

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

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**ESTUDIO DE UNA TÉCNICA ÓPTICA DE
FILTRADO PARA TRANSMISIÓN DE
SEÑALES DE RF Y MICROONDAS.**

**(Study of an optical filtering technique for
transmission of RF and Microwave Signals)**

Para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

**Autor: Fernando Morón Morón
Noviembre 2015**

**INGENIERÍA TÉCNICA DE TELECOMUNICACIÓN
CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA**

Realizado por: D. Fernando Morón Morón
Directora del PFC: Dña. M^a Ángeles Quintela Incera
Codirector del PFC:

Título: *“Estudio de una técnica óptica de filtrado para transmisión de señales de RF y microondas”*

Title: *“Study of an optical filtering technique for transmission of RF and Microwave Signals”*

Presentado a examen el día: 6 de Noviembre de 2015

para acceder al Título de

INGENIERO TÉCNICO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):	D. Antonio Quintela Incera.
Secretario (Apellidos, Nombre):	Dña. María Angeles Quintela Incera.
Vocal (Apellidos, Nombre):	D. Adolfo Cobo García.

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera N°
(a asignar por Secretaría)

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi directora de Proyecto Marian, por la paciencia que ha tenido conmigo, por sus consejos, por haber hecho posible que acabara (a mí me parecía imposible).

Gracias también a mi amigo Javier Arozamena, siempre me ha ayudado a encontrar el camino cuando estaba perdido, y a vencer las ganas de “huir...” antes de entrar a los exámenes.

Gracias a mi amigo Pablo Gutiérrez y David Rojo, me enseñaron a no dar nada por perdido y a luchar un examen sin estudiar (mejor no mencionar la nota).

Gracias a toda la gente que ha pasado por mi vida en estos años de carrera y que me es imposible mencionar, de todos he intentado aprender algo aunque les haya superado siempre en edad.

Al Dr. Gutiérrez Morlote, *“por fin acabé Jesús”...*

Gracias a mi familia, en especial a mi madre, que aunque desde la distancia siempre me han apoyado, a mi hermana Isabel que aunque ya no está entre nosotros me gustaría dedicarle este proyecto.

... y a la persona a la que nunca le podré devolver el tiempo que he dedicado a estudiar esta carrera y a la que, si no hubiera estado a mi lado no hubiera llegado hasta aquí, ***“BELÉN mi más sincera gratitud”***.

Cuando te encuentres de camino a Ítaca,
desea que sea largo el camino,
lleno de aventuras, lleno de conocimientos.
A los Lestrigones y a los Cíclopes,
al enojado Poseidón no temas,
tales en tu camino nunca encontrarás,
si mantienes tu pensamiento elevado, y selecta
emoción tu espíritu y tu cuerpo tiente.
A los Lestrigones y a los Cíclopes,
al fiero Poseidón no encontrarás,
si no los llevas dentro de tu alma,
si tu alma no los coloca ante ti.

Desea que sea largo el camino.
Que sean muchas las mañanas estivales
en que con qué alegría, con qué gozo
arribes a puertos nunca antes vistos,
deténte en los emporios fenicios,
y adquiere mercancías preciosas,
nácares y corales, ámbar y ébano,
y perfumes sensuales de todo tipo,
cuántos más perfumes sensuales puedas,
ve a ciudades de Egipto, a muchas,
aprende y aprende de los instruidos.

Ten siempre en tu mente a Ítaca.
La llegada allí es tu destino.
Pero no apresures tu viaje en absoluto.
Mejor que dure muchos años,
y ya anciano recales en la isla,
rico con cuanto ganaste en el camino,
sin esperar que te dé riquezas Ítaca.

Ítaca te dio el bello viaje.
Sin ella no habrías emprendido el camino.
Pero no tiene más que darte.

Y si pobre la encuentras, Ítaca no te engañó.
Así sabio como te hiciste, con tanta experiencia,
comprenderás ya qué significan las Ítacas.

CONSTANTINO CAVAFIS

INDICE

1. INTRODUCCIÓN

1.1	MOTIVACIÓN	7
1.2	ESTADO DEL ARTE	8
1.3	OBJETIVOS	14

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS:

2.1	CONCEPTO DE RED DE DIFRACCIÓN	16
2.2	REDES DE DIFRACCIÓN UNIFORMES	18
2.3	SIMULACIÓN DE LAS RDFOS UNIFORMES	22
2.4	SOLAPAMIENTO DE DOS RDFOS UNIFORMES.....	24
2.5	REDES DE DIFRACCIÓN UNIFORMES CON CAMBIO DE FASE	26
2.6	GRABADO DE LA RDFO.....	28

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS:

DESPLAZAMIENTO DE DOS RDFOS

3.1	ESPECTRO DE UNA RDFO CON RESPECTO A LA LONGITUD DE LA RED	36
3.2	ESPECTRO DE UNA RDFO PARA DIFERENTES CONSTANTES DE ACOPLO	37
3.3	SIMULACIÓN DEL ÍNDICE DE MODULACIÓN MÁXIMO ADMISIBLE	38
3.4	VISIBILIDAD	39
3.5	SIMULACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL ANCHO DE BANDA DE LA RED	42
3.6	SIMULACIÓN DEL BW CON RESPECTO AL DESPLAZAMIENTO DE LAS DOS RDFOS.....	44

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS:

TÉCNICA DE CAMBIO DE FASE

4.1	RDFO CON CAMBIO DE FASE	58
4.2	SIMULACIÓN DEL BW CON RESPECTO A LA VISIBILIDAD Y LONGITUD	59
4.3	RDFO CON CAMBIO DE FASE $\pi/2$ Y $3\pi/2$	61
4.4	RDFO CON CAMBIO DE FASE π	64

5. CONCLUSIONES:

LÍNEAS FUTURAS

5.1	CONCLUSIONES	68
5.2	LÍNEAS FUTURAS	68

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
----------------------------------	----

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1 Motivación

Las señales de radiofrecuencia y microondas tienen hoy en día un gran campo de aplicación y son ampliamente utilizadas en sistemas de comunicaciones, radares, distintos tipos de instrumentación, captura de imágenes, etc... Las limitaciones existentes dentro de los sistemas eléctricos utilizados para la generación y transmisión en altas frecuencias y con elevados anchos de banda ha propiciado el avance del tratamiento de estas señales en el dominio óptico.

Los sistemas de comunicaciones ópticas presentan hoy en día gran interés tecnológico por la posibilidad de transmitir y/o distribuir información a través de canales de fibra óptica de corta o larga distancia. Estos sistemas permiten la transmisión de paquetes completos de señales que provienen de enlaces de microondas, satélites, radiotelescopios, etc... aprovechando las ventajas de este medio de transmisión.

La tendencia actual en estos sistemas es la implantación de redes de telecomunicación todo fibra en las que se pretende conseguir una transparencia óptica total entre origen y destino.

Es dentro de este contexto donde los distintos métodos de filtrado fotónico cobran especial relevancia redundando en una mayor capacidad de integración de los Sistemas de Comunicaciones Ópticas, con un menor tamaño y peso, lo que supondría un coste más reducido de estos sistemas.

La Fotónica de Microondas ha ido evolucionando de forma continua a lo largo de los últimos años con respecto a la generación y procesado de este tipo de señales, de igual manera el filtrado en el dominio óptico ha ido evolucionando intentando superar las limitaciones en el dominio eléctrico.

El Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria ha enfocado numerosas investigaciones en el filtrado óptico, siendo por ello un grupo con capacidad y amplia experiencia en fabricación y desarrollo de sistemas basados en las Redes de Difracción en Fibra Óptica, en vista de esto se considera que la técnica de filtrado mediante redes de difracción puede ser óptima, de ahí que el objetivo de este proyecto sea estudiar la viabilidad del empleo de redes de difracción para el diseño de los filtros.

1.2 Estado del arte

La Fotónica de Microondas es la disciplina que estudia la interacción entre las microondas y los campos ópticos. Las diferentes áreas de trabajo que abarca la Fotónica de Microondas se centran en el procesado, generación, control y distribución de señales de microondas [1]. Se puede definir un filtro fotónico de microondas como una estructura fotónica cuyo objetivo es realizar la misma función que un filtro de microondas ordinario dentro de un sistema de RF, utilizando dispositivos ópticos [2].

Las ventajas inherentes que conlleva utilizar el dominio óptico como son la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas, baja dispersión, bajas pérdidas (0.2 dB/km de atenuación en 3ª ventana) junto con tamaño, peso y costes reducidos han favorecido la proliferación de sistemas de generación de señales de microondas con filtros fotónicos que aportan funcionalidades frente al dominio eléctrico.

Dentro del filtrado fotónico las Redes de Difracción en Fibra Óptica (RDFO) han evolucionado a lo largo de los últimos años desde prototipos de laboratorio hasta el ámbito comercial. Esto ha sido posible gracias a la combinación de esfuerzos llevados a cabo por múltiples investigadores a lo largo del mundo, al desarrollo de las técnicas de fabricación y al encaje en potenciales aplicaciones donde pueden ser utilizadas [3].

Una de las primeras aplicaciones que despertó el interés de los investigadores ha sido la posibilidad de usar la Fotónica de Microondas para implementar filtros flexibles para generación y procesado de señales en sistemas de RF [2].

La figura 1. Describe un esquema general de generación de una señal de RF con procesamiento óptico de la señal.

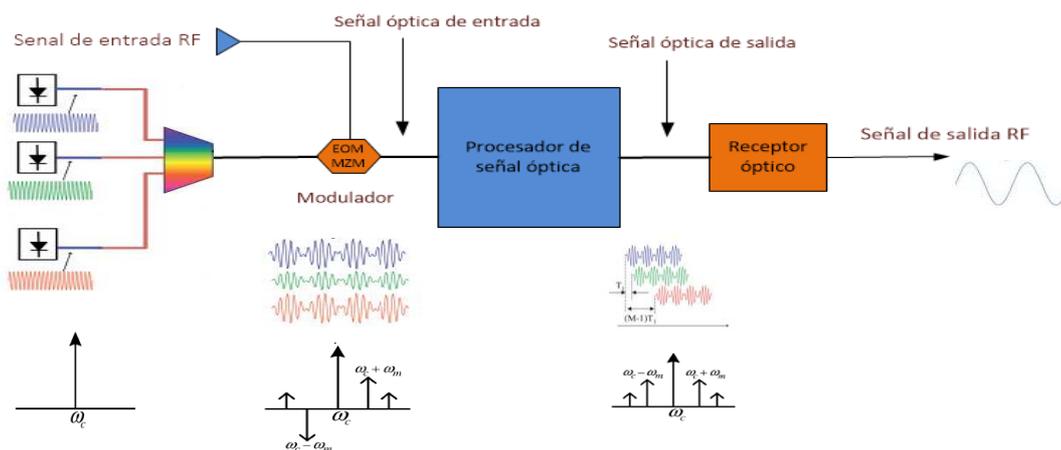


Figura 1.1: Esquema general de filtrado óptico de una señal de RF.

Las ventajas de usar filtros fotónicos de microondas han sido descritas ampliamente en varias referencias en la literatura. Estos filtros se encuentran

presentes en sistemas de radares de tierra que utilizan el efecto Doppler para detectar objetos en movimiento, dicho efecto produce un cambio en la frecuencia de emisión que es proporcional a la velocidad del objeto. El hecho de que la señal de RF recibida por el radar module una portadora óptica y sea procesada por un filtro óptico hace más simple y menos costoso el sistema frente a los enfoques en el dominio eléctrico. La Radioastronomía es otras de las áreas donde resulta de interés el filtrado óptico ya que es muy importante filtrar las interferencias de señales producida por el hombre con respecto a las bandas de frecuencias astronómicas. Otro de los entornos donde los filtros fotónicos de microondas son de interés se encuentra en las redes inalámbricas de área local (WLAN) o los sistemas de comunicaciones para móviles (UMTS). La tecnología radio sobre fibra (RoF) ha habilitado la posibilidad de distribuir señales de RF desde una estación central hacia antenas remotas (RAUs) utilizando para su transmisión fibra óptica. El hecho de que estas señales sean procesadas desde una estación posibilita compartir los recursos para el procesamiento de las señales simplificando los sistemas y su mantenimiento.

El uso de la fibra como medio para generar líneas de retardo óptico para procesamiento de señales de RF fue propuesto por Wilner y Van der Heuvel en 1976 [4].

Las líneas de retardo óptico tienen numerosas ventajas entre las cuales destacan las bajas pérdidas introducidas que son independientes de la señal de RF, las cuales pueden tener un retardo muy corto pudiendo generar señales por encima de los 100 Ghz, alto producto ancho de banda por tiempo, inmunidad a interferencias electromagnéticas y bajo peso.

En la figura 1.2 se muestra un esquema de un filtro fotónico de microondas basado en líneas de retardo. En este filtro basado en líneas de retardo de tiempo discreto, en los cuales una señal de entrada (RF), modula de forma directa o externa una portadora que proviene de una fuente óptica mediante un modulador electro-óptico (EOM). Una vez modulada se extraen varias muestras, o réplicas de la señal, utilizando acopladores $1 \times N$, y ponderando cada una de ellas en amplitud con un determinado valor. Se introduce un retardo entre cada muestra, que es múltiplo de un determinado tiempo base (T) característico del filtro y posteriormente son combinadas mediante un acoplador $N \times 1$, donde el campo óptico resultante viene determinado por los valores de ponderación aplicados a cada una de las muestras, obteniéndose de nuevo la señal mediante un fotodetector.

