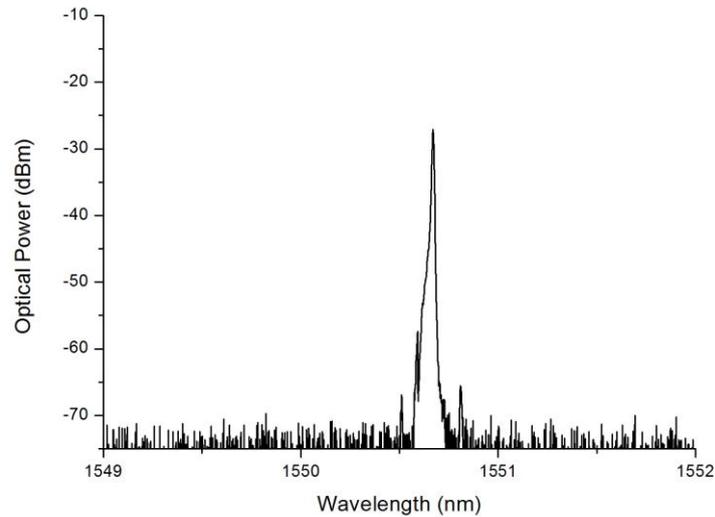


Figura 3.43. Espectro del láser modulado a 17.3 GHz centrado en 1550.3 nm para una temperatura de 54°C

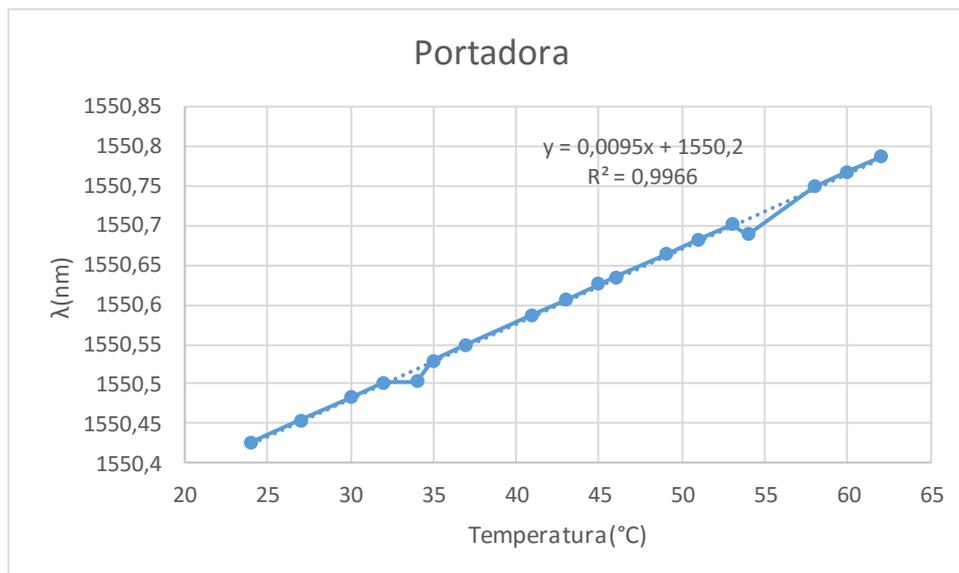


Figura 3.44. Evolución del láser cuya portadora comienza en 1550.3 nm en función de la temperatura.

La figura 3.44 representa la variación de la longitud de onda central respecto a la temperatura. Esta longitud de onda varía desde 1550.3nm hasta 1550.79 nm para una variación en temperatura de unos 30 °C.

Como se puede apreciar el comportamiento es prácticamente lineal, con una pendiente de 0.0095, es decir el láser se desplaza 0.0095 nm por cada grado centígrado (sensibilidad de 9.5pm/°C).

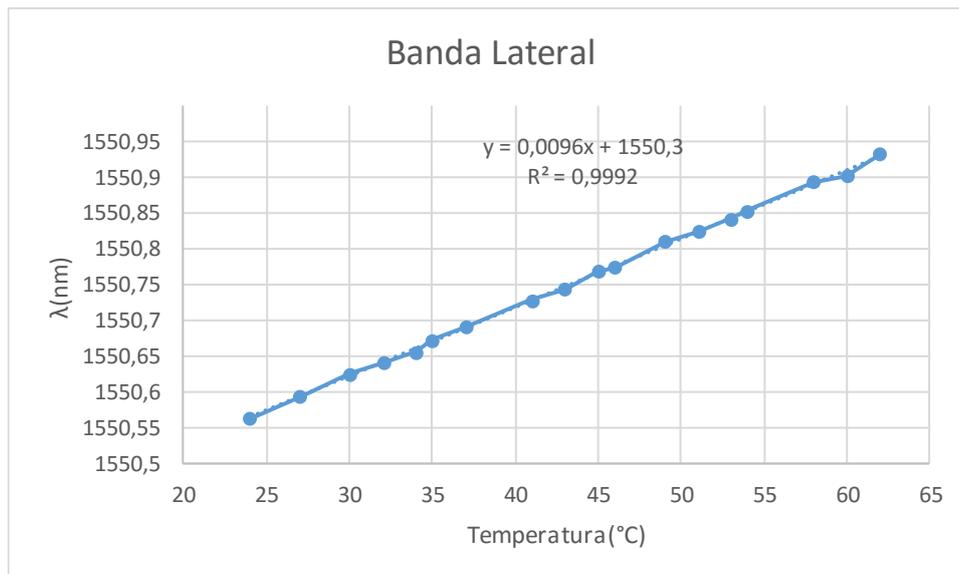


Figura 3.45. Evolución de la banda lateral del láser centrado en 1550.3 nm en función de la temperatura

La figura 3.45 representa la variación de la longitud de onda de la banda lateral respecto a la temperatura. Esta longitud de onda varía desde 1550.56 nm hasta 1550.93 nm para una variación en temperatura de unos 30 °C. En este caso la sensibilidad obtenida fue de 9.6pm/°C.

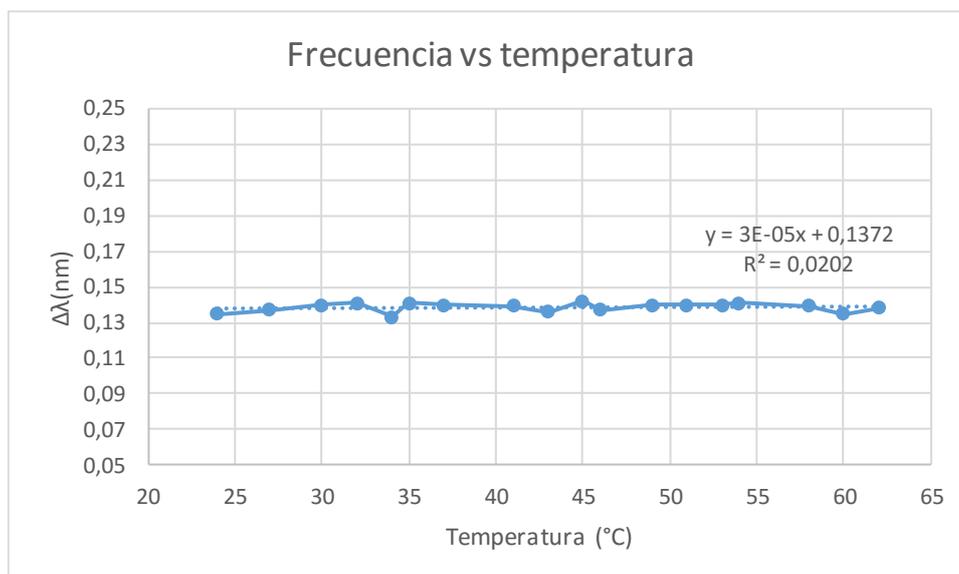


Figura 3.46. Representación de la distancia entre la portadora y la banda central frente a la temperatura

En esta figura muestra como la distancia entre la portadora y la banda lateral se mantiene prácticamente lineal a lo largo de la temperatura. Esto indica que se está modulando siempre a la misma frecuencia.

En conclusión, para este modulador queda demostrado que el láser que se ha utilizado funciona como sensor de temperatura, pudiendo llegar a realizar 3 medidas simultáneas sobre el mismo parámetro.

En esta segunda fase se ha utilizado un modulador PowerBit™ F-10 y la frecuencia para la cual se ha realizado las medidas es de 9 GHz.



La siguiente figura ha sido obtenida con el BOSA, debido a que a frecuencias más bajas necesitamos mejor resolución de medida.

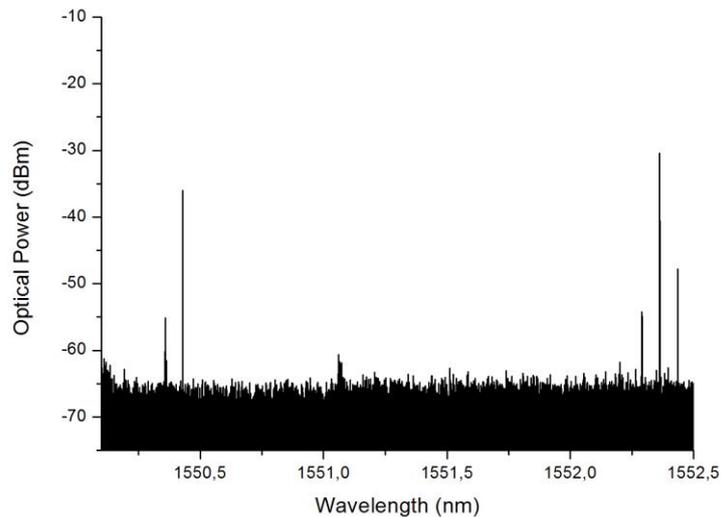


Figura 3.47. Espectro de dos láseres modulados a 9GHz centrados en 1550.4 nm y en 1552.3 nm a una temperatura de 24°C

En la figura se aprecia un láser modulado a 9 GHz centrado en 1552.3 nm junto con las bandas laterales. Además, aparece un láser que no ha sido modulado mediante el fenómeno de competición de modos (1550.4 nm). En este caso los láseres no presentan la misma potencia óptica de salida (unos -35 dBm y -30 dBm respectivamente).