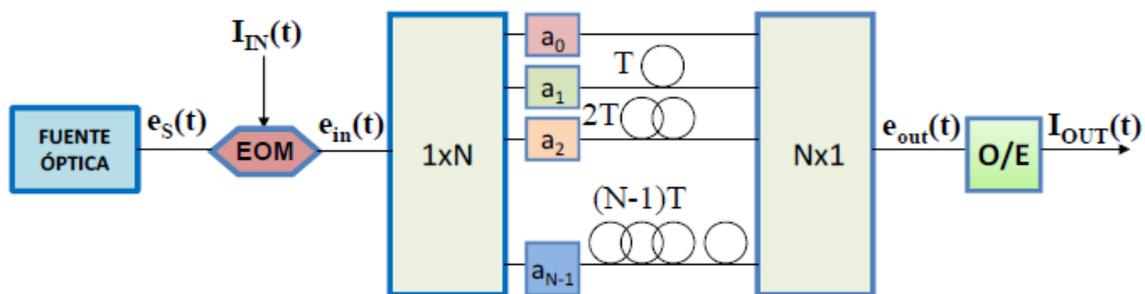


Figura 1.2 Esquema de un filtro fotónico de microondas basado en líneas de retardo.

En estos filtros se pretende conseguir una relación lineal entre la entrada y la salida caracterizada por la respuesta al impulso en el dominio del tiempo $h(t)$, y por su respuesta en el dominio de la frecuencia $H(\Omega)$, lo que implica que para garantizar esta linealidad, se debe conseguir que el sistema trabaje en modo incoherente, para lo cual, el tiempo de coherencia de la fuente debe ser mucho menor que el tiempo de retardo introducido entre las diferentes muestras. La respuesta al impulso $h(t)$ y la respuesta en frecuencia $H(\Omega)$ se determinan a partir del retardo básico temporal T y los valores de ponderación de las muestras. En este tipo de filtros se pueden utilizar distintos elementos fotónicos como amplificadores o atenuadores para ponderar las muestras y RDFO con chirp para introducir los retardos [2].

También es posible obtener este tipo de filtros utilizando UFBGs (Uniform Fiber Bragg Gratings) para generar líneas de retraso programables. Este enfoque consiste en utilizar un UFBG el cual tiene una longitud de onda de Bragg fija (λ_A), pero al que en una determinada longitud de la RDFO se le aplica un campo magnético que provocará un cambio en el periodo de forma local consiguiendo una nueva longitud de onda central (λ_B). Dependiendo de la posición y del campo magnético el retraso de una longitud de onda con respecto a la otra puede ser alterado [3]. Otra estructura sencilla para lograr un filtro con líneas de retardo consiste en colocar dos RDFOs con diferentes reflectividades en serie a los lados de un medio de fibra activo (EDFA), provocando a la salida un número determinado de muestras con un retraso característico y un filtro con un ancho de banda muy estrecho [5].

Los filtros basados en líneas de retardo sufren de ciertas limitaciones según se manifiesten en el dominio óptico o el dominio eléctrico. La linealidad del filtro se puede ver afectada si la potencia óptica usada estimula las no linealidades de la fibra, los efectos de la polarización son importantes bajo el modo de operación coherente, el uso de coeficientes positivos limita el rango de funciones de transferencia que pueden ser implementados, la posibilidad de cambiar las frecuencias de resonancia para realizar filtros sintonizables requiere cambiar el periodo de muestreo o para realizar un filtro reconfigurable en el que se puedan cambiar de forma dinámica su coeficientes no es posible en estructuras pasivas; todas estas son algunas de las limitaciones que se presentan en el dominio óptico.

Se pueden encontrar numerosas propuestas para la generación de señales UWB (Ultra Wide Band) en el dominio óptico, alguna de ellas fundamentadas en el mapeo coherente e incoherente de frecuencia a tiempo [6], y que hacen uso de la dispersión cromática de primer orden. Las señales UWB utilizan monociclos o dobletes Gaussianos, pulsos que provienen de la derivada de primer y segundo orden de un pulso Gaussiano. Se puede obtener una aproximación de estas derivadas con la primera y segunda diferencia entre los retrasos de un filtro fotónico de microondas con líneas de retraso por lo tanto estos filtros son válidos para implementar una estructura para la generación de este tipo de señales.

Otras propuestas utilizan un método de conversión de la señal modulada en fase a modulación en intensidad, este cambio se logra mediante la colocación de un elemento dispersivo como puede ser una fibra óptica que es alimentada por la portadora óptica modulada en fase por la señal de RF [7] o un discriminador de

frecuencia óptica usando un filtro óptico [8] [9], que puede ser realizado con una RDFO apodizado.

Las señales UWB están diseñadas para funcionar en bandas de frecuencias, entre los 3,1 a 10,6 Ghz, ocupadas por otros servicios, pero sin causar interferencias electromagnéticas significativas lo cual supone una ventaja por la saturación del espectro electromagnético debido a las numerosas aplicaciones radio existentes. Todo ello ha provocado un especial interés en la generación de estas señales en el dominio óptico donde los filtros fotónicos bien sea mediante RDFO o elementos dispersivos están presentes.

Otro de los efectos en los que se basan los filtros ópticos es el denominado efecto de Scattering de Brillouin que también es muy utilizado en amplificadores, sensado distribuido y láseres de línea muy estrecha [10]. Desde 1989 el Scattering de Brillouin ha sido objeto de investigación como elemento sensor de temperatura, tensión y filtros ópticos muy estrechos y sintonizables. Estos filtros aprovechan las no linealidades que se producen en la fibra óptica para generar ganancia en determinadas regiones espectrales producidas por el efecto Brillouin. A potencias del orden de mW la dispersión estimulada de Brillouin es el fenómeno de dispersión predominante en fibras con una longitud de varios kilómetros. Este efecto se produce en la fibra cuando se introduce una señal a frecuencias ópticas de una intensidad determinada con alta coherencia y con una anchura espectral pequeña (< 2 Ghz) como señal de bombeo produciéndose una interacción con la denominada onda de Stokes (esta onda puede ser inyectada directamente en la fibra o ser generada como resultado de la dispersión espontánea) que se propagan en dirección contraria, obteniéndose una banda de ganancia producida por el Scattering Brillouin Estimulado (SBS) centrada a una frecuencia (onda de Stokes) separada de la de bombeo (que sufre una pérdida de potencia), consiguiéndose de esta manera un filtrado activo al amplificar la banda que se desea con respecto al resto del espectro.

La figura 1.4 muestra la estructura de un filtro fotónico basada en el efecto SBS. Este consiste en la introducción mediante un láser externo de una onda que es dividida en dos ramas, en la superior la portadora óptica es modulada por una señal de RF mediante un oscilador local obteniendo una modulación CS-DSB (Carrier-Suppressed Double Side Band), posteriormente mediante una RDFO es suprimida una de las bandas laterales siendo la otra, la frecuencia utilizada para el bombeo; por la otra rama otra señal de RF modula la portadora óptica mediante un modulador MZM en la cual una de las bandas laterales en este caso la superior es filtrada por una RDFO quedando la otra banda lateral como onda de Stokes, posteriormente atraviesa un longitud de fibra de 1 Km. Este tipo de filtros pueden ser sintonizados mediante el estiramiento o la compresión de las RDFOs para cambiar la longitud de onda que es filtrada [11].

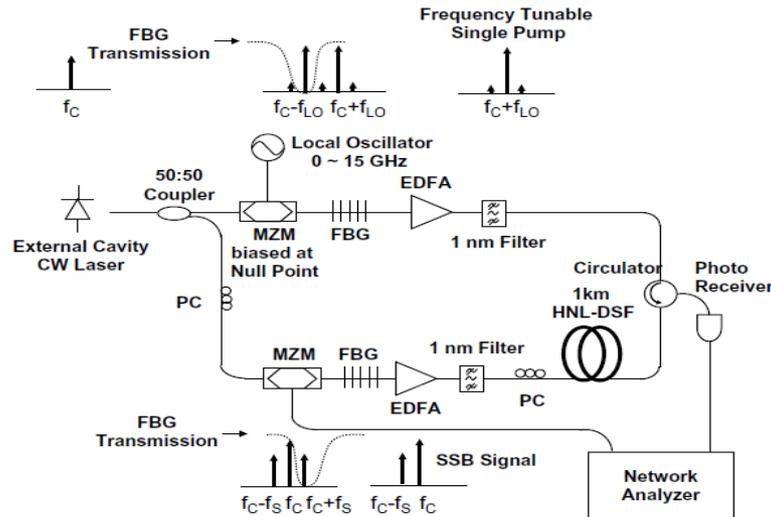


Figura 1.3: Esquema de generación de una señal de Microondas mediante SBS.

Otras técnicas para crear dispositivos activos como filtros, con un ancho de banda modelable, utilizan fibras ópticas concatenadas con diferentes índices de refracción y densidad, siendo el espectro de ganancia Brillouin total la superposición de las curvas de ganancia de las diferentes fibras colocadas en línea [10]. Con este método puede modelarse la curva de ganancia utilizando tramos de fibra adecuados obteniéndose anchuras de 280 Mhz en dicha curva.

La necesidad de utilizar varios kilómetros de fibra óptica para lograr un filtro óptico basado en SBS es una importante limitación que sufren estos filtros, que necesitarán un nivel de potencia adecuada dependiendo de la fibra utilizada redundando en un mayor peso y tamaño de la estructura.

Configuraciones en las que están presentes las RDFOs constituyen otra de las técnicas utilizadas actualmente para el diseño y realización de filtros fotónicos de microondas. Las RDFO se han podido desarrollar gracias al descubrimiento de la fotosensibilidad de las fibras ópticas que en 1978 fue hallado por Hill et al [12], [13] viéndose que era posible incrementar el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica de sílice dopada con germanio con luz ultravioleta, permitiendo grabar la primera red de difracción en fibra.

Las Redes de Difracción en Fibra Óptica (RDFO), se han convertido en importantes componentes en una amplia variedad de dispositivos que se utilizan para la transmisión de luz por fibra. Su versatilidad para conseguir características espectrales concretas y propiedades únicas de filtrado dependiendo de determinadas características de la red, las ha hecho emerger de forma significativa.

Introduciendo un cambio de fase en una RDFO se pueden conseguir filtros de microondas pasobanda sintonizables. Este cambio de fase se logra introduciendo una pequeña variación en el periodo del índice de refracción de forma local en una parte de la RDFO, lo que provocará una longitud de onda óptica de resonancia dentro de la respuesta de corte del filtro dependiendo del cambio de fase inducido. Se puede

conseguir un cambio de fase utilizando un PZT (Piezoelectric) que estrecha el periodo de la RDFO en función del voltaje aplicado, pudiendo conseguirse una sintonización dinámica del filtro estando limitado el rango de sintonización por el ancho de banda de la RDFO. Con esta longitud de onda de resonancia se pueden implementar filtros con ancho de banda muy estrecho o láseres de fibra pudiendo ser utilizados en demultiplexación en longitud de onda [14].

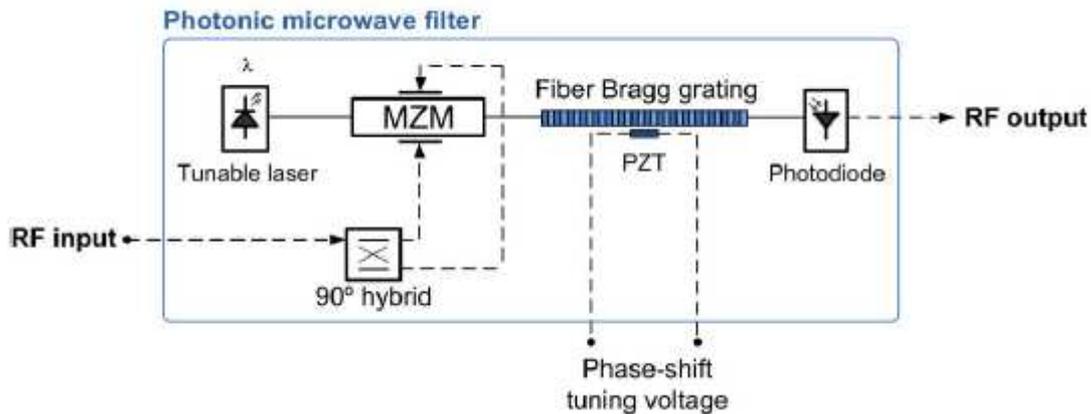


Figura 1.4: Estructura de filtrado óptico mediante FBG con cambio de fase.