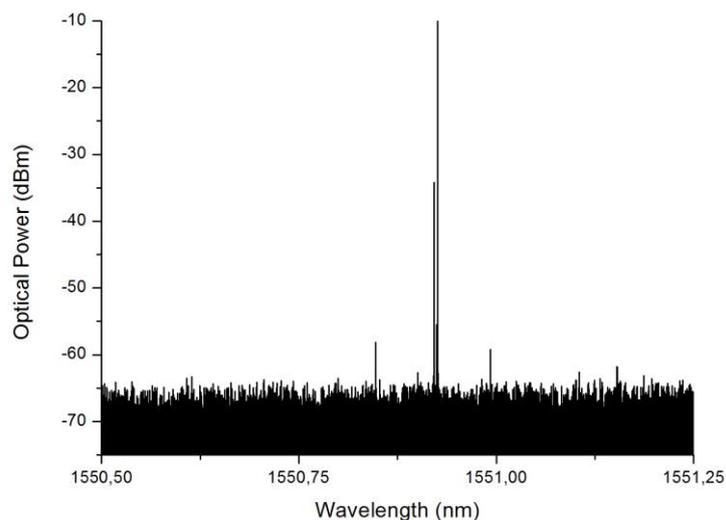


Figura 3.48. Espectro del láser modulado a 9 GHz centrados en 1550.4 nm a una temperatura de 80°C



La figura 3.49 representa la variación de la longitud de onda central del láser centrado en 1550.4nm respecto a la temperatura. Se observa que conforme se aumenta la temperatura, desde temperatura ambiente hasta llegar a 80°C, dicho láser se ha desplazado en longitud de onda hasta los 1550.9 nm.

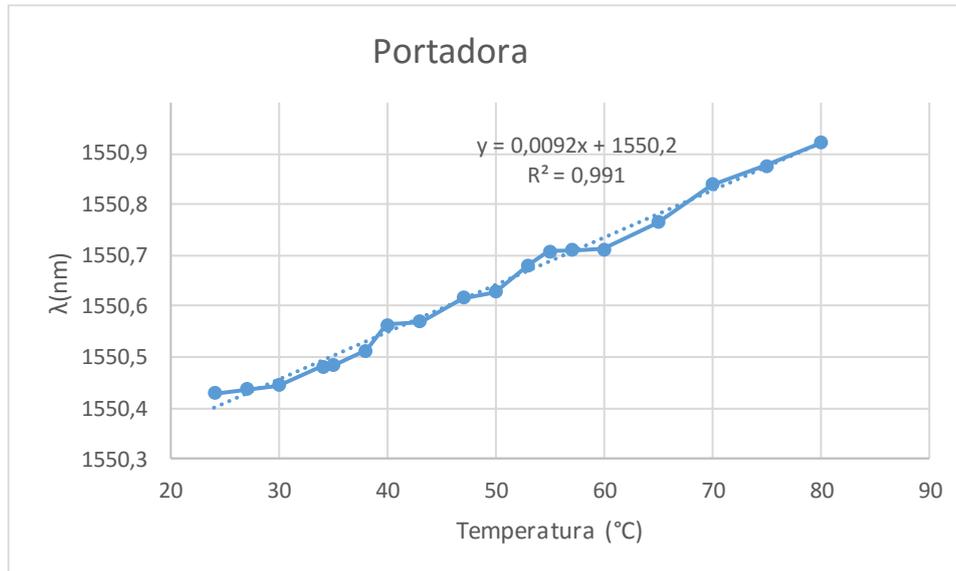


Figura 3.49. Evolución del láser centrado en 1550.3 nm en función de la temperatura

De nuevo mostramos la evolución de la banda lateral del láser situado en 1550.3 nm con la temperatura. En este caso la sensibilidad obtenida para la longitud de onda central fue de 9.2 pm/°C como se muestra en la figura 3.50.

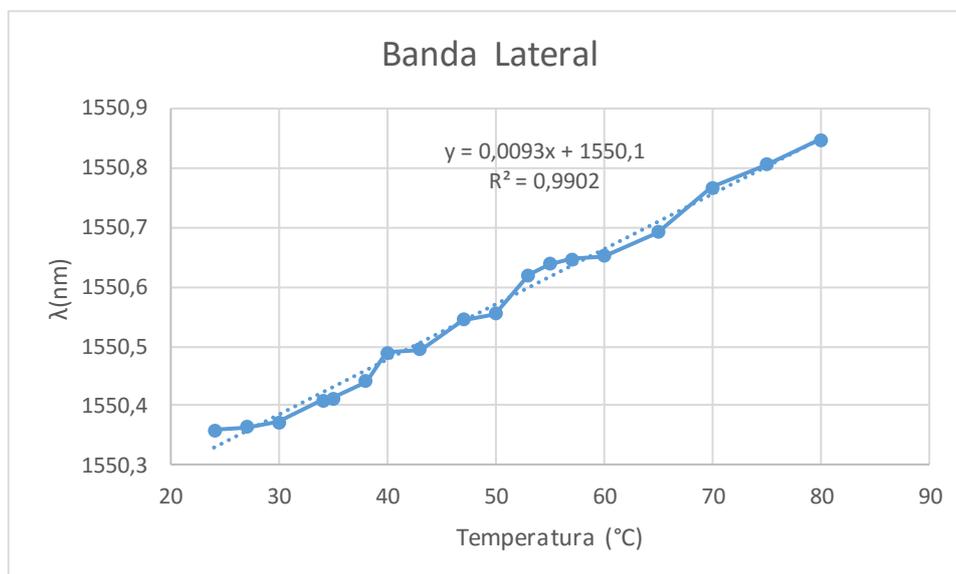


Figura 3.50. Evolución de la banda lateral del láser centrado en 1550.4 nm en función de la temperatura

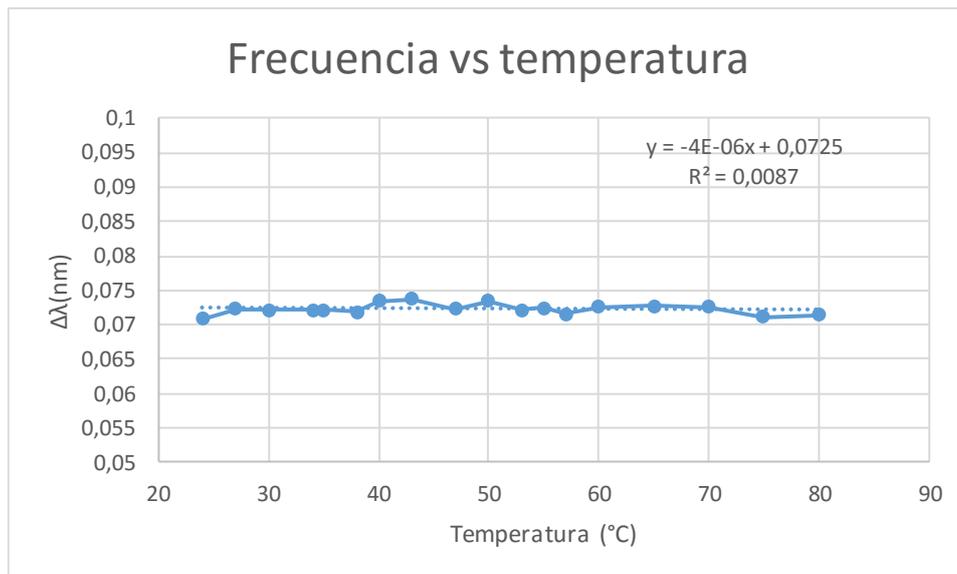


Figura 3.51 Representación de la distancia entre bandas frente a la temperatura

En esta gráfica se muestra como la distancia entre la portadora y la banda lateral se mantiene prácticamente constante a lo largo de la temperatura, al igual que sucedía en el estudio anterior. Esto demuestra que la modulación no ha variado a pesar de modificar la temperatura.

En conclusión, para este modulador queda demostrado que el láser que se ha utilizado funciona como sensor térmico, pudiendo llegar a realizar 3 medidas simultaneas sobre el mismo parámetro.

3.5.2. Estudio de tres láseres de fibra óptica como sensores de temperatura

En este caso la única modificación realizada en la estructura fue el uso de 3 FBGs en lugar de dos (uno de ellos modulado y otros dos no). El montaje utilizado en este apartado se muestra a continuación:

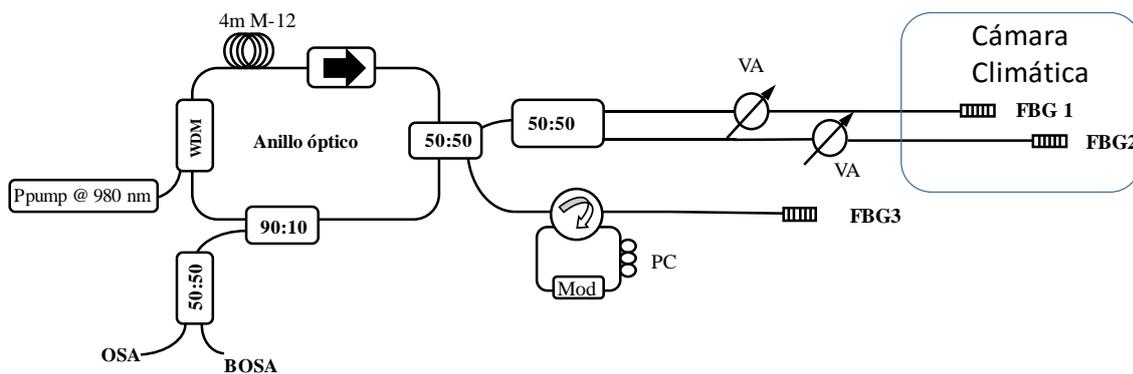


Figura 3.52. Estructura en anillo con tres FBGs, dos de ellos en cámara climática

En este estudio para tres láseres se ha utilizado el modulador PowerBit™ F-10 (frecuencias entre 1 GHz y 12.5 GHz) y la frecuencia de modulación fue de 6.6 GHz. El funcionamiento es el mismo que para el diseño anterior, con la única diferencia que se añade otro FBG dentro del montaje.



La siguiente figura muestra los tres láseres a temperatura ambiente, no habiendo de momento desplazamiento en longitud de onda.

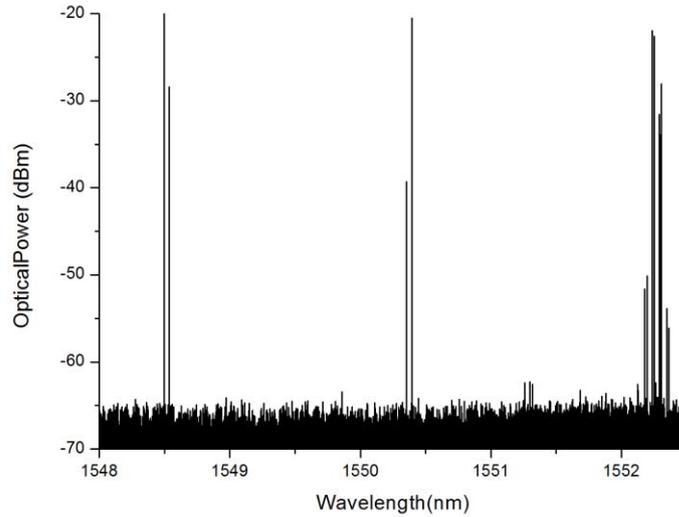


Figura 3.53. Espectro de tres láseres modulados a 6.6 GHz centrados en 1548.7 nm, 1550.4 nm y 1552.15 nm para una temperatura de 24°C

En la figura se aprecia un láser modulado a 6.6 GHz centrado en 1552.15 nm junto sus bandas laterales. Además, aparecen dos láseres que no han sido modulado con el modulador, sino que la modulación se consigue mediante el fenómeno de competición de modos (centrados en 1548.4 nm y 1550.4 nm). Ambos láseres se encuentran dentro de la cámara climática y serán los que experimenten las variaciones de temperatura.

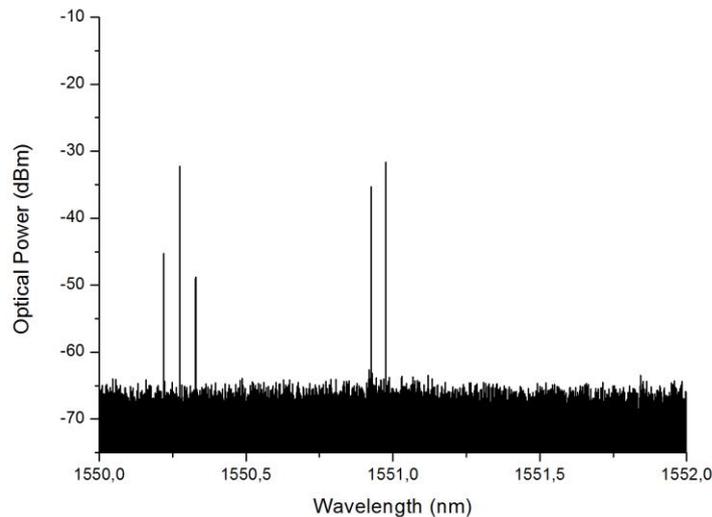


Figura 3.54. Espectro de los láseres modulados a 6.6 GHz centrados en 1550.5 nm y en 1551 nm a una temperatura de 80°C

En la siguiente figura se aprecia el efecto de la variación de la temperatura sobre los láseres centrados en 1549.7 nm y en 1550.4 nm. Se observa que conforme se ha aumentado la temperatura hasta llegar a 80°C dichos láseres se han desplazado en longitud de onda hasta los 1550.27 nm y 1550.9



nm respectivamente. Además, se observa que en uno de ellos aparecen las dos bandas laterales. Lo que, como en el caso anterior, puede ser debido a que a mayor temperatura se tiene mayor competición de ganancia y por consiguiente es más fácil que aparezcan las dos bandas laterales junto con la portadora.

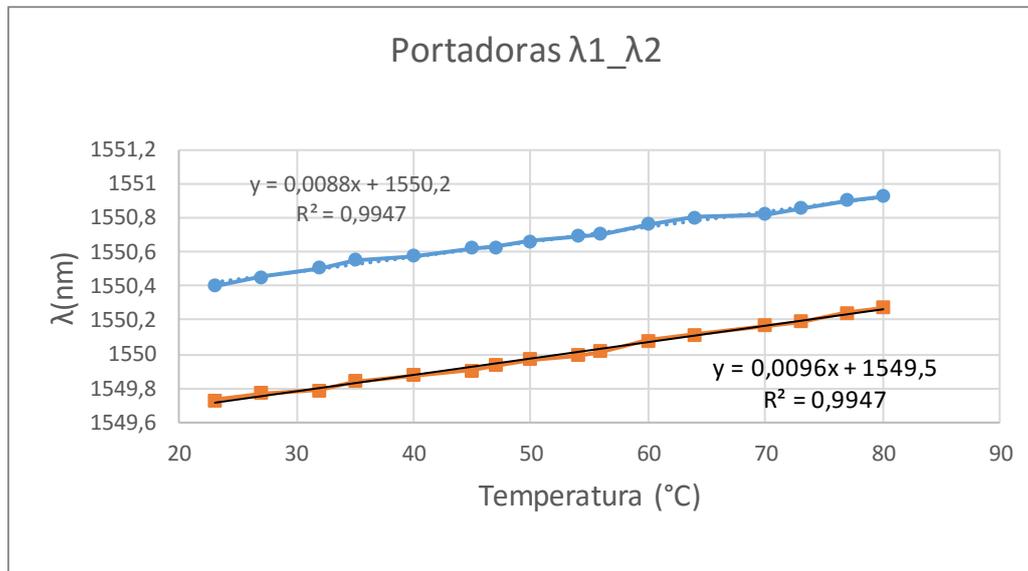


Figura 3.55. Evolución de los láseres centrados en 1549.7 nm y en 1550.4 nm en función de la temperatura

Las sensibilidades medidas en este caso para las longitudes de onda centrales de los láseres a 1549.7 nm y 1550.2 nm fueron de 9.6pm/°C y 8.8pm/°C respectivamente.

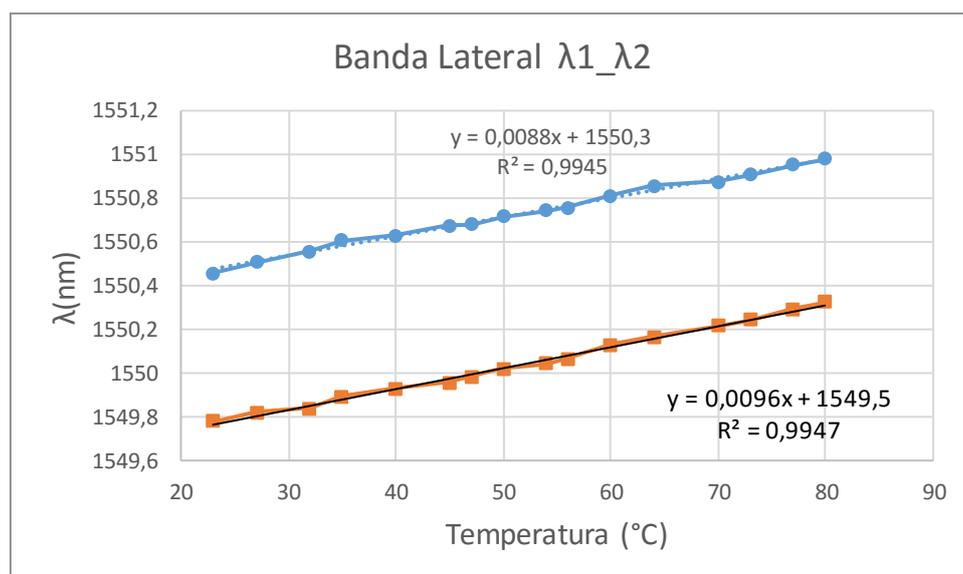


Figura 3.56. Evolución de las bandas laterales de los láseres centrados en 1549.7 nm y en 1550.4 nm en función de la temperatura

Para el caso de las bandas laterales y como se puede apreciar en la figura anterior, las sensibilidades medidas fueron de 8.8pm/°C y 9.6pm/°C.

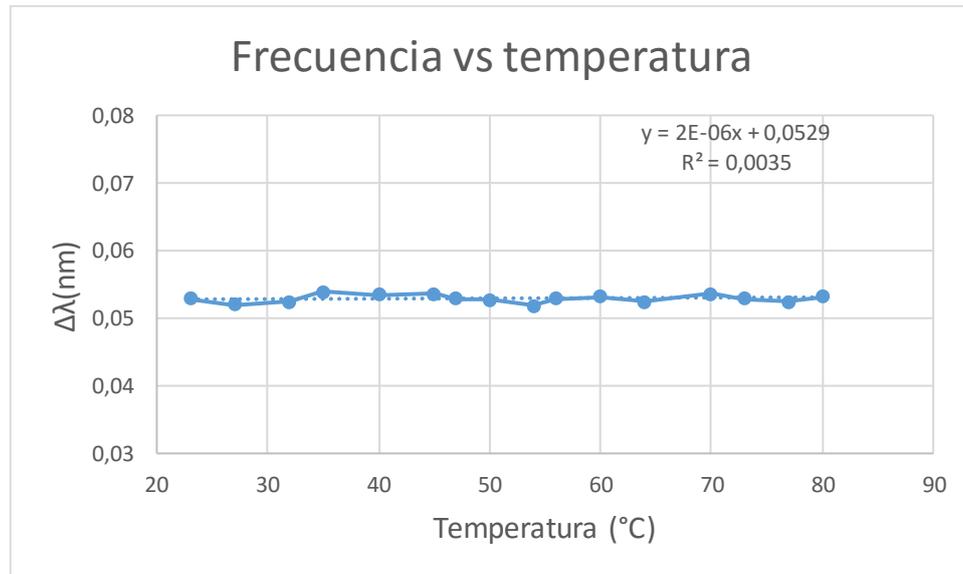


Figura 3.57. Representación de la distancia entre la portadora y las bandas laterales frente a la temperatura

En esta gráfica se muestra como la distancia entre la portadora y la banda lateral se mantiene prácticamente constante a pesar de las variaciones de temperatura. Esto indica que la frecuencia de modulación permanece constante durante todo el proceso de medida.