Otras técnicas se apoyan en los LCFBG (Linearly Chirped Fiber Bragg Gratings) para el diseño de filtros transversales de RF. Estas técnicas aprovechan la dispersión cromática que introducen los LCFBG en la señal óptica. Se han descrito estructuras en las cuales introduciendo en una fibra varias señales provenientes de un Array de láseres a través de un acoplador, siendo luego moduladas por una señal de RF mediante un EOM, alimentan un LCFBG que provoca un retraso constante entre dos longitudes de onda adyacentes [3]. Estos filtros pueden ser sintonizados cambiando la longitud de onda de salida de los distintos láseres, así como fácilmente reconfigurables variando la potencia de dichos láseres puesto que es uno de los factores que afecta a su función de transferencia. Otros enfoques utilizan la dispersión cromática de los NLCFBG para generar un diferencia entre los tiempos de retraso de la banda lateral superior e inferior de una señal de RF modulada con Doble Banda Lateral (DSB) [15].

Otra estructuras propuestas para la realización de filtros transversales utilizan un array de FBGs uniformes con la misma reflectividad, separados a una determinada distancia, para generar líneas de retraso. La potencia óptica de salida del filtro es linealmente proporcional a la potencia óptica de entrada siempre que no existan efectos no lineales en el sistema. El filtro completo puede ser tratado con un sistema Lineal Invariante en el tiempo (LTI) cuya función de transferencia se obtiene mediante la convolución de la señal eléctrica modulada con la respuesta al impulso del filtro [16].

En la siguiente figura una tabla comparativa muestra las diferentes características entre las distintas técnicas de filtrado en el dominio óptico.

Tabla comparativa Características de los distintos sistema de filtrado			
	Líneas de retraso óptico	RDFO	SBS
Ancho de Banda	1 - 500 Mhz	> 500 Mhz	10 - 800 Mhz
Tamaño, Peso	Alto	Bajo	Alto
Filtrado Activo	Si	No	Si
Reconfigurable	Si	Limitado	Si
Ventajas	Sintonizables y reconfigurables. Sensibilidad a la temperatura	Pequeño Tamaño. Bajo consumo	Fácil reconfiguración y sintonización.
Desventajas	Voluminoso	Sensible a la temperatura. No fácilmente reconfigurable	

Figura 1.5: Tabla comparativa de las diferentes técnicas de filtrado

1.3 Objetivos

Tras la breve descripción realizada al estado y situación de las técnicas del filtrado fotónico en la actualidad en la que se ha pretendido mostrar sus ventajas así como las limitaciones que sufren, el objetivo del presente proyecto consiste en profundizar en el estudio de las RDFO como sistema de filtrado en el dominio óptico.

Se estudia una técnica que se apoya en los RDFO uniformes de periodo corto como elementos principales para el filtrado óptico, realizándose una serie de simulaciones a medida que se solapan dos de ellas y se van desintonizando paulatinamente, lo cual permitirá obtener una serie de resultados y conclusiones en cuanto a la viabilidad de dicha técnica para posteriormente realizar una comparación cuando utilizamos las RDFO con cambio de fase como sistema de filtrado.

CAPÍTULO 2

Fundamentos teóricos

2.1 Concepto de red de difracción

Se puede definir una Red de Difracción en Fibra Óptica (**RDFO**) como una modificación del índice de refracción, en una parte del núcleo de una fibra óptica, que es modulada de forma periódica. Mediante esta estructura se consigue, que al incidir potencia óptica en ella, parte de la radiación es reflejada permitiendo que el resto sea transmitida.

De forma general se puede clasificar a las RDFO de dos maneras: RDFO de Bragg o de reflexión y RDFO de periodo largo o de transmisión. Si la RDFO refleja radiaciones ópticas, con una longitud de onda que se encuentra en torno a su periodo o un poco mayores (< 10), se denomina de periodo corto o de Bragg [17]. El hecho de que la longitud de onda de la señal óptica incidente sea del tamaño del periodo de modulación, provoca un acoplamiento entre modos ópticos confinados en el núcleo de la fibra que se propagan en direcciones opuestas. En las RDFO de periodo largo en cambio la longitud de onda de la señal óptica incidente es menor (< 100) que el periodo de modulación, provocando un acoplamiento entre los modos del núcleo y modos de cubierta de la fibra, con la misma dirección de propagación.

La luz viaja por el núcleo de la fibra, y al chocar con cada uno de los planos de la red es reflejada por cada uno de ellos, dándose las condiciones para la reflexión si la condición de Bragg se cumple, en caso contrario la luz saldrá de fase progresivamente hasta que se cancela por completo. La reflexiones en cada plano se suman de forma constructiva, en la dirección contraria de la propagación original formando un pico de reflexión con una longitud de onda central definida por los parámetros de la red.

La condición de Bragg establece que existe conservación del momento y de la energía [18]. En el caso de conservación de la energía la frecuencia de onda incidente tiene que ser igual a la frecuencia de onda reflejada ($h\omega_f = h\omega_i$). En el caso de conservación del momento la suma del vector de onda incidente \mathbf{k}_i y el vector de la RDFO \mathbf{K} tiene que ser igual al vector de onda reflejada \mathbf{k}_f :

$$k_i + K = k_f \quad (1)$$

el vector \mathbf{K} tiene una dirección normal a los planos de la RDFO, cuya magnitud viene dada por $2\pi/\Lambda$. El vector de onda incidente es igual en magnitud pero con dirección contraria al vector de onda refractada. La condición de conservación del momento viene definida por:

$$2 \left(\frac{2\pi n_{eff}}{\lambda_B} \right) = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (2)$$

de donde se puede obtener que las radiaciones ópticas reflejadas quedan centradas en torno a la longitud de onda de Bragg (longitud de onda de resonancia) a la cual ocurre la mayor reflexión que se expresa como:

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (3)$$

donde n_{eff} es el índice efectivo del modo fundamental que se propaga dentro del núcleo de la fibra y Λ representa el periodo de la variación del índice de refracción del núcleo.

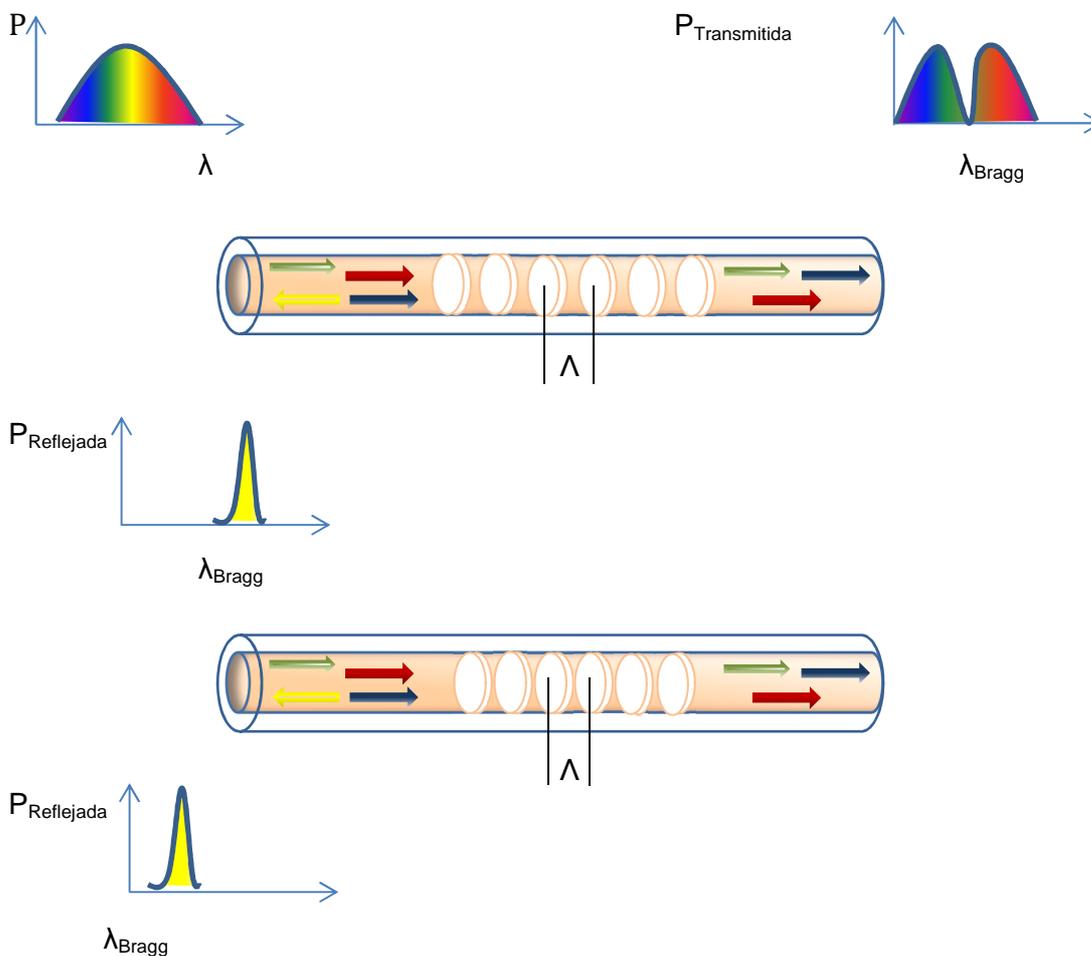


Figura 2.1: Red de Difracción en Fibra Óptica

Como se puede apreciar en la figura, la longitud de onda central o longitud de onda de Bragg depende proporcionalmente del periodo de la red, de tal forma que si se disminuye su periodo esta disminuirá y viceversa.

2.2 Redes de difracción uniformes

Las redes de difracción uniformes son aquellas cuyo perfil de índice de refracción en el núcleo de la fibra tiene un periodo constante a lo largo de su eje, y una envolvente también constante e igual al incremento del índice de refracción inducido en el núcleo [12].

La modulación del índice de refracción de una red de Bragg, aunque no de forma exacta, tiene forma sinusoidal, pudiendo expresarse a través de la serie de Fourier, ya que esta modulación es periódica. Se utilizan de forma general los dos primeros términos de la serie, que son los más relevantes a la hora de caracterizar las propiedades ópticas, despreciando los términos de orden superior ya que no contribuyen a la respuesta espectral.

Se puede expresar matemáticamente la modulación del índice de refracción en una RDFO de la siguiente forma:

$$\delta n(z) = \overline{\Delta n} \left\{ 1 + \frac{v}{2} \left(e^{i \left[\left(\frac{2\pi N}{\Lambda} \right) z + \phi(z) \right]} + cc \right) \right\} \quad (4)$$

Esta ecuación describe el cambio inducido en el índice de refracción, debido a la exposición UV en el tiempo, cuando se inscribe una RDFO en el núcleo de una fibra.

$\delta n(z)$ es la función que representa el cambio en el índice de refracción con respecto a la dirección de propagación en la fibra óptica, $\overline{\Delta n}$ representa el cambio en el índice de refracción promedio durante un único periodo de la RDFO, v la visibilidad, y los términos del exponente junto con el complejo conjugado "cc" describe la modulación periódica real en notación compleja. $\phi(z)$ representa un cambio espacial de fase arbitraria. Λ es el periodo de la perturbación, mientras que N es un entero ($-\infty < N < +\infty$) que muestra el orden armónico.

En la figura 2.2 se muestra la modulación del índice de refracción de una RDFO uniforme para distintos patrones de visibilidad. La línea discontinua representa la diferencia entre el índice del núcleo y de la cubierta, en la zona sin perturbar, siendo de 5×10^{-3} . La línea discontinua de color azul representa el índice de refracción promedio en la zona que ha sido perturbada por la radiación UV. Se aprecia que este valor promedio es constante independientemente del valor de la visibilidad.

La amplitud de modulación en "ac" viene dada por $\Delta n = v \overline{\Delta n}$ que en el caso de la figura 2.2 para una visibilidad unitaria alcanza un valor de 2×10^{-3} .

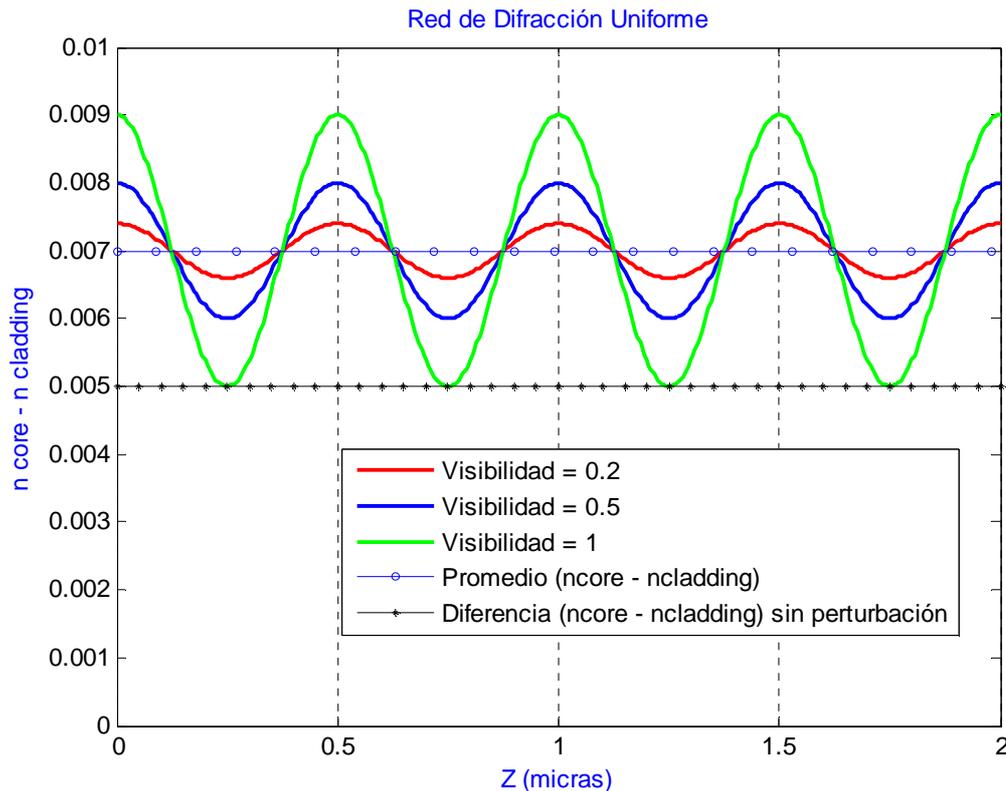


Figura 2.2: Modulación del índice de refracción para diferentes visibilidades.