Conclusiones

En este trabajo fin de grado se ha realizado un estudio sobre el comportamiento de los modos dentro de un láser de fibra óptica. Para ello se ha empleado una estructura en anillo con 3 tipos diferentes de fibra óptica dopada con erbio. Tras la realización de este primer experimento se determina cuál de las fibras ópticas analizadas hace que el láser generado tenga un menor número de modos longitudinales.

En los siguientes apartados del proceso experimental se introduce un modulador. Tanto para estructuras en anillo como para estructuras con circuladores en paralelo se estudia un conversor en longitud de onda basado en un láser de fibra óptica para un rango de frecuencias que va desde los 4 GHz hasta los 20 GHz. En el caso que se tengan dos láseres, uno de ellos es modulado por el modulador (PowerLog™ AM-20; AM-40 o PowerBit™ F-10), mientras que el otro consigue esa misma modulación a través de la competición de modos que existe en el sistema. Se ha conseguido demostrar no sólo para una longitud de onda sino también para dos.

Poder demostrar este fenómeno supone un ahorro económico considerable, puesto que el precio de los moduladores es alto. Por cada longitud de onda que se añade evitamos colocar un modulador, reduciéndose el presupuesto del montaje notablemente.

Uno de los aspectos que más se ha tenido en cuenta es el control de la polarización, que afecta al sistema cuando se produce modulación. Este control se ha realizado manualmente mediante un controlador de polarización (Anexo B).

El último apartado se basa en el estudio experimental de un conversor de longitudes de onda y su aplicación como sensor de temperatura de mayor precisión. En este montaje se hace uso de una cámara climática. En ella se introducen 1 o 2 FBGs dependiendo del número de longitudes de onda de estudio. Al aumentar gradualmente la temperatura dentro de la cámara climática, los láseres se desplazan en longitud de onda, así como las bandas laterales de cada láser, siendo ese desplazamiento constante con el incremento de temperatura.

En definitiva, este TFG se ha basado en un estudio experimental en el que el 90 % del tiempo se ha desarrollado en el laboratorio de investigación realizando medidas sobre diferentes montajes y el resto del tiempo se ha destinado a la búsqueda y lectura de artículos científicos, tratamiento de resultados y confección de esta memoria.



Bibliografía

- [1] Sergio Rota Rodrigo, "Desarrollo de estructuras avanzadas de fibra óptica para sensores y láseres". Proyecto fin de máster.
- [2] C. Jiang and L. Jin, "Optimization of multiple active ion doped fiber amplifiers for three communication windows," *Research Letters in Optics*, vol. 2009, 2009.
- [3] Isidoro Ibáñez Labiano, "Desarrollo de estructuras avanzadas para láseres multilínea de fibra óptica". Proyecto Fin de Carrera.
- [4] Miguel López-Higuera, "Handbook of optical fiber sensing technology". 2002, John Willey and Sons.
- [5] Maicol Armando Galdámez González, "Criterios de selección para los amplificadores EDFA y RAMAN tipo Óptico-Óptico en DWDM". Trabajo de Graduación.
- [6] <http://fibraoptica.blog.tartanga.net>
- [7] <http://www.corning.com>
- [8] José Capmany, "Dispositivos de Comunicaciones Ópticas". Editorial Síntesis 1999.
- [9] José Capmany, F. J. Fraile-Peláez, J. Martí. "Fundamentos de comunicaciones Ópticas". Editorial Síntesis 1998.
- [10] Jaume Comellas Colomé, "Técnicas para minimizar la degradación provocada por la polarización en las comunicaciones por fibra óptica". Tesis Doctoral.
- [11] http://conocimientosiptelephony.blogspot.com.es/2010/03/investigacion-parcial-iii-anderson-j_1942.html
- [12] G. P. Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems". John Willey and Sons Inc., New York 2002.
- [13] Raúl Cuerno Oruña, "Estudio y análisis de láseres en fibra para su aplicación en LIDAR". Proyecto Fin de Carrera.
- [14] O'Shea, Callen and Rhodes, "An introduction to LASERS and their applications". Addison-Wesley publishing company 1978.
- [15] "LASERS". Anthony E. Siegman.
- [16] Svelto, "Principles of lasers". Plenum Press 1989 (Third edition).
- [17] Isabel Arias Tobalina, "El láser, la luz de nuestro tiempo" © 2010. ISBN: 978-84-92997-10-7, D. Legal: S.1657-2010 OSAL (Salamanca Student Chapter) Departamento de Física Aplicada. Universidad de Salamanca.
- [18] J. Franz and V. Jain, "Optical Communications Components and Systems". Editorial Narosa
- [19] N. Park, J. W. Dawson and K. J. Vahala, "Multiple wavelength operation of an erbium-doped fiber laser," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 4, pp. 540-541, 1992.
- [20] Rosa Ana Pérez Herrera, "Design and characterization of wavelength division multiplexed sensor systems using optical amplification". Tesis Doctoral, UPNA 2010.
- [21] https://www.rp-photonics.com/spatial_hole_burning.html
- [22] G. Luo, J.L. Zyskimd, J.A. Nagel and M.A. Ali, "Experimental and theoretical analysis of relaxation-oscillations and spectral hole burning effects in all-optical gain-clamped EDFA's for WDM networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, No. 4, 1998.
- [23] M. A. Quintela, R. A. Perez-Herrera, I. Canales, M. Fernández-Vallejo, M. Lopez-Amo and J. M. López-Higuera, "Stabilization of dual-wavelength erbium-doped fiber ring lasers by single-mode operation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, pp. 368-370, 2010.



- [24] H. L. An, X. Z. Lin, E. Y. B. Pun and H. D. Liu, "Multi-wavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter," *Opt. Commun.*, vol. 169, pp. 159-165, 1999.
- [25] R. A. Pérez-Herrera, M. A. Quintela, M. Fernández-Vallejo, A. Quintela, M. López-Amo and J. M. López-Higuera, "Stability comparison of two ring resonator structures for multiwavelength fiber lasers using highly doped Er-fibers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, pp. 2563-2569, 2009.
- [26] Cristian Andrés Triana-Infante, Margarita Varón-Durán y Daniel Pastor-Abellán, "Validación de sensores basados en redes de difracción de Bragg (FBGs) para deformación y temperatura".
- [27] http://personales.unican.es/perezvr/pdf/CH5ST_Web.pdf
- [28] M. Angeles Quintela, Rosa Ana Perez-Herrera, Irene Canales, Monserrat Fernández-Vallejo, Manuel Lopez-Amo, and José Miguel López-Higuera, "Stabilization of Dual-Wavelength Erbium-Doped Fiber Ring Lasers by Single-Mode Operation" *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 6, march 15, 2010.



Anexo A

LIEKKI™ Er30-4/125

Erbium Doped Fiber



LIEKKI™ Er30-4/125 fibers are highly doped erbium fibers designed for C- and L-band amplifiers, and ASE sources. These fibers are available as low cut-off fibers (Er30-4/125) and high cut-off fibers (Er30-4/125HC).

The high cut-off version has demonstrated the highest power conversion efficiency available in L-band: better than 50% for a typical fiber length of 20 m.

Applications

- C- and L-band DWDM, Metro and CATV
- ASE sources

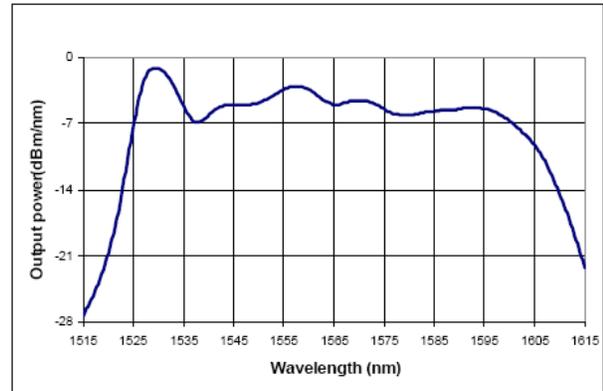
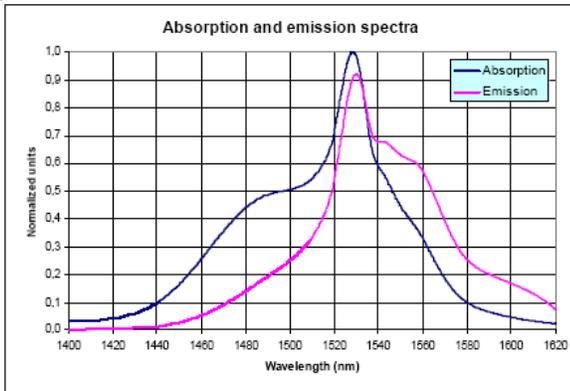
Features

- Excellent batch consistency of erbium peak absorption and spectral shape
- Very short fiber lengths reduces non-linear effects like FWM, SRS and SBS
- Wide and flat spectrum
- Low polarization mode dispersion, typical value <25 fs/m
- Low splice loss, LIEKKI™ EasySplice software for splicing parameters
- Suitable for both 980 nm and 1480 nm pumping
- Telcordia GR-1312-CORE Generic Requirements qualified
- Dual layer UV-cured acrylate coating

Typical device specification

		LIEKKI™ Er30-4/125	LIEKKI™ Er30-4/125HC
Optical			
Mode field diameter at 1550 nm	µm	6.5 ± 0.5	6.5 ± 0.5
Peak core absorption at 1530 nm	dB/m	30 ± 3	30 ± 3
Core numerical aperture (nominal)		(0.2)	(0.2)
Cut-off wavelength	nm	800 - 980	1000 - 1400
Geometrical and mechanical			
Core concentricity error	µm	< 0.7	< 0.7
Cladding diameter	µm	125 ± 2	125 ± 2
Cladding geometry		round	round
Coating diameter	µm	245 ± 15	245 ± 15
Coating material		high index acrylate	high index acrylate
Proof test	%	> 1	> 1

Typical performance data



Notice

nLIGHT continually improves its products to provide its customers with outstanding quality and reliability. nLIGHT may make changes to specifications and product descriptions at any time, without notice. In addition, nLIGHT offers a limited warranty to ensure customer satisfaction. For complete details, please contact your nLIGHT sales representative.

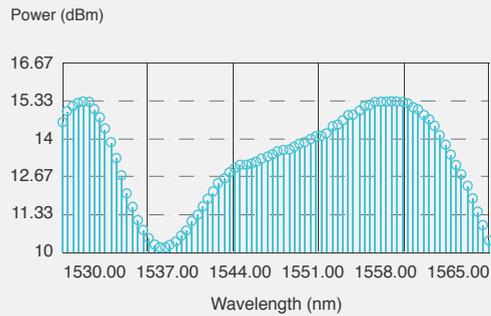
Erbium Doped Fiber IsoGain™

Erbium Doped Fibers for High Channel-Count DWDM Systems

- Optimised core-composition for high-channel-count DWDM systems' EDFAs
- Class-leading conversion efficiency
- Suitable for C and L-band amplifiers

Typical applications:

- EDFAs / Telecoms
- Fiber Lasers
- Biomedical Illumination
- Optical Coherence Tomography (OCT)



- ASE Light Sources
 - Gyros
 - Current Sensors
 - Distributed Sensor Systems

Specifications

High Efficiency C-Band Erbium Doped Fibers

	I-4(980/125)	I-4(980/125)HC	I-6 (980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	870 - 970	1000 - 1320	870 - 970
Numerical Aperture	0.22 - 0.24		
Mode Field Diameter (μm)	5.4 - 6.6 @1550nm	5.2 - 5.8 @1550nm	5.5 - 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	5.0 - 6.7 @1531nm	7.7 - 9.4 @1531nm	7.2 - 8.4 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100 kpsi)		
Attenuation (dB/km)	≤ 10 @1200nm		
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤ 0.005		
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1		
Core Concentricity (μm)	≤ 0.3		
Coating Diameter (μm)	245 ± 15		
Coating Type	Dual Acrylate		

L-Band and C-Band Erbium Doped Fibers

	I-12 (980/125)	I-12 (980/125)HC	I-15 (980/125)HC	I-25 (980/125)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 - 970	1200 - 1320	1200 - 1320	900 - 970
Numerical Aperture	0.21 - 0.23	0.23 - 0.26		
Mode Field Diameter (μm)	5.7 - 6.6 @1550nm	5.0 - 5.5 @1550nm	4.8 - 5.4 @1550nm	5.2 - 6.3 @1550nm
Absorption (dB/m)	14 - 21 @1531nm	17 - 21 @1531nm	27 - 33 @1531nm	35 - 45 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)			
Attenuation (dB/km)	≤ 10 @1200nm			
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤ 0.005			
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1			
Core Concentricity (μm)	≤ 0.3			
Coating Diameter (μm)	245 ± 15			
Coating Type	Dual Acrylate			

Reduced Cladding Erbium Doped Fiber For Mini and Micro EDFAs

	I-25H(1480/80)
Cut-Off Wavelength (nm)	900 - 1025
Numerical Aperture	≥ 0.30
Mode Field Diameter (μm)	3.8 - 4.7 @1550nm
Absorption (dB/m)	23 - 27 @1531nm
Proof Test (%)	1 (100kpsi)
Attenuation (dB/km)	≤ 30 @1200nm
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤ 0.005
Cladding Diameter (μm)	80 ± 1
Core Concentricity (μm)	≤ 0.5
Coating Diameter (μm)	160 ± 10
Coating Type	Dual Acrylate



Doped Fiber

VERSION: MD20/1
RELEASE DATE: 8 NOVEMBER 2013

Datasheet

Erbium Doped Fiber MetroGain™

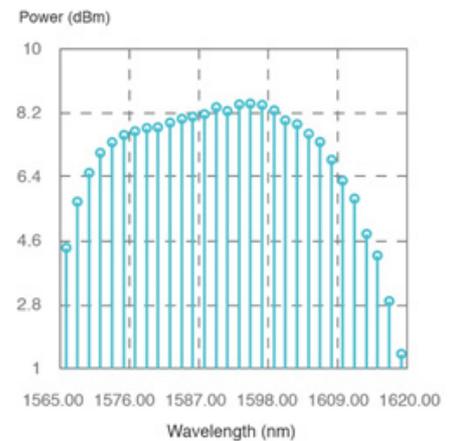
Fibercore's MetroGain™ range is designed for high efficiency 'Metro-style' Erbium Doped Fiber Amplifier (EDFA) configurations, single stage amplifiers, Amplified Spontaneous Emission (ASE) light sources and single channel or few channel EDFAs.

M-5(980/125) offers a relatively low level of doping to simplify EDFA manufacturing processes by reducing the sensitivity of the amplifier output to the precise gain length.

M-12(980/125) gives high absorption levels to allow short gain lengths and reduced material costs.

M-12(980/80) is an 80µm variant, benefitting from the higher absorption of the standard M-12(980/125) but allowing significantly longer mechanical lifetimes when used in small coil diameters, particularly important for small form factor EDFA designs such as mini EDFAs and micro EDFAs.

M-3(1480/125) is designed for pumping at 1480nm, accessing higher pump conversion efficiencies than pumping at 980nm.



Supported by Fibercore's **GainMaster™** simulation software

Advantages:

- High conversion efficiency
- High absorption variants available for short amplifiers and EDFAs
- 80µm variant for small coil diameter applications

Typical applications:

- Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFAs)
- Amplified Spontaneous Emission (ASE) light sources
- Single channel amplifiers
- Mini and micro EDFAs

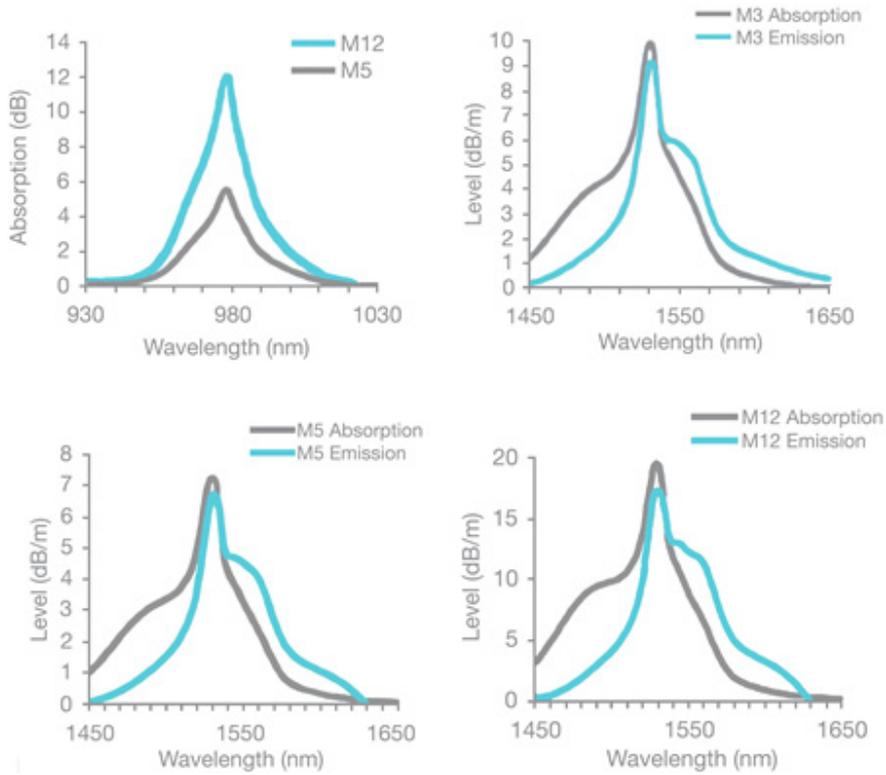
Related Products:

- Erbium Doped Fiber IsoGain™
- Dual-Clad Erbium/Ytterbium Doped Fiber (CP1500Y)
- GainMaster™ Simulation Tool

Product Variants:

- **M-3(1480/125)** Designed for single channel C-band amplifiers
- **M-5(980/125)** Designed for single channel C-band amplifiers
- **M-12(980/125)** Designed for short length single channel C-band amplifiers and L-band amplifiers
- **M-12(980/80)** Designed for small package size C-band and L-band amplifiers