En las redes de difracción uniformes, dado que se trata de un medio periódico, se puede hacer uso de la teoría de modos acoplados para explicar la propagación electromagnética. Ya que en la fibra monomodo, se asume un solo modo posible de propagación, la perturbación del índice de refracción provocará acoplo energético entre el modo propagándose en la dirección $+z$ y el mismo modo propagándose en la dirección contraria $-z$.

2.2.1 Funcionamiento de una red de difracción uniforme

La propagación de una onda a través de una fibra óptica es analizada resolviendo las ecuaciones de Maxwell y aplicando las condiciones de contorno apropiadas. Las ecuaciones de propagación pueden ser simplificadas asumiendo guiado débil, el cual permite la descomposición de los modos en un conjunto ortogonal de modos transversalmente polarizados. Las soluciones de dichas ecuaciones proporcionan la distribución básica de campo de los modos confinados y radiados de la guía de onda.

La forma de funcionamiento de una red de fibra uniforme se basa en el acoplo energético de dos modos propagándose en sentidos opuestos. La Teoría de Modos Acoplados proporciona un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden para el cambio en la amplitud de los campos a lo largo de la fibra, que tienen soluciones analíticas para las perturbaciones periódicas sinusoidales uniformes.

En la Teoría de Modos Acoplados, la variación de forma periódica del tensor dieléctrico se considera una perturbación que es la responsable del acoplo o intercambio de energía de los modos normales no perturbados. El hecho de que exista una perturbación $\Delta\epsilon(x, y, z)$, produce una nueva componente del vector de polarización que actuando como una fuente distribuida, tiene la capacidad de alimentar energía desde el modo original $\vec{E}_1(x, y, z)$ a otro modo $\vec{E}_2(x, y, z)$, pudiendo afirmarse que la perturbación dieléctrica provoca acoplo o intercambio de energía entre los modos [19].

Dentro de la Teoría de Modos acoplados [20], [21] en una guía de onda sin perturbaciones se puede asumir que la componente transversal total de campo eléctrico puede ser escrita como una superposición de modos ideales denominados con la letra j , de manera que:

$$\vec{E}_t(x, y, z, t) = \sum_j [A_j(z) \exp(i\beta z) + B_j(z) \exp(-i\beta z)] \cdot \vec{e}_{jt}(x, y) \exp(-i\omega t) \quad (5)$$

Donde $A_j(z)$ y $B_j(z)$, representan la variación lenta en las amplitudes del modo j que viaja en la dirección $+z$ y $-z$ respectivamente. Cuando, como se ha descrito anteriormente, se produce una perturbación del medio dieléctrico se produce acoplo de energía entre los modos normales no perturbados pudiendo describirse las amplitudes a lo largo del eje z como:

$$\frac{dA_j}{dz} = i \sum_k A_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k - \beta_j)z] + i \sum_k B_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k + \beta_j)z] \quad (6)$$

$$\frac{dB_j}{dz} = -i \sum_k A_k (K_{kj}^t - K_{kj}^z) \exp[i(\beta_k + \beta_j)z] - i \sum_k B_k (K_{kj}^t + K_{kj}^z) \exp[-i(\beta_k - \beta_j)z] \quad (7)$$

Donde $K_{kj}^t(z)$, es el coeficiente de acoplamiento transversal entre el modo j y k definido como:

$$K_{kj}^t(z) = \frac{\omega}{4} \iint_{\infty} dx dy \Delta\epsilon(x, y, z) \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^*(x, y) \quad (8)$$

$\Delta\epsilon$, representa la perturbación de la permitividad y es aproximadamente $\Delta\epsilon \cong 2n \delta n$, cuando $\delta n \ll n$.

Si el cambio inducido en el índice de refracción, es aproximadamente uniforme a través del núcleo de la fibra como sucede en la mayor parte de las fibras se pueden definir dos nuevos coeficientes [20]:

$$\sigma_{kj}(z) = \frac{\omega n_{co}}{2} \overline{\delta n_{co}}(z) \iint_{core} dx dy \vec{e}_{kt}(x, y) \cdot \vec{e}_{jt}^*(x, y) \quad (9)$$

$$k_{kj}(z) = \frac{v}{2} \sigma_{kj}(z) \quad (10)$$

que representan el coeficiente de acoplamiento “DC” y el coeficiente de acoplamiento en “ac” respectivamente. Las fórmulas (6)-(10) descritas muestran las ecuaciones de la teoría de modos acoplados que describen el espectro de una RDFO uniforme. Las ecuaciones de acoplo pueden ser simplificadas utilizando el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\frac{dR}{dz} = i\hat{\sigma} R(z) + ik S(z) \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dz} = -i\hat{\sigma} S(z) - ik^* R(z) \quad (12)$$

donde $R(z) = E^+(z) \exp[i\delta z - \phi/2]$ y $S(z) = E^-(z) \exp[-i\delta z + \phi/2]$ representan a las amplitudes de campo incidente y reflejado

$$\hat{\sigma} \equiv \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{eff}} \quad (14)$$

$$k = k^* = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n_{eff}} \quad (15)$$

k corresponde al coeficiente de acoplo en “ac” y $\hat{\sigma}$ el coeficiente de autoacoplo en “DC” siendo δ la desviación entre la longitud de onda que se propaga por el medio y la longitud de onda de Bragg que es independiente del eje z .

$$\delta \equiv \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = \beta - \beta_D = 2\pi n_{eff} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right) \quad (16)$$

pudiendo establecerse la reflectividad de una RDFO uniforme como:

$$r = \frac{\sinh^2(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} L)}{\cosh^2(\sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2} L) - \frac{\hat{\sigma}^2}{k^2}} \quad (17)$$

Este método de obtener la reflectividad de una red de difracción trabaja directamente con parámetros normalizados aproximados como son los coeficientes de acoplo entre modos y la desintonización de la red con respecto a la condición de adaptación de fases. Aunque es un método válido y directo posteriormente se utilizará para la simulaciones el método de la Matriz de Transferencia en el cual aparecen los parámetros físicos de la red como pueden ser la longitud y el periodo lo cual es conveniente a la hora de estudiar cómo cambian las características espectrales de la red con respecto a la modificación de estos parámetros.

2.1 Simulación de las RDFOs uniformes

Existen diferentes técnicas de simulación para las RDFO teniendo éstas diferentes grados de complejidad. La más sencilla de todas ellas consiste en la integración numérica de las ecuaciones de modos acoplados siendo este un método directo y capaz de simular la función de transferencia exacta pero teniendo el inconveniente de no ser demasiado rápido.

Para las simulaciones de los apartados posteriores de las RDFOs con cambio de fase se ha utilizado la técnica de la matriz de transferencia [22]. Dicha técnica calcula de forma rápida y exacta la entrada y la salida para secciones cortas en la que se puede dividir la RDFO. Las salidas de la primera matriz M^1 se utilizan como campos de entrada de la segunda matriz M^2 , que no tiene que ser igual que M^1 . El método de la matriz de transferencia es válido para simular con exactitud RDFOs con apodización y con o sin chirp.

En el método de la matriz de transferencia, las ecuaciones de modos acoplados son usadas para calcular los campos de salida de una sección corta de la RDFO para la cual los tres parámetros se suponen constantes. Cada una de estas secciones puede tener una única e independiente dependencia funcional con respecto al parámetro espacial z . Posteriormente estos resultados son usados como parámetros de entrada para la siguiente sección de la RDFO cuya longitud δl_2 no tiene que ser necesariamente igual a δl_1 .

La RDFO puede ser considerada como un dispositivo de cuatro puertos con dos campos de entrada $R(-\delta l_1/2)$ y $R(\delta l_1/2)$ y dos campos de salida $S(-\delta l_1/2)$ y $S(\delta l_1/2)$. La matriz de transferencia representa la amplitud de la RDFO y la respuesta en fase.

$$\begin{bmatrix} R(-\delta l_1/2) \\ S(-\delta l_1/2) \end{bmatrix} = [T^{-1}] \begin{bmatrix} R(\delta l_1/2) \\ S(\delta l_1/2) \end{bmatrix} \quad (18)$$

Aplicando las condiciones de contorno adecuadas, dependiendo de si el acoplamiento es direccional o contradireccional en la ecuación anteriormente descrita se obtiene la reflectividad y transmitividad de la RDFO.

En las RDFO en reflexión, la amplitud del campo de entrada $R(-\delta l_1/2)$, se normaliza a la unidad y la amplitud del campo reflejado a la salida de la RDFO $S(\delta l_1/2)$ es nula, lo cual conduce a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ S(-\delta l_1/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(\delta l_1/2) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

donde la amplitud transmitida y la amplitud de la reflectividad viene definidas por:

$$R(\delta l_1/2) = 1/T_{11} \quad S(\delta l_1/2) = T_{21}/T_{11} \quad (20)$$

Estos nuevos campos de salida pueden ser transformados por una nueva matriz T^2 , y así sucesivamente de modo que para una RDFO dividida en N secciones donde:

$$L = \sum_{j=1}^N \delta l_j \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = [T^N] \dots [T^3][T^2][T^1] \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix} \quad (22)$$

Si multiplicamos la T^N matrices se obtiene la matriz de transferencia de toda la RDFO:

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix} \quad \text{con la matriz} \quad [T] = \prod_{j=1}^N [T^j] \quad (23)$$

de la solución de la ecuación de modos acoplados, para la sección N de la función de transferencia los elementos de la matriz T vienen dados por:

$$T_{11} = \cosh(\alpha \delta l_j) - \frac{i\delta \sinh(\alpha \delta l_j)}{\alpha} \quad T_{22} = \cosh(\alpha \delta l_j) + \frac{i\delta \sinh(\alpha \delta l_j)}{\alpha} \quad (24)$$

$$T_{12} = -\frac{ik_{ac} \sinh(\alpha \delta l_j)}{\alpha} \quad T_{21} = \frac{ik_{ac} \sinh(\alpha \delta l_j)}{\alpha} \quad (25)$$

En la siguiente figura se muestran los parámetros más relevantes de unas RDFO dividido en N secciones:

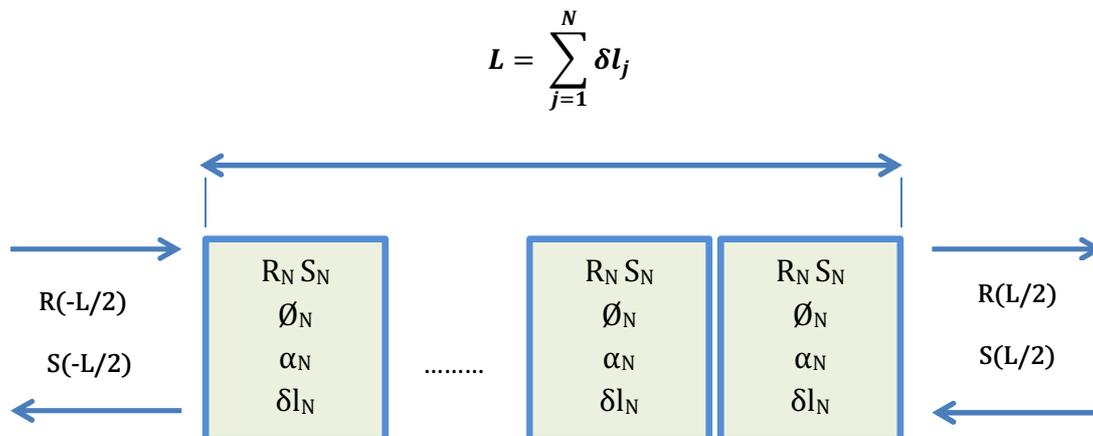


Figura 2.3: Parámetros de una RDFO dividida en N secciones

2.4 Solapamiento de dos RDFOs uniformes

En este proyecto se utilizará el solapamiento de dos redes de difracción de Bragg, obteniendo un espectro resultante de la multiplicación de los dos espectros en los puntos donde se solapan. Si se varía en uno de ellos su periodo, bien mediante un estiramiento de este o porque tenga un periodo distinto, se logra una desintonización entre las dos longitudes de onda de Bragg de cada una de las redes. Con el espectro resultante, que variará en función de la desintonización efectuada, se podrán obtener anchos de banda resultantes más pequeños lo cual resulta importante para el filtrado óptico y así conseguir filtros muy selectivos en una longitud de onda específica.