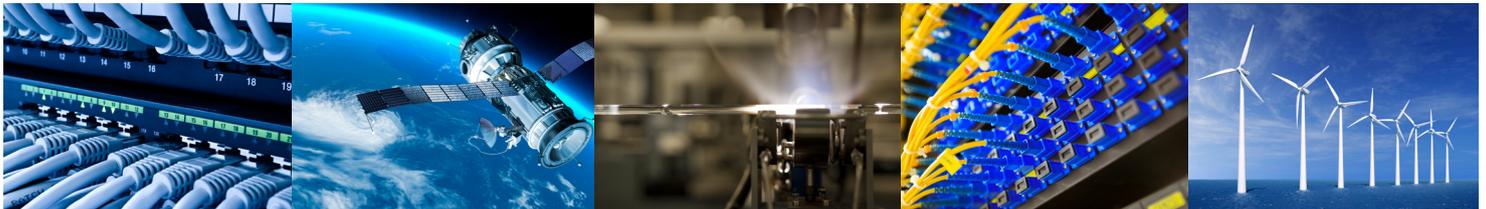
Typical Absorption and Emission Spectra



Specifications

	M-3(1480/125)	M-5(980/125)	M-12	
			(980/125)	(980/80)
Cut-Off Wavelength (nm)	1300 – 1450	900 - 970		
Numerical Aperture	0.21 - 0.24			
Mode Field Diameter (μm)	5.1 – 5.9 @1550nm	5.5 – 6.3 @1550nm	5.7 – 6.6 @1550nm	
Absorption (dB/m)	2.8 – 3.8 @1480nm 6.5 – 10.1 @1531nm	4.5 – 5.5 @980nm 5.4 – 7.1 @1531nm	11.0 – 13.0 @980nm 16.0 – 20.0 @1531nm	
Proof Test (%)	1 (100kpsi)			
Attenuation (dB/km)	≤10 @1200nm			
Polarization Mode Dispersion (ps/m)	≤0.005			
Cladding Diameter (μm)	125 ± 1		80 ± 1	
Core Concentricity (μm)	≤0.3			
Coating Diameter (μm)	245 ± 15		170 ± 10	
Coating Type	Dual Acrylate			

Visit fibercore.com/fiberpaedia for our encyclopedia of industry terms/knowledge base.





Anexo B

PowerLog™ AM-20; AM-40

20/40 GHz Intensity Modulators for Analog Applications

Features:

- Titanium In-Diffused Waveguides
- X-cut LiNbO₃
- Low Drive Voltage Compatible with Commercially Available Drivers
- Low Optical Insertion Loss
- 1300 nm Wavelength Range on Request
- Operating up to 60 GHz
- Smooth Frequency Response up to > 60 GHz
- Integrated Photodiode
- Integrated Polarizer

Applications:

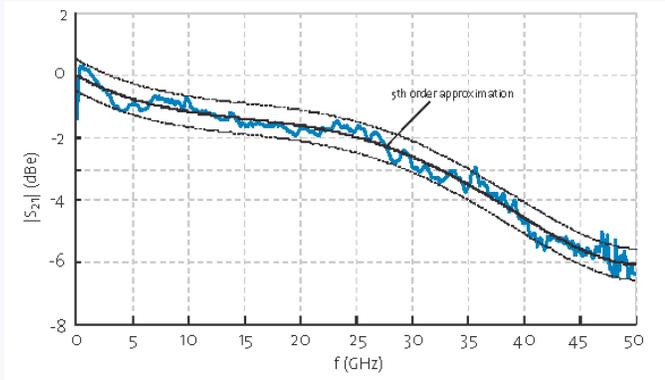
- Antenna Remoting
- High Frequency Fiber Optic Links
- Analog Microwave over Fiber (RoF)
- Delay Lines Telemetry Systems
- Instrumentation (Optical Network Analyzers)



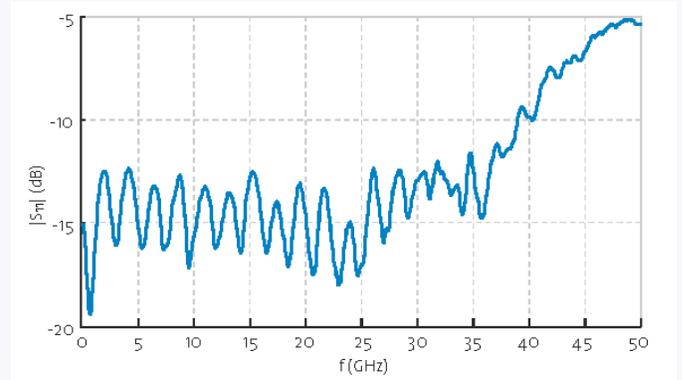
These high performance integrated optical modulators have been specifically designed to target the market of civil and military transmission. Oclaro broadband analog intensity modulators combine high linearity with low driving voltage and small footprint, covering all the frequency range from 20 to beyond 40 GHz (AM20: 20 – 30 GHz; AM40: > 30 GHz). A customized 1300 nm version is available on request. The increasing demand to shift the transmission frequency in microwave fiber optic links towards higher frequency finds in Oclaro analog modulators the most advanced and suitable answer. The experience and know-how of Oclaro engineers is available to customize our products to the customer's specific requirements.

Performance Characteristics

Electro Optical Response (40 GHz Example)



Electrical Return Loss (40 GHz Example)



Absolute Maximum Ratings

Parameters	Conditions	Min	Max	Unit
Maximum Input Power (Electrical)	RF Port		25	dBm
Maximum Input Power (Optical)			100	mW
Maximum Operating Temperature Variation Rate	CW		1	°C/min
Storage Temperature Range		-40	+85	°C
Operating Temperature Range		0	+70	°C

Specifications

Parameters	Units	
Optical		
Operating Wavelength Range	1280 – 1340 (detailed specifications to be agreed)	1525 – 1615
Insertion Loss	< 6	< 4.5
Optical Return Loss (without connectors)	≥ 45	≥ 45
Extinction Ratio	> 20	> 20
Electrical		
S ₂₁ Electro Optic Bandwidth (-3 dBe)	> 20/> 30	> 20/> 30
S ₁₁ Electrical Return Loss	< -10	< -10
RF V Voltage (@ 1 kHz)	4.5	5
Bias V Voltage (@ 1 kHz)	5.0	5.5
2nd Harmonic Suppression	45	45
Photodiode Responsivity	10 ⁻³	10 ⁻³
Linearity	± 10%	± 10%

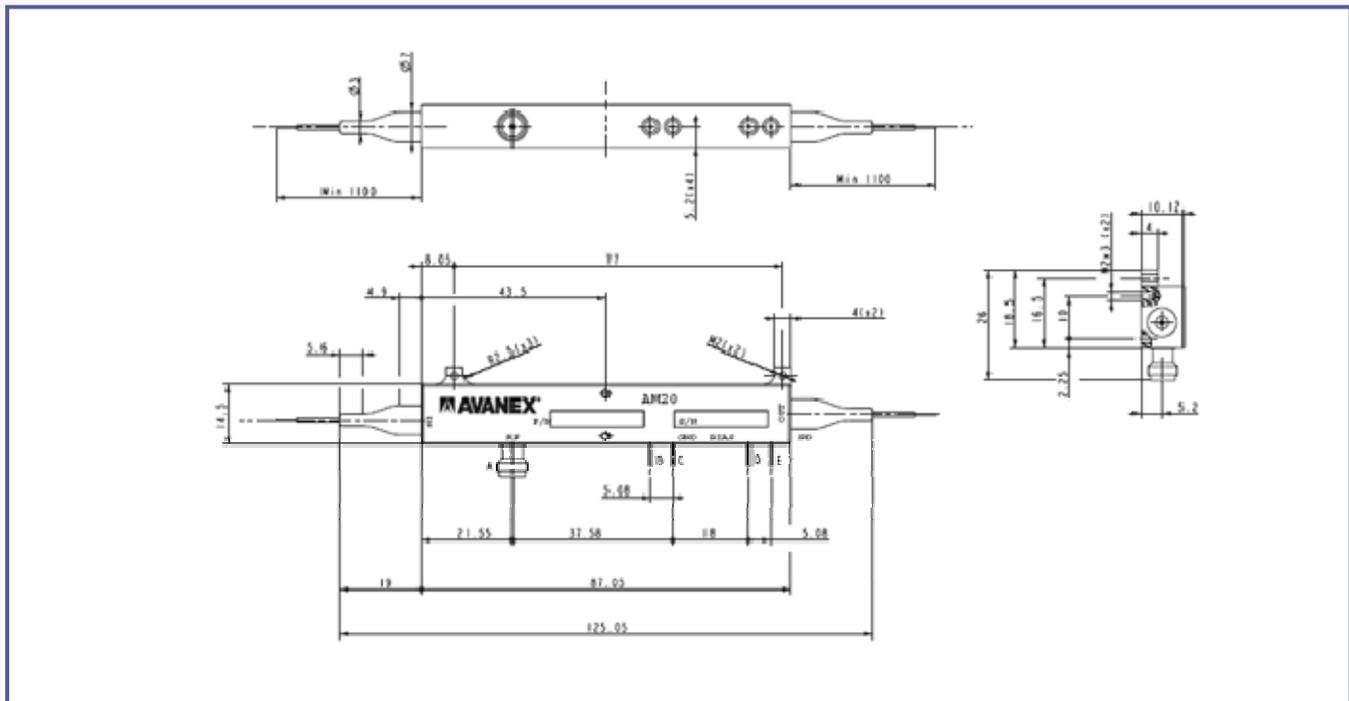
Pin-Out and Fiber Specifications

RF Connector	V-Connector 1 for 20 GHz and 40 GHz (GPPO available)
Bias Connector	LEAD Pins
Input Fiber	Corning/Fujikura SM 15 PUV/UV250 (Panda Fiber)
Output Fiber	Corning/Fujikura SM 15 PUV/UV250 (Panda Fiber)
	Other fibers available on request

Note 1. V-Connector is a registered trademark of Anritsu Corporation.

Package Footprint

AM20 (AM40 is equivalent)



Dimensions are in mm.

Pin #	Description
A	RF INPUT
B	GROUND
C	BIAS
D	PHOTODIODE CATHODE
E	PHOTODIODE ANODE

Ordering Information

Part Number
AMbb-0-bbP-PP-yyzz-00

bb	Bandwidth	20 = 20 GHz
		40 = 40 GHz
yy, zz	Input and Output Optical Connectors	NC = No Connectors
		FP=FC/SPC; FA=FC/APC; SP=SC/APC etc.