La técnica del solapamiento de dos RDFO se muestra en la imagen de abajo, en la cual en la Figura 2.4 (a) se muestra un RDFO1 con un ancho de banda de 312 pm, y la Figura 2.4 (b) muestra una RDFO2 desintonizada con respecto a la primera, es decir la longitud de onda de Bragg, esta desplazada $\Delta\lambda = 126 \text{ pm}$, esto provoca un solapamiento de las dos redes, obteniéndose un espectro equivalente que será el resultado de la multiplicación punto a punto de los valores en común de las dos RDFOs, Figura 2.4 (c). Al solaparse las redes se obtiene un espectro equivalente en el que disminuye la reflectividad pero se consigue un ancho de banda menor con lo que se podría conseguir un filtro más selectivo en longitud de onda Figura 2.4 (d), en este caso con un ancho de banda de 195 pm.

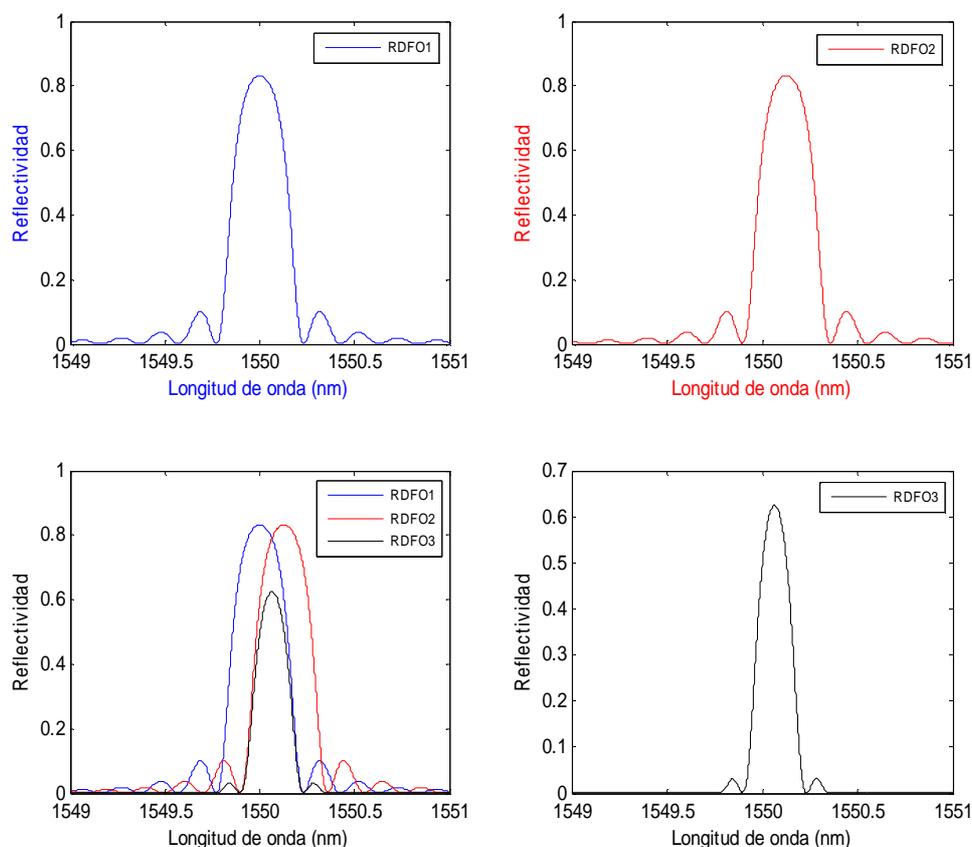


Figura 2.4: (a) RDFO1 (b) RDFO2 (c) Solapamiento de RDFO1 y RDFO2 (d) Espectro resultante del solapamiento.

Si se varía el solapamiento parcial de las RDFOs se puede obtener un mejor filtrado, siempre limitados por los máximos valores de reflectividad del espectro equivalente. En la gráfica se aprecia que la reflectividad de las RDFO1 y RDFO2 es del 83,2%, mientras que al solaparse los espectros la amplitud de la reflectividad equivalente decae al 62,5%. Se trata por lo tanto de buscar un compromiso entre la búsqueda de un ancho de banda lo más estrecho posible dentro de los rangos óptimos en cuanto a potencia óptica reflejada por la red de difracción.

En la figura siguiente se muestra un ejemplo de una estructura láser en fibra donde se utiliza el solapamiento de dos RDFOs [23] para obtener láseres con menor anchura de línea.

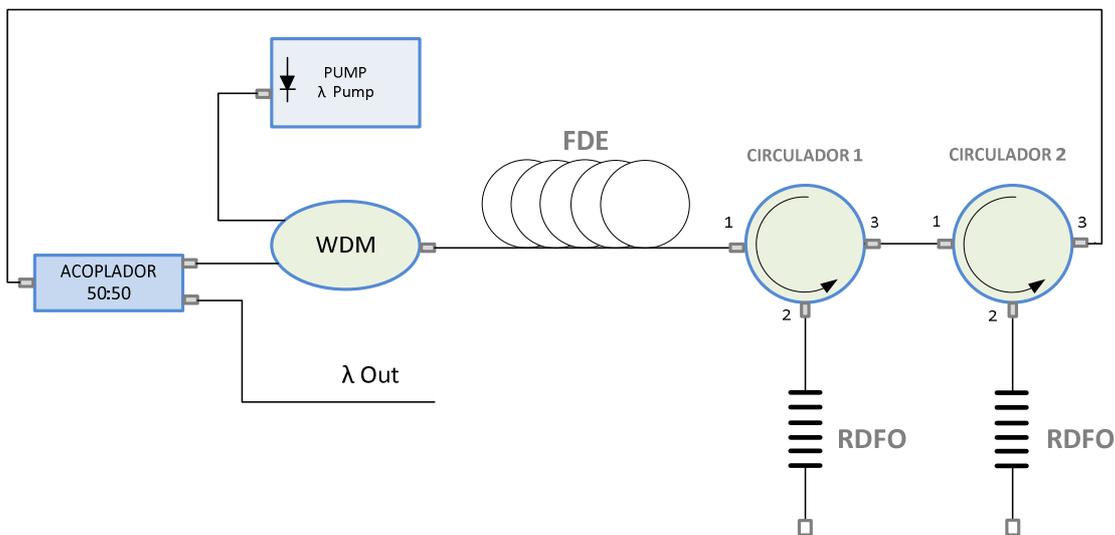


Figura 2.5: Estructura láser que utiliza el solapamiento de dos RDFOs

Esta configuración está compuesta por una fuente de bombeo para inyectar a la fibra, un WDM después del cual viene el medio activo (Fibra Dopada con Erblio) y dos RDFOs que están enlazadas por dos circuladores.

La emisión espontánea estimulada (ASE) que se produce debido al bombeo es dirigida hacia el primer circulador, a través del cual se reflejará la potencia óptica centrada en la longitud de onda de Bragg que le corresponde a esta primera RDFO siendo dirigida por el circulador 2 a la segunda RDFO. La RDFO 2 estará parcialmente solapada con respecto a la primera (desintonizada con respecto a la longitud de onda de Bragg de la primera RDFO), estrechando todavía más el espectro reflejado por la primera RDFO siendo el láser más selectivo en longitud de onda.

Posteriormente la potencia es dirigida hacia un acoplador 50:50 el cual redirigirá la mitad de la potencia al WDM para conseguir ASE en el medio activo y por la otra salida tendremos la potencia óptica en la longitud de onda deseada.

2.5 Redes de difracción uniformes con cambio de fase

Las redes de difracción de Bragg actúan generalmente reflejando una estrecha banda centrada en una longitud de onda asociada al periodo medio de la RDFO. A menudo resulta útil incorporar cambios de fase dentro de la estructura de la RDFO, los cuales crean una estrecha banda en transmisión dentro del ancho de banda en reflexión.

Los cambios de fase han sido utilizados en múltiples aplicaciones donde la RDFO puede ser diseñada como un filtro en transmisión de banda muy estrecha. Este procedimiento ha sido aplicado en láseres de semiconductor [22], para permitir estabilidad con un solo modo de operación o en sistemas de comunicación multicanal como selectores de canal y en láseres DFB de fibra dopadas con tierras raras [24].

Para construir dispositivos en fibra óptica con cambio de fase se pueden utilizar máscaras de fase en las cuales el cambio de fase ha sido introducido en el diseño de la máscara o mediante un post-proceso de la RDFO por exposición de pulsos laser de radiación UV o por un proceso de post-fabricación usando un tratamiento térmico. En cualquiera de los casos la longitud de onda de resonancia dependerá del tamaño del cambio de fase introducido y de la posición de este dentro de la RDFO.

El cambio de fase puede ser el resultado de un cambio en el índice de refracción, n_{eff} , por esta sometido una zona determinada a un exposición uniforme de radiación UV o por una discontinuidad dentro de la RDFO.

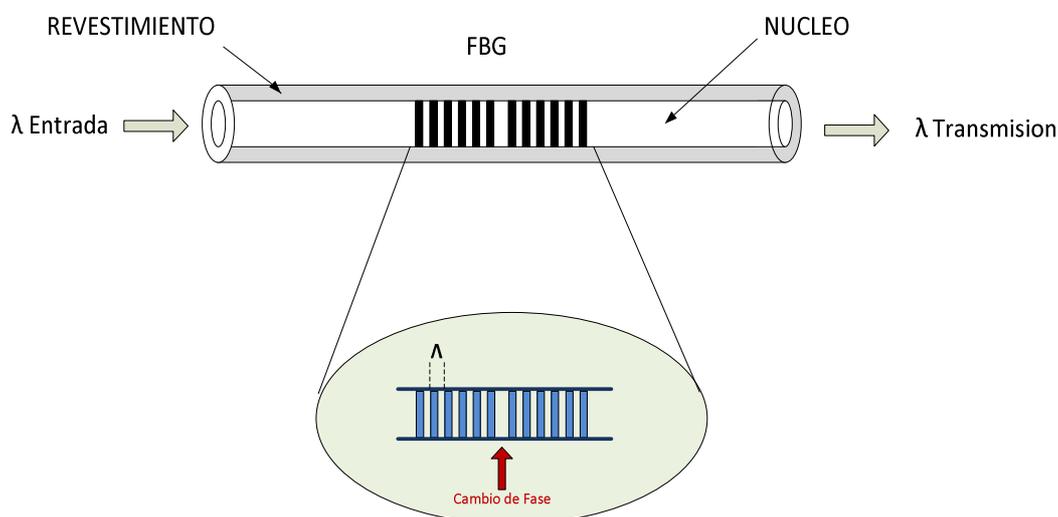


Figura 2.6: Esquema de un RDFO en el que se ha introducido un cambio de fase.

En cualquiera de los dos casos la fase viene dada por:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (n_{eff} + \vartheta n) \Delta L \quad (26)$$

Donde ϑn es el cambio de fase local por encima de la longitud ΔL .

En general las dos secciones de la RDFO con cambio de fase no tienen por qué estar colocadas simétricamente pudiendo tener diferentes anchos de banda y diferentes amplitudes de modulación del índice de refracción.

En la figura 2.4 se ha representado el espectro en reflexión con cambio de fase de una RDFO de 20 mm con un valor de visibilidad de 0.163 que provoca que el valor máximo del espectro se sitúe en un valor del 90%. En la figura se aprecia como alrededor de la longitud de onda de 1550 nm existe un estrecho ancho de banda que no es reflejado, provocado por el cambio de fase, el cual es transmitido por la red.

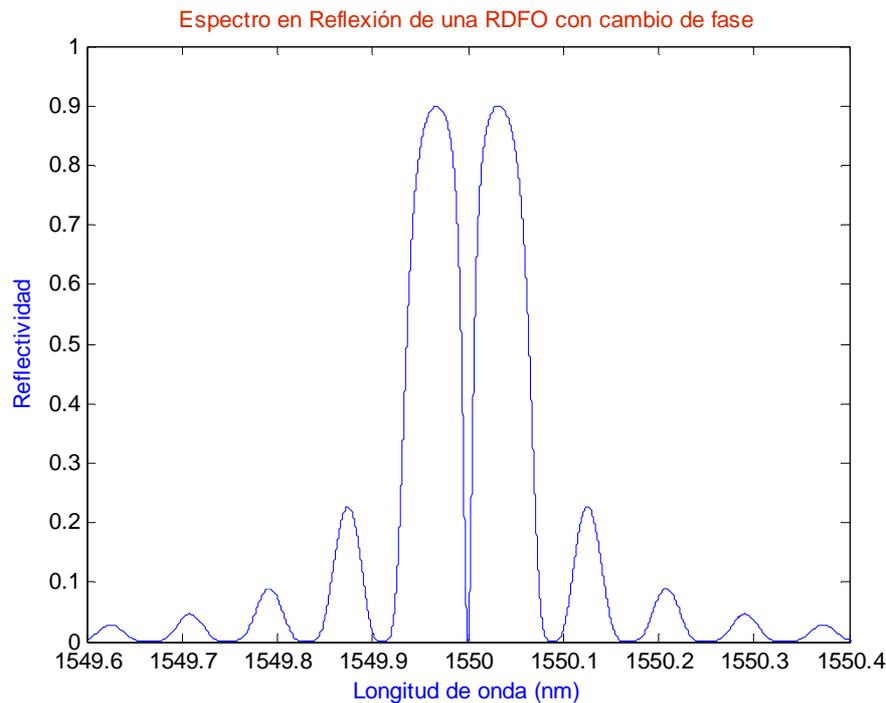


Figura 2.7: Espectro en reflexión de una RDFO con cambio de fase.

Los cambios de fase son simulados mediante la Matriz-T en la que se introduce un término que representa al cambio de fase.

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = [T^N] \dots [T^3] [T_{ps}] [T^1] \begin{bmatrix} R(L/2) \\ S(L/2) \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$T_{ps} = \begin{bmatrix} e^{-i\vartheta/2} & 0 \\ 0 & e^{i\vartheta/2} \end{bmatrix} \quad (28)$$

2.5. Grabado de RDFO

Para grabar una RDFO es preciso hacerlo sobre un material fotosensible, el cual, cuando es insolado mediante una radiación luminosa con un patrón de intensidades adecuado de luz UV, tiene la capacidad de incrementar su índice de refracción en dicha zona de forma permanente generando una modulación espacial de dicho índice en el núcleo de la fibra y formando la red de difracción de Bragg.

Las fibras ópticas convencionales están fabricadas con Sílice y la parte del núcleo está, en mayor o menor medida, dopada con Germanio, idealmente en la forma SiO_2 y GeO_2 .

La fotosensibilidad en fibras ópticas fue demostrada por primera vez por Hill et al [12]. A través de una laser de argón ionizado fue irradiada una fibra dopada con germanio, con gran intensidad, produciéndose al cabo de un tiempo un incremento en la intensidad de la luz reflejada.

Generalmente la fotosensibilidad se origina por los defectos que presenta la estructura del vidrio a nivel microscópico producidos por los procesos de fabricación y la exposición a la radiación UV. En los núcleos dopados con germanio tetravalente se observa un defecto debido a la deficiencia de oxígeno en el vidrio, en los cuales un átomo de Ge está enlazado con otro de Ge o de Si, en vez de un átomo de oxígeno. Estos enlaces tienen una energía de ≈ 5.15 eV, al ser iluminado el núcleo con luz ultravioleta, el espectro óptico de absorción sufre variaciones y a una longitud de onda de 240 nm existe un pico de absorción grande, rompiéndose los enlaces y dando lugar a la formación de los llamados centros de color GeE' , que provocan una reestructuración de los átomos, produciéndose un aumento positivo en el índice de refracción del material. Cuanto mayor es la concentración de Germanio, más defectos existen en el material pudiéndose conseguir un mayor aumento del índice de refracción [25].

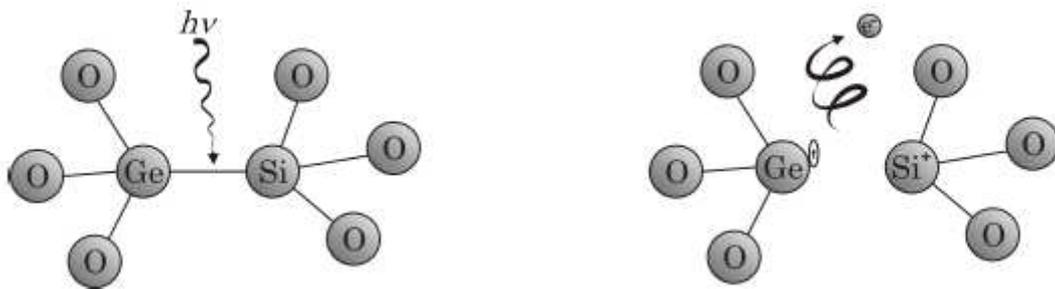


Figura 2.8: Fenómeno de la fotosensibilidad en la fibra óptica

Estos defectos conocidos como centros de color son importantes puesto que sus bandas de absorción provocan pérdidas en la transmisión.

El comportamiento en el crecimiento del índice de refracción de la red y sus características depende de varios factores como la concentración de Ge, tipo de laser

utilizado para la grabación o incluso la presencia de otros dopantes en la fibra, dando lugar a distintas clases de redes, que se pueden clasificar en tipo I, tipo II o tipo IIA.

Cabe mencionar que si la fibra óptica es sometida a procesos de hidrogenación es posible aumentar su fotosensibilidad. Introduciendo la fibra en una atmósfera de hidrógeno a alta presión, las moléculas de hidrógeno se difunden hasta el núcleo de la fibra, y al ser irradiadas con luz ultravioleta el H_2 reacciona con las moléculas de vidrio produciendo cambios en el índice de refracción.

Para hidrogenar la fibra, se utiliza hidrógeno a temperaturas que van desde 20° hasta 75° C y presiones de 20 atm a más de 750 atm (típicamente 150 atm), [18] provocando la difusión de las moléculas de hidrógeno en el núcleo de la fibra. La zonas que no son expuestas a la radiación UV el hidrógeno se difunde hacia afuera, siendo depreciables las pérdidas por absorción a longitudes de onda fundamentales para el rango de las comunicaciones ópticas. Posteriormente la fibra se somete a -85° C, para evitar que las moléculas puedan volver al ambiente.

Otro de los factores que pueden influir en el crecimiento del índice de refracción de la redes puede ser el proceso de fabricación de la fibra o que le sea aplicada una tensión durante la grabación, siendo la fotosensibilidad un proceso amplio para explicar de forma exhaustiva. Por último mencionar que los cambios en el índice de refracción son en general inestables con el aumento de la temperatura, desapareciendo si estas son lo suficientemente altas.

Para grabar redes de difracción de Bragg se utilizan diversas técnicas que se pueden dividir en dos grupos, dependiendo de si se utilizan métodos holográficos o no. En las denominadas técnicas holográficas el haz de luz se divide en dos haces con los que se crea un patrón de interferencia sobre la fibra, mientras que en las que utilizan métodos no holográficos la red se graba directamente sobre la fibra de manera periódica.

Seguidamente se describe la técnica de máscara de fase, técnica que ha sido ampliamente utilizada en la Universidad de Cantabria para crear RDFO uniformes.

2.5.1 Técnica de máscara de fase:

Dentro de las múltiples técnicas de grabado de las RDFO, las redes grabadas con máscara de fase, son de relativamente fácil implementación, permitiendo ser producidas de forma comercial y en grandes cantidades.

Al grabar una RDFO de periodo corto, cuyo periodo está por debajo de las micras, esta técnica permite una buena precisión, convirtiéndose en la más eficaz.

Dentro de las técnicas holográficas sin máscara de fase el haz láser se divide en dos y se hace interferir sobre la fibra, empleando configuraciones de tipo interferómetro de Mach-Zender, Espejo de Lloyd, etc. Al incidir simétricamente sobre una fibra, dos haces de luz ultravioleta, con una determinada longitud de onda (λ_{uv}) y

que forman un ángulo con respecto a la normal de la fibra de $\frac{\theta}{2}$, el periodo del patrón de interferencia en el interior de la fibra vendrá dado por [25]:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{uv}}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (29)$$

de donde se deriva que la longitud de onda de Bragg de la red de difracción viene dada por:

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda = \frac{n_{eff} \lambda_{uv}}{\sin \frac{\theta}{2}} \quad (30)$$

Modificando el ángulo de incidencia sobre la fibra se puede modificar la longitud de onda de Bragg, siendo esta una ventaja importante, y pudiendo obtenerse periodicidades Λ dentro del rango de $\lambda_{uv}/2$ e ∞ . Una limitación importante de estas técnicas interferométricas es que la longitud de la red de Bragg queda condicionada al tamaño del haz.

Con la técnica holográfica de máscara de fase se consiguen los dos haces interfiriendo con esta y situando la fibra en la zona de interferencia de los dos haces emergentes.

La máscara de fase consiste en grabar sobre una lámina de sílice fundida, un patrón de líneas de relieve superficial periódico unidimensional, permitiendo que cuando una haz de luz UV incide sobre la máscara de fase se difracte en diversos órdenes de difracción $m = 0, \pm 1, \pm 2$. Los parámetros más relevantes de una máscara de fase son su periodo Λ_m y la altura del relieve h . Con una altura del relieve h determinada, se puede conseguir que la energía del haz incidente sea repartida entre los dos primeros órdenes de difracción y se cancele el orden cero, con lo cual se puede obtener una buena visibilidad en la interferencia producida justo después de la máscara. Si la máscara tiene un índice de refracción n_{uv} a la longitud del láser λ_{uv} , entonces h viene dado por:

$$h = \frac{\lambda_{uv}}{2} \frac{1}{n_{uv} - 1} \quad (31)$$

La ecuación general de difracción con el periodo de la máscara Λ_m determina el ángulo de divergencia θ de los órdenes de difracción ± 1 de la siguiente forma:

$$\Lambda_{pm} = \frac{m \lambda_{uv}}{\left(\sin \frac{\theta_m}{2} - \sin \theta_i \right)} \quad (32)$$

El periodo de las franjas de interferencia, si se sitúa la fibra en la zona donde interfieren los dos haces de orden ± 1 difractados por la máscara vendrá dado por:

$$\Lambda = \frac{\Lambda_{pm}}{2} \quad (33)$$

y la longitud de onda de Bragg viene dada por:

$$\lambda_{Bragg} = 2 n_{eff} \Lambda = n_{eff} \Lambda_m \quad (34)$$

con la técnica de máscara de fase se cuenta con la ventaja de poder grabar redes de un tamaño superior a la anchura del haz UV, desplazando el haz sobre la máscara pero con el inconveniente de que la longitud de onda de Bragg es fija para cada máscara de fase siendo esta dependiente también de la longitud de onda del láser.

Dependiendo de la energía irradiada sobre la fibra, que dependerá de la velocidad de barrido manteniendo la potencia del láser constante, se controla la amplitud de modulación del índice de la fibra.

Para grabar redes con máscara de fase es necesario un montaje que consta básicamente de un láser UV (bien continuo o pulsado), un filtro espacial para eliminar partes no deseadas del haz, una lente cilíndrica para maximizar la potencia en el núcleo de la fibra, un soporte para la máscara y otro para la fibra como se muestra en la figura 2.9 [17].

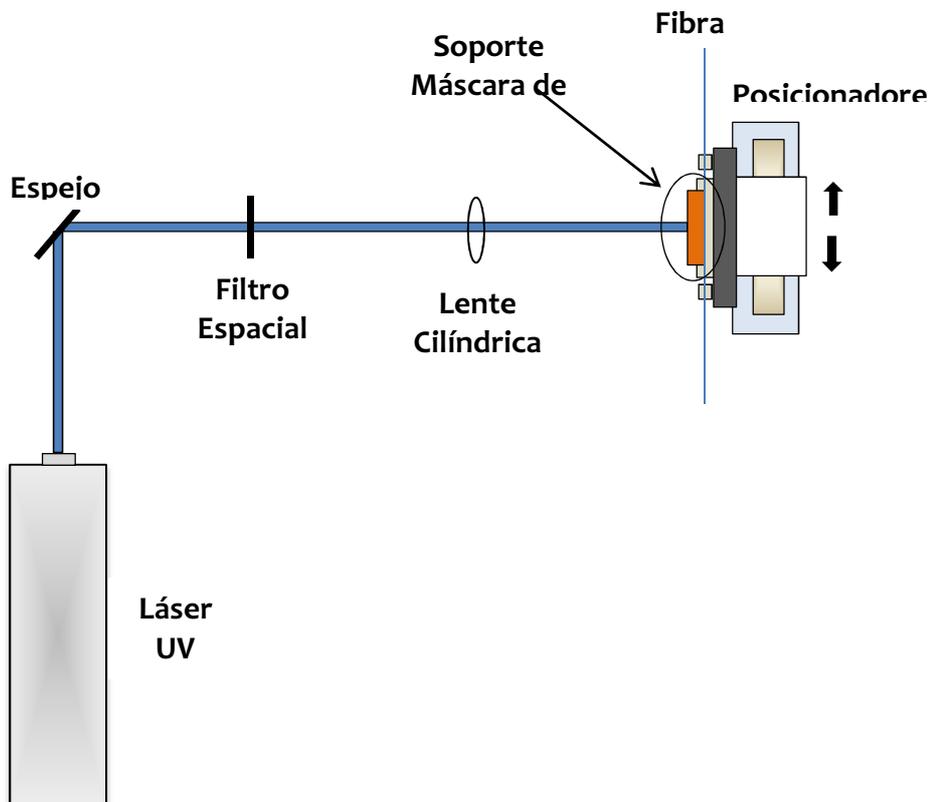


Figura 2.9: Esquema de grabado de una RDFO con máscara de fase

La siguiente figura muestra un esquema de como al hacer incidir la luz ultravioleta con ángulo de incidencia 0° , los órdenes de difracción ± 1 van a generar un patrón de interferencia cuyo periodicidad se grabará sobre la fibra, si está es colocada a la distancia en la que este patrón se genera, con un índice de modulación que dependerá de la potencia de luz ultravioleta irradiada que controlaremos a través de la velocidad de barrido de dicha luz UV manteniendo la potencia del láser constante.