Other connectors are available upon request.

Contact Information

Worldwide Headquarters

2584 Junction Avenue
San Jose
CA 95134
USA

Tel: +1 408 919 1500
Fax: +1 408 919 1501

www.oclaro.com
sales@oclaro.com

Important Notice

Performance figures, data and any illustrative material provided in this data sheet are typical and must be specifically confirmed in writing by Oclaro before they become applicable to any particular order or contract. In accordance with the Oclaro policy of continuous improvement specifications may change without notice. The publication of information in this data sheet does not imply freedom from patent or other protective rights of Oclaro or others. Further details are available from any Oclaro sales representative.

D2801 PowerLog AM-20, AM-40 Version 1.1 September 2009

©Oclaro 2009. Oclaro the Oclaro, Inc. logo, and all other Oclaro, Inc product names and slogans are trademarks or registered trademarks of Oclaro, Inc. in the U.S.A. or other countries. Products described in this datasheet may be covered by one or more patents in the U.S.A. and abroad. Information in this datasheet is subject to change without notice.

FEATURES

- Very Low Drive Voltage
- Standard “F”-type Footprint for 4” MSA
- C and L-Band Operation
- Enhanced E/O Bandwidth for up to 12.5 Gb/s Modulation Speed
- Low Insertion Loss
- High Extinction Ratio
- Integrated Monitor Photodiode
- Available with Fixed Chirp

APPLICATIONS

- External Intensity Modulation from 10 Gb/s to 12.5 Gb/s NRZ and Electrical RZ
- SDH/SONET-DWDM Systems
- Long Reach 10 Gb/s MSA Transponders

Avanex intensity modulators are based on the Mach-Zehnder Interferometer architecture. They are manufactured using the highly reliable Titanium indiffusion technology in x-cut, y-propagating Lithium Niobate substrates. This 10 Gb/s - 12.5 Gb/s Modulator is designed for high bit rate advanced Metro to Long Haul communication systems that require the superior performance of x-cut Lithium Niobate. Exceptionally low drive voltage enables low power consumption reducing the overall transmitter cost. A small footprint and low profile makes the modulator compatible with the 10 Gb/s MSA Transponder standard. A single Tx board design can accommodate either the zero-chirp or the fixed chirp modulator version. Suitable driver amplifiers are available through Avanex recommended partners.

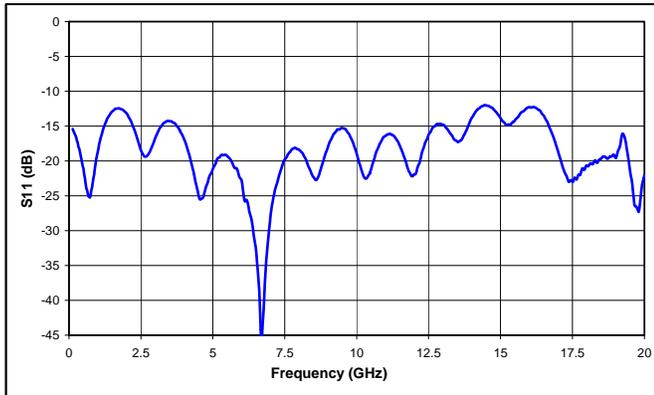


CONTENTS

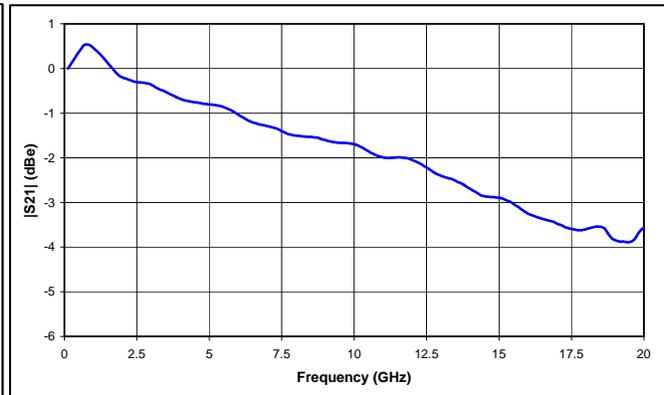
Description	1
Features	1
Applications	1
Performance Characteristics	2
Absolute Maximum Ratings.....	2
Specifications.....	3
Connector and Fiber Specifications	3
Ordering Information.....	3
Package Footprint.....	4
Pin-Out.....	4

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

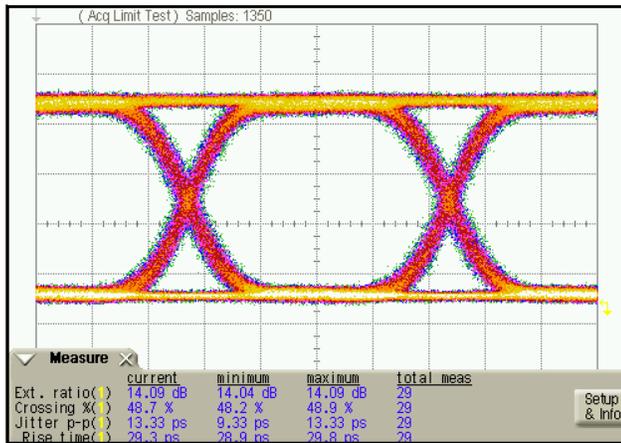
Electro Optical Response



Electrical Return Loss



Eye Diagram



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Parameter	Conditions	Min	Max	Unit
Maximum Input Power (Electrical)	RF-Port / AC Coupled		25	dBm
Maximum Input Power (Optical)	CW		100	mW
Maximum Operating Temperature Variation Rate			1	°C/min
Storage Temperature Range		-40	+85	°C
Operating Temperature Range		0	+70	°C

SPECIFICATIONS

Parameters		Units
Optical		
Operating Wavelength Range	C and L-Band	
Insertion Loss	3.5	dB
Extinction Ratio (DC)	≥ 20	dB
Chirp (Fixed chirp version)	See PowerBit™ F-10C Data Sheet	
Optical Return Loss (without connectors)	≥ 45	dB
Electrical		
S ₂₁ Electro Optical Bandwidth (-3 dB)	12.5	GHz
S ₁₁ Electrical Return Loss	≤ -10	dB
RF V _π Voltage (@ 1 kHz)	3.8	V
Bias V _π Voltage (@ 1 kHz)	5.0	V
PRBS Electrical Drive Voltage (V _{amp})	4	V
Dynamic Extinction Ratio	14	dB
Photodiode Responsivity (referred to output power)	≥ 10 ⁻³	AW
Linearity	± 10%	

Where not specified, parameters are measured at 25°C.

CONNECTOR AND FIBER SPECIFICATIONS

RF Connector	GPO
Bias and PD Connector	Lead Pins
Input Fiber	Corning/Fujikura SM15P UV/UV400
Output Fiber	Corning SMF-28™ 1

Note 1. Other output fibers available upon request.

ORDERING INFORMATION

0-Chirp: F10-0-13P-Px-yyzz-01

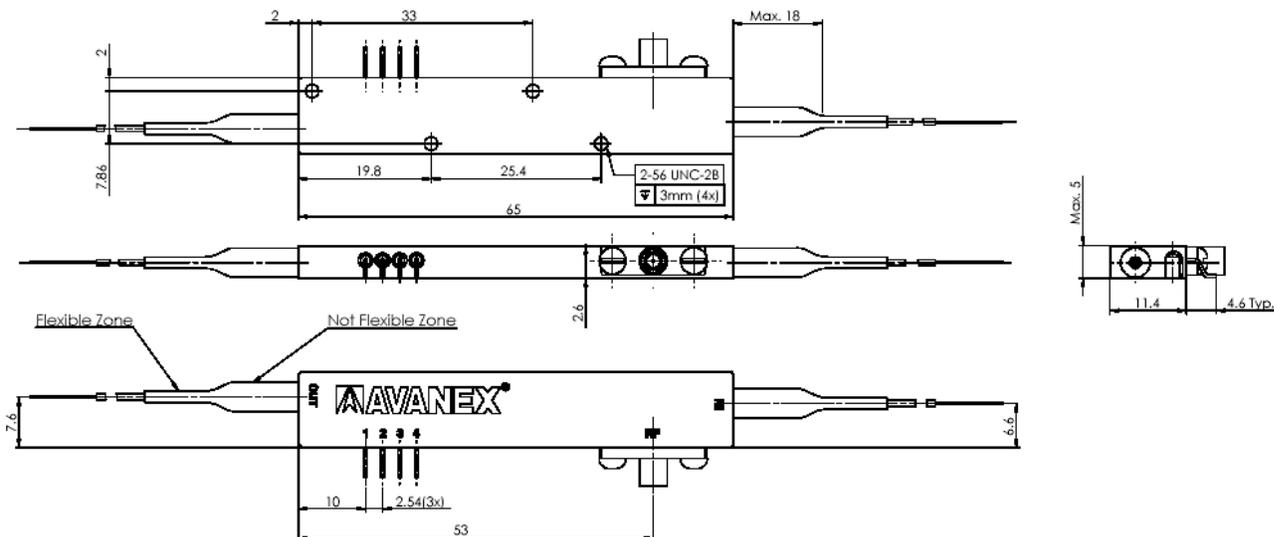
Pre-Chirped : See dedicated data sheets or ask for further information

yy; zz	Input; Output Connectors	NC = No Connectors FP = FC/PC FA = FC/APC SP = SC/PC SA = SC/APC	Other connector s available upon request; all connectors on PM fiber are polarization maintaining
x	Output Fiber	S = SMF, P= PMF	

PowerBit™ F-10

10 - 12.5 Gb/s Intensity Modulator with Low Drive Voltage **AVANEX®**

PACKAGE FOOTPRINT



PIN-OUT

Pin #	Sym	Description
1	PD	Photodiode Cathode
2	PD	Photodiode Anode
3	B	Bias
4	G	Ground
5	RF	RF Input (GPO Male)

Performance figures contained in this document must be specifically confirmed in writing by Avonex before they become applicable to any particular order or contract. Avonex reserves the right to make changes to the products or information contained herein without notice.