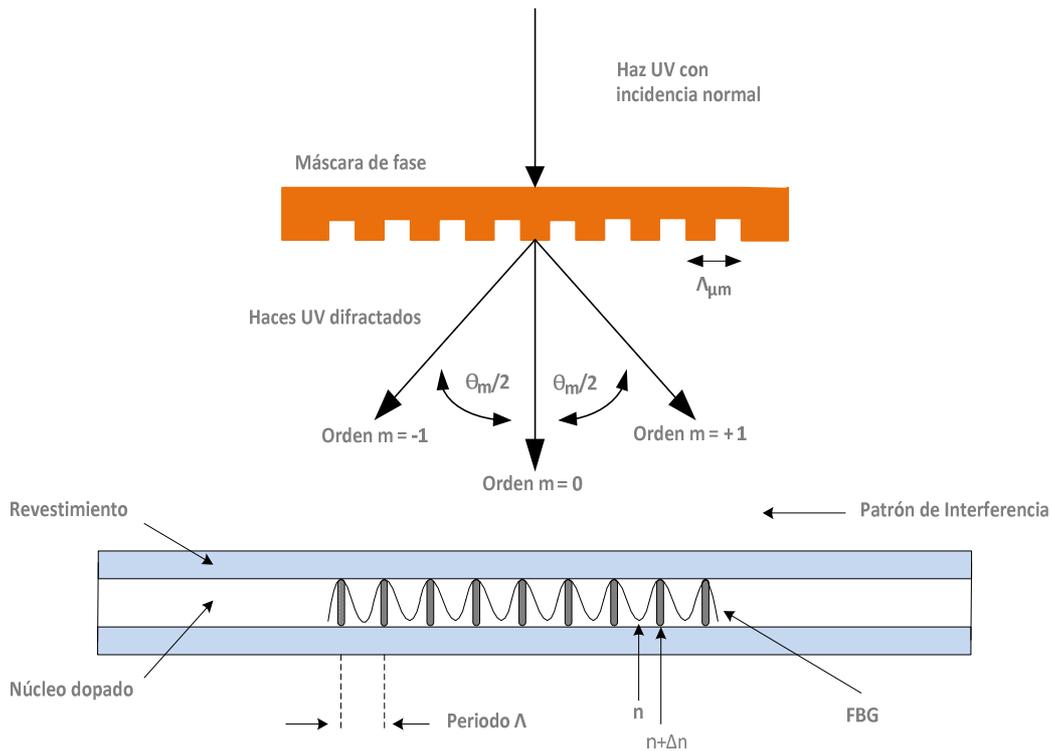


Figura 2.10: Esquema de una máscara de fase.

Con la técnica de máscara de fase se pueden grabar redes de un tamaño que superan a la anchura del haz desplazando este sobre la máscara, aunque como principal inconveniente es que la longitud de onda de Bragg es fija para una máscara dada y además la máscara es específica para una longitud de onda del láser [25].

CAPÍTULO 3

Análisis y resultados
Desplazamiento de dos RDFOs

En este capítulo se van a realizar una serie de simulaciones, en las que, en una primera parte se utilizan RDFO uniformes. El código elaborado mediante el programa MATLAB permite realizar un análisis de la influencia de parámetros fundamentales de las RDFO como son la longitud de la red de difracción, visibilidad e índice de modulación, en el espectro de reflectividad de la red. La finalidad de este proyecto radica en conseguir, mediante la técnica descrita en el capítulo anterior, del solapamiento de dos RDFOs, un filtro equivalente con un ancho de banda lo más estrecho posible, por lo tanto se simulan también el desplazamiento de estas dos redes para ver si se consigue con su espectro resultante obtener un filtro más selectivo en longitud de onda.

Posteriormente en la segunda parte se utilizan RDFO uniformes con cambio de fase, técnica que también se utiliza para la elaboración de filtros en fibra óptica. De la misma manera variaremos sus parámetros fundamentales para conseguir lograr anchos de banda lo más estrechos posibles.

Finalmente compararemos los dos procedimientos para intentar llegar a una serie de conclusiones que definan cuál de los dos procedimientos resulta más interesante para su posterior realización desde un punto de vista práctico.

Las RDFO presentan un espectro en reflexión como el mostrado en la siguiente figura 3.1. La reflectividad se calcula, para cada longitud de onda, en función de parámetros que vienen determinados por las características de la red, como el índice de refracción efectivo de la fibra óptica (n_{eff}), longitud de onda de Bragg (λ_{bragg}), amplitud de modulación de índice (Δn), longitud de la red (L) y visibilidad (v).

En la gráfica 3.1 se han obtenido los valores de reflectividad de una RDFO de 10 mm de longitud y un valor de visibilidad correspondiente a 0.2 consiguiéndose un valor máximo de reflectividad del 80%.

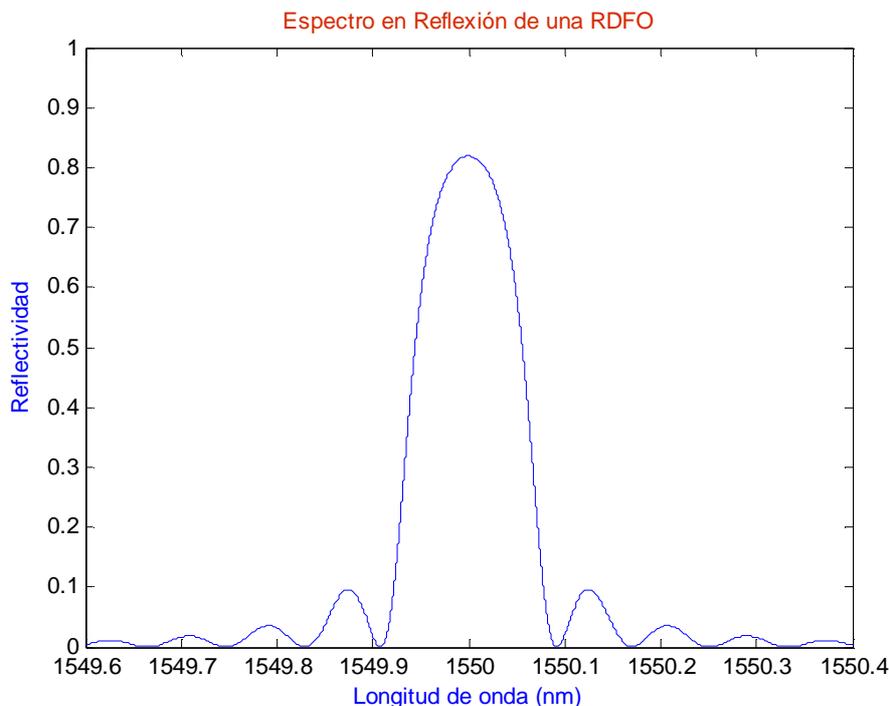


Figura 3.1: Espectro en reflexión de una RDFO.

En las simulaciones posteriores se van a manejar los parámetros principales de entrada de las RDFO que influyen en la obtención de un ancho de banda menor, como son:

- Longitud de la RDFO: como se explicó en el apartado anterior la RDFO se graba sobre un trozo de fibra óptica de longitud determinada, expresada en mm, que dependerá de la máscara de fase utilizada para generar el patrón de interferencia.
- La visibilidad de la RDFO es un parámetro que hace referencia a como se modula la amplitud del índice de refracción producido en el núcleo con valores comprendidos entre (0-1).
- Desintonización en longitud de onda entre las dos redes de difracción, parámetro que se mide con respecto a la longitud de onda a la que se sitúa la máxima reflectividad de cada una de las redes, que es algo mayor que la λ_B , debido a que al grabar la RDFO se está modificando el índice efectivo de la fibra con lo cual la longitud de onda de Bragg cambia.
- Índice de Modulación: Máximo valor que alcanza el índice de refracción a partir del valor promedio (DC).

Para cuantificar el ancho de banda se van a considerar los puntos del espectro donde existe una caída de la potencia óptica del 50% (3dB), con respecto al punto de máxima reflectividad que corresponde a la longitud de onda de Bragg, criterio ampliamente utilizado a la hora de medir anchos de banda donde intervienen espectros de señales ópticas.

Se pretende que las RDFOs utilizadas para la realización de este proyecto, sean redes que puedan operar en longitudes de onda de 1550 nm o muy próximas a este. Teniendo en cuenta esto y que en la mayoría de las fibras convencionales el valor del índice efectivo de modo fundamental está alrededor de 1.46, y considerando la condición de Bragg se tiene que el periodo de las redes con las cuales se realizan las simulaciones sea de ≈ 535 nm.

3.1 Espectro de una RDFO con respecto a la longitud de la red.

En la figura 3.2 se han representado múltiples RDFOs de diferentes longitudes (mostradas en la figura), pero del mismo valor máximo de reflectividad ($R \approx 95\%$). Para conseguir que todos los RDFO representadas tengan una reflectividad máxima del 95%, en cada una de ellas se ha ido disminuyendo el valor de la visibilidad a medida que aumentamos su longitud, siendo la menor de ellas para la red de 25 mm.

Se aprecia que a medida que aumentamos la longitud de la red el lóbulo principal de la RDFO se va haciendo más estrecho y con una caída más pronunciada, aumentando la pendiente de los lados de dicho lóbulo principal.

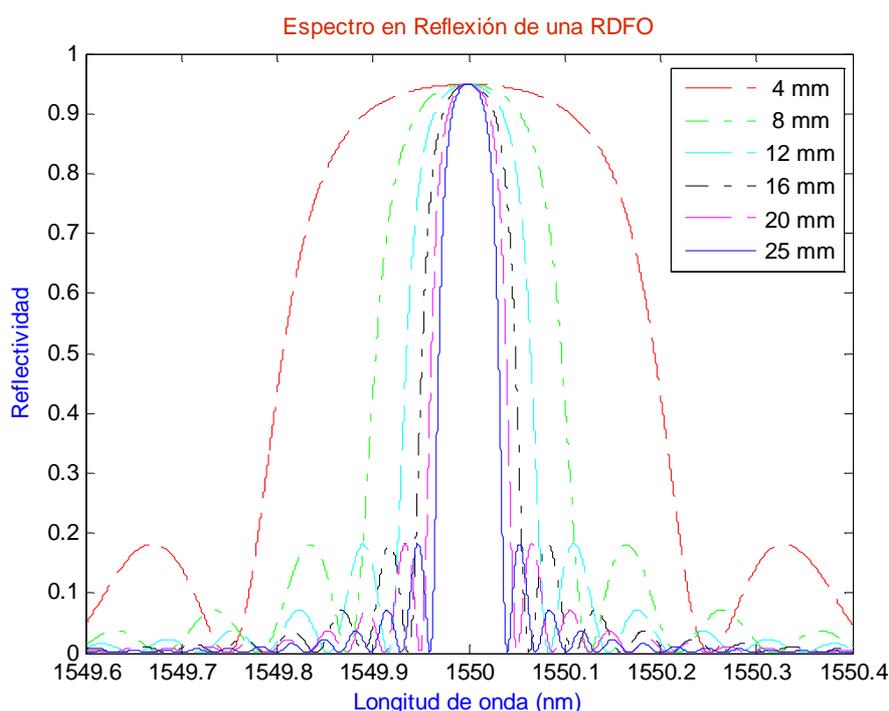


Figura 3.2: Espectro en reflexión de una RDFO de diferentes longitudes.

Al aumentar la longitud de la red y hacerse el lóbulo principal más estrecho con caídas más pronunciadas de su lados, será una de las características que analizaremos a la hora de solapar dos RDFO, puesto que al combinar dos de ellas con una alta reflectividad, un ancho de banda estrecho y desintonizarlas podremos conseguir un filtro resultante más selectivo.

En esta gráfica se aprecia claramente el aspecto descrito anteriormente de la disminución del ancho de banda con el aumento de la longitud de la red. Dicha longitud deberá ser escogida para la realización de un filtro dependiendo de los requerimientos necesarios pudiendo escogerse RDFO de longitudes más bajas si estos no son muy estrictos.

Más adelante se realizarán simulaciones para cada una de las longitudes de las RDFO de entre las que pueden ser implementadas en el Laboratorio del Departamento de Fotónica de la Universidad de Cantabria y que van desde los 4 hasta los 25 mm.

3.2 Espectro de una RDFO para diferentes constantes de acoplo.

En la figura 3.3 se ha representado la reflectividad de la RDFO para distintos valores de kL , donde k representa la constante de acoplo en "ac" y L la longitud de la red, en relación a la longitud de onda normalizada que viene dada por la siguiente expresión:

$$\frac{\lambda}{\lambda_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{L\sigma}{\pi N}} \quad (35)$$

La constante de acoplo k , tiene un valor constante para redes uniformes a lo largo del eje z y viene dada por:

$$k = \frac{\pi}{\lambda} v \overline{\delta n_{eff}} \quad (36)$$

donde v es el valor de visibilidad correspondiente y $\overline{\delta n_{eff}}$ representa el valor del índice de modulación.