For additional information, contact your Avonex Account Manager or request information through our website at:

<http://www.avonex.com/contactus/requestinfo.aspx>



www.avonex.com

Nasdaq: AVNX

40919 Encyclopedia Circle Fremont, CA 94538 USA • Telephone 510-897-4188 • Fax 510-897-4189
©2005 Avonex Corporation. Actual data will vary according to the specific product and the specific application.



Oficinas centrales y
 Fábrica de equipos
 Fco. Oliván Bayle, 4
 50015 Zaragoza (España)
 Tel. +34 976 20 36 36
 Fax +34 976 20 09 96
 e-mail: telnet@telnet-ri.es
www.telnet-ri.es

Fábrica de cable de fibra óptica
 Polígono Industrial Centrovía
 Buenos Aires, 93. Nave 116
 50196 La Muela. Zaragoza
 (España)
 Tel. +34 976 14 47 04
 Fax +34 976 14 45 14
 e-mail: cables@telnet-ri.es
www.telnet-ri.es

LABFOT100256

INSPECTION SHEET

DEVICE INFORMATION

PRODUCT NAME	WIC 2x2			
CLASS	NA	ATTENUATION	NA	TYPE <input checked="" type="checkbox"/> SM <input type="checkbox"/> MM
CONNECTORS	2 FC/APC - 2 FC/APC			
COUPLER TYPE	2x2 - 1310/1550 nm		COUPLING RATE	50:50
OPERATING WAVELENGTH (nm)	1310±40nm/1550±40nm		SERIAL NUMBER	04A007969
FILTER	PASS BAND BANDWIDTH (nm)	NA	STOP BAND BANDWIDTH (nm)	NA

INSPECTION VALUES

TEST DATE	10-mar-05	INSERTION LOSS (dB)	See table
ISOLATION (dB)	NA	DIRECTIVITY (dB)	> 55
RETURN LOSS (dB)	>60	POLARIZATION STABILITY (dB)	< 0.15
THERMAL STABILITY (dB)	< 0.2	OPERATION TEMPERATURE (°C)	- 40 to 85

	INSERTION LOSS (dB)			1310nm	1550nm
	DEVICE No.	BRANCH	COUPLING	I.L. (Max)	I.L. (Max)
WIC	A	1	50%	3.87	3.56
		2	50%	3.42	3.57
	B	1	50%	3.64	3.67
		2	50%	3.47	3.33

Nota: Por cada conector se consideran 0.3 dB de pérdidas de inserción

APPROVED _____

INSPECTION SHEET

DEVICE INFORMATION

PRODUCT NAME	WIC 2x2				
CLASS	NA	ATTENUATION	NA	TYPE	<input checked="" type="checkbox"/> SM <input type="checkbox"/> MM
CONNECTORS	2 FC/APC - 2 FC/APC				
COUPLER TYPE	2x2 - 1310/1550 nm		COUPLING RATE	50:50	
OPERATING WAVELENGTH (nm)	1310±40nm/1550±40nm		SERIAL NUMBER	04A007970	
FILTER	PASS BAND BANDWIDTH (nm)	NA	STOP BAND BANDWIDTH (nm)	NA	

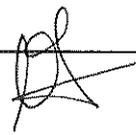
INSPECTION VALUES

TEST DATE	10-mar-05	INSERTION LOSS (dB)	See table
ISOLATION (dB)	NA	DIRECTIVITY (dB)	> 55
RETURN LOSS (dB)	>60	POLARIZATION STABILITY (dB)	< 0.15
THERMAL STABILITY (dB)	< 0.2	OPERATION TEMPERATURE (°C)	- 40 to 85

	INSERTION LOSS (dB)			1310nm	1550nm
	DEVICE No.	BRANCH	COUPLING	I.L. (Max)	I.L. (Max)
WIC	A	1	50%	3.53	3.38
		2	50%	3.25	3.33
	B	1	50%	3.97	3.90
		2	50%	3.99	3.88

Nota: Por cada conector se consideran 0.3 dB de pérdidas de inserción

APPROVED _____



Assembly instructions for the Fiberlogix Polarization Controllers

Using 900 μ m buffered fiber for a design wavelength of 1550 nm.

- Remove rubber-holding clamps A, B and C.
- Tighten screws 1,2,3 and 4.
- Loosen screws 5 and 6.

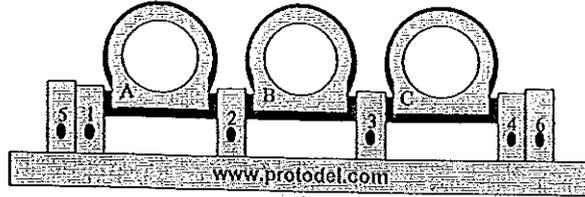


Figure 1 Front view of polarization controller.

- Rotate controller waveplates A, B and C to the front as far as possible as shown in Figure 2 and Figure 3.

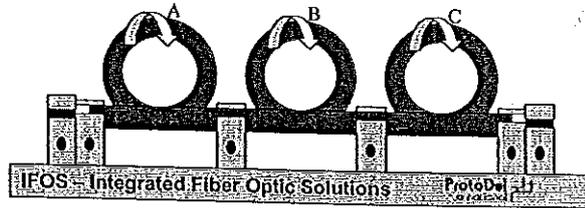


Figure 2 Back view.

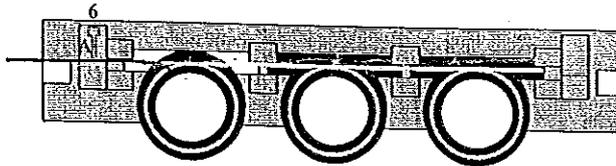


Figure 3 Top view.

Fitting the fiber.

- Untwist a length of at least 1m of single mode fiber.
- Place fiber end under fiber clamp A. Press down on clamp A and tighten screw 6.
- Place fiber in groove on waveplate. For $\frac{1}{4}$ wave plate wind two turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

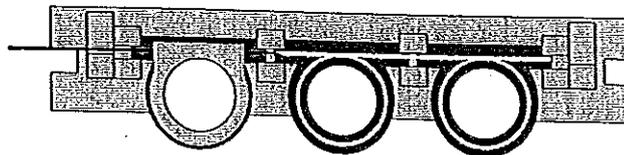


Figure 4 Fit first fiber waveplate.

- Place fiber in groove on waveplate. For $\frac{1}{2}$ wave plate wind three turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

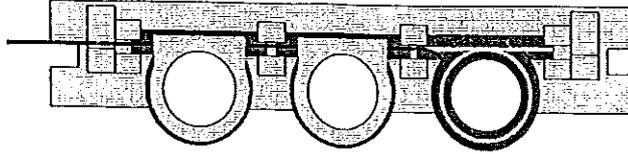


Figure 5 Fit second fiber waveplate.

- Place fiber in groove on waveplate. For $\frac{1}{4}$ wave plate wind two turns of fiber in waveplate groove. Make sure that there is no twist in fiber.
- Replace rubber-holding clamp.

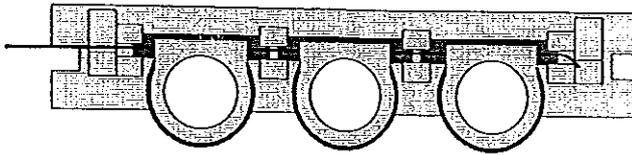


Figure 6 Fit third waveplate fiber.

- Place fiber under clamp B. Press down on clamp B and tighten screw 5.

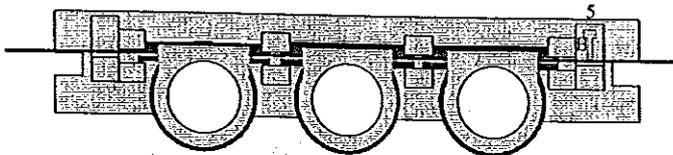


Figure 7 Clamp fiber tall.

Polarization controller response

- By rotating the $\frac{1}{4}$ and $\frac{1}{2}$ wave plates thru 180 the following polarization rotations should be obtained.

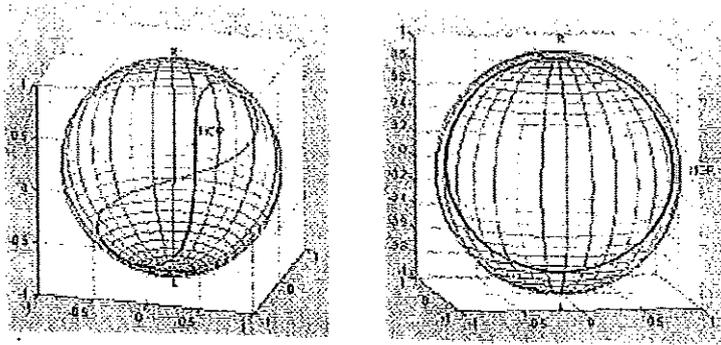


Figure 8(a) $\frac{1}{4}$ waveplate polarization behaviour. (b) $\frac{1}{2}$ waveplate polarization behaviour.

WDM Coupler 980/1550nm

oeMarket.com

PN: WDMC-915-P-1-FA

SN: A130065821

Date: 7 May 2013

Parameters	Test Data
Operating Wavelength (nm)	980/1550
Insertion Loss (dB) at 980nm	0.40
Isolation (dB) at 980nm	24.6
Insertion Loss (dB) at 1550nm	0.34
Isolation (dB) at 1550nm	27.8
Directivity (dB)	>55
PDL (dB)	0.03
Fiber Type / Length (m)	OFS 980 Fiber / 1.0
Connector Type	None
Operating Temperature (°C)	-20~+70