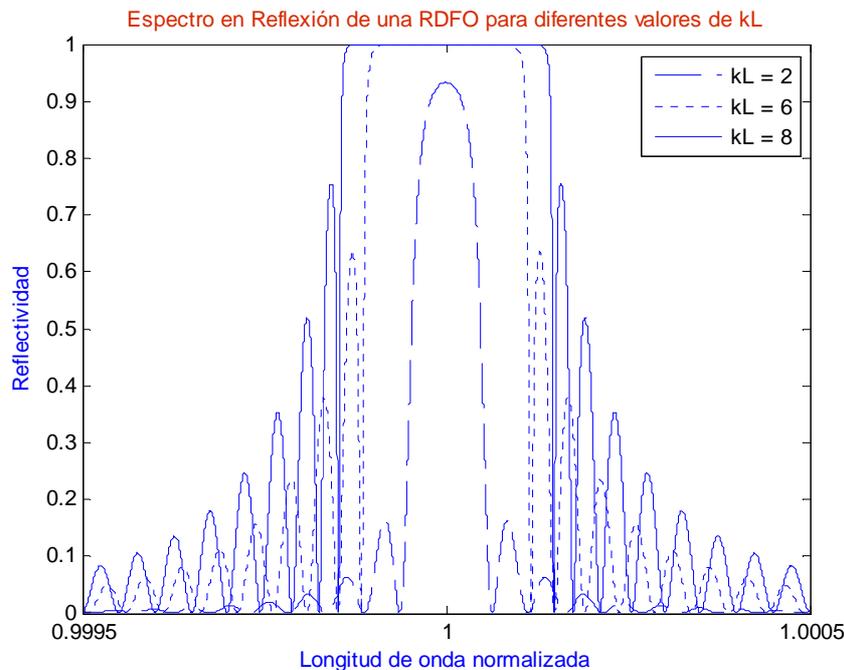


Figura 3.3: Espectro en reflexión de una RDFO para $kL = 2, 6, 8$.

En la simulación se ha ido variando el índice de modulación $\overline{\delta n_{eff}}$ con valores de 0,0001, 0,0002 y 0,0004 con los que se consiguen respectivamente valores de $kL = 2, 6, 8$. La longitud de la red se corresponde con 10 mm. Se pone de manifiesto que al aumentar el índice de modulación de la red, aumenta la reflectividad hasta alcanzar el valor máximo, aumentando también el ancho de banda llegando incluso a saturarse la red.

Puesto que el aumento del índice modulación es uno de los parámetros que satura la red, se hace necesario que posteriormente se realicen simulaciones del índice de modulación máximo admisible para distintas longitudes de la RDFO y longitudes de onda central en la que se apreciará como varía este índice.

3.3 Simulación del índice de modulación máximo admisible.

El índice de modulación es un parámetro que afecta proporcionalmente a los valores de reflectividad, de tal manera que al aumentar este parámetro se puede llegar a la saturación de la RDFO. Hay que tener en cuenta los valores admisibles del índice de modulación que no saturan la red y por lo tanto resulta interesante que se realice un estudio de los valores aceptables que garanticen que la realización de un filtro puede ser viable sin que existan problemas de saturación.

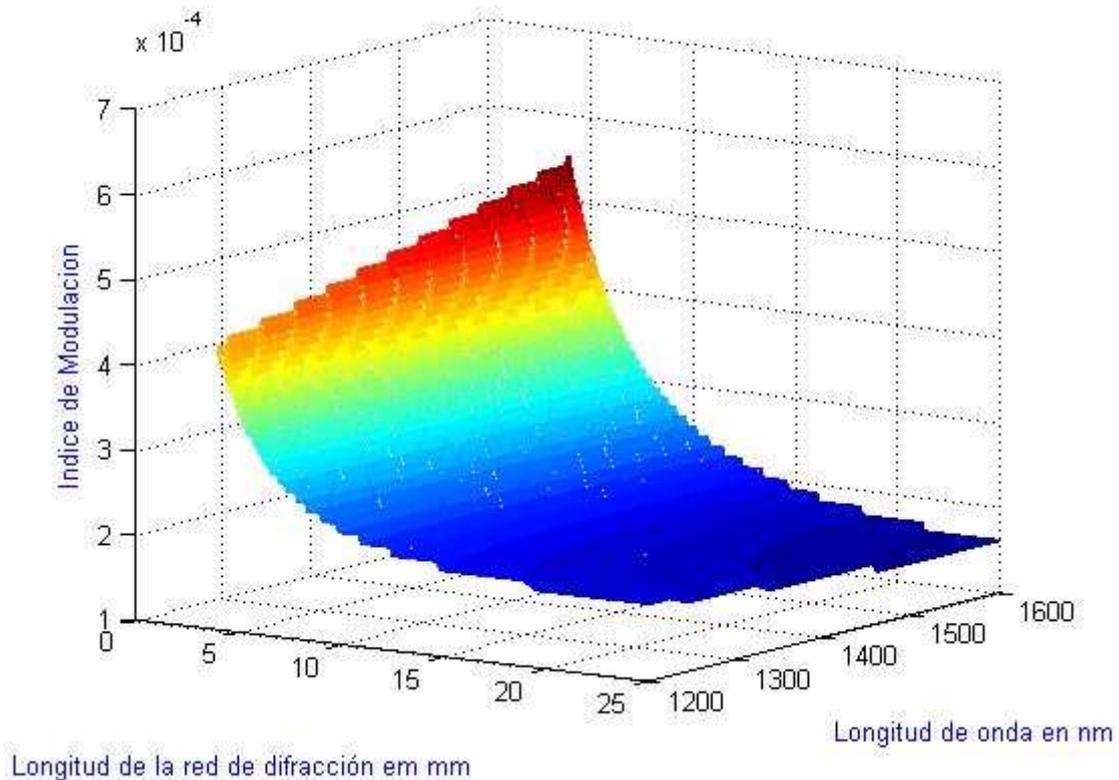


Figura 3.4: Evolución del Índice de Modulación con respecto a la longitud de la red y λ_B .

En esta gráfica se ha simulado, en función de la longitud de la red y la longitud de onda central, los valores del índice de modulación que no saturan la red. Se ha considerado que está saturada, cuando en la zona de puntos del espectro de máxima reflectividad se encuentran más de un 15% de todos los puntos de dicho espectro, que alcanzan un valor del 99% de reflectividad, para ello se ha simulado el espectro con un número de puntos de 1000.

En la figura 3.4 se ha obtenido la gráfica de una RDFO, en la que se han ido obteniendo los índices de modulación máximos, que no saturan la red, al ir variando la longitud y el periodo de esta. A medida que se aumenta la longitud se observa que el índice de modulación máximo admisible que no satura la red va disminuyendo, hecho que ya se puso de manifiesto en la gráfica 3.3, aunque en este apartado se han obtenido los valores para una rango de longitudes de onda que van desde los 1300 hasta los 1600 nm.

En la gráfica se aprecia, como ya hemos comentado en el párrafo anterior, que a medida que aumenta la longitud de la red se hace necesario disminuir el índice de modulación para evitar la saturación, en cambio para una longitud de RDFO de un determinado valor, sobre todo para longitudes pequeñas, a medida que aumenta la longitud de onda central de Bragg el índice de modulación admisible es mayor. En la red de 4 mm obtenemos un índice de modulación máximo de 0,00029 para una longitud de onda central de 1200 nm y un índice 0,0039 para una con longitud de onda central de 1600 nm. A medida que vamos tomando valores más altos para la longitud de la red los valores admisibles de índice de modulación si aumentamos la longitud de onda central de Bragg van estrechándose en rango hasta llegar a la red de 25 mm en la que con un valor de índice de 0,00005 la red se satura para una λ de 1200 nm llegando solo su valor a 0,00007 para la red de 1600 nm.

3.4 Visibilidad.

A continuación se muestra como los diferentes valores de visibilidad afectan al espectro de la RDFO en reflexión. Para un índice de modulación promedio determinado, el aumento o la disminución de la visibilidad tiene una influencia clara en el ancho de banda de la RDFO pudiendo provocar incluso la saturación de esta si aumentamos demasiado su valor.

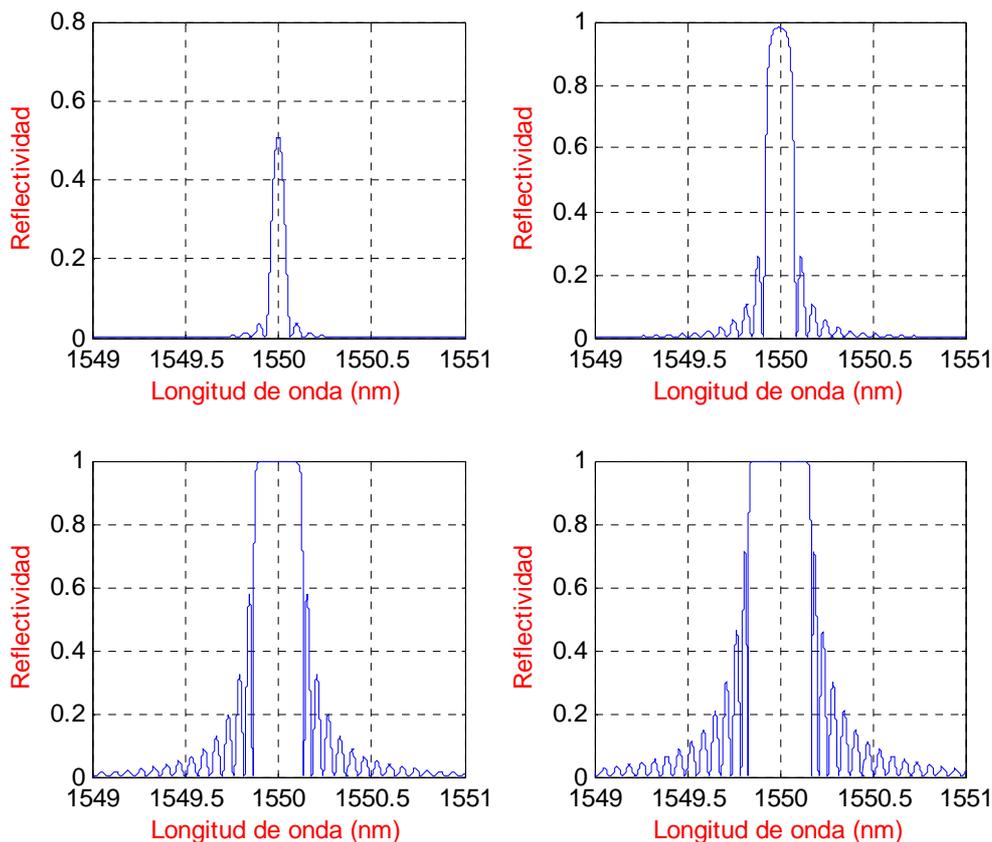


Figura 3.5: (a) RDFO con $v=0.1$. (b) RDFO con $v=0.3$ (c) RDFO con $v=0.6$
(d) RDFO con $v=0.8$.

En la figura de arriba 3.5 se aprecia cómo afecta la variación de la visibilidad teniendo una relación directa con el aumento/disminución del espectro en reflexión de la RDFO.

Las cuatro figuras representadas en la parte de arriba se han simulado con un índice de modulación de 0.00037 y con una longitud de la RDFO para todas ellas de 12 mm. A partir de la figura 3.5 (a) en la que el valor de visibilidad correspondiente es de 0.1 se aprecia que a medida que aumentamos este valor el espectro resultante cambia, aumentando su valor máximo, teniendo una caída más abrupta de los lados del lóbulo principal y cómo podemos apreciar en la figura 3.5 (c) aumentando también sus lóbulos laterales. Al aumentar la visibilidad el ancho de banda también sufre variaciones por el crecimiento del espectro, llegando a saturar la red si este crecimiento fuera elevado y donde a partir de un determinado valor su ancho de banda también empezará a aumentar, situación que no nos interesa desde el punto de vista de la realización del filtrado óptico.

Por otro lado el crecimiento de los lóbulos laterales es una situación no deseada que hará inviable en la práctica que consigamos un buen filtro debido a la potencia óptica que existe en estos lóbulos.

En las simulaciones posteriores se tendrá en cuenta cómo afecta la visibilidad en el espectro en reflexión, haciendo previamente un estudio de los valores de esta en los que se obtendrán los valores límite dentro de los cuales la red no esté saturada y sus lóbulos laterales tengan una potencia óptica que no sobrepase un determinado valor para hacer viable la realización práctica del filtro.

A la hora de realizar un filtro óptico mediante el solapamiento de dos RDFOs es importante tener en cuenta los efectos que puede provocar la saturación de la red, así como el aumento de los lóbulos laterales. La saturación de la red como se ha explicado con anterioridad se puede deber, entre otros factores, al aumento de la visibilidad, Figura 3.5 o al aumento del índice de modulación, Figura 3.3.

En la figura 3.6 (a) se ha representado el espectro de una RDFO saturada, como consecuencia del aumento del índice de modulación (0,0004) de la red que tiene una longitud de 12 mm, este valor de índice se ha obtenido del apartado 3.3 que garantiza que la red está saturada, y en la cual se ve que hay una zona plana del espectro donde existen gran cantidad de valores máximos de reflectividad, y se aprecia el aumento de los lóbulos laterales cuya reflectividad está por encima del 60%. En la figura 3.6 (b) vemos el espectro de RDFO2, desintonizada 138,94 pm con respecto a la primera, también saturada y con unos lóbulos laterales por encima del 60%.

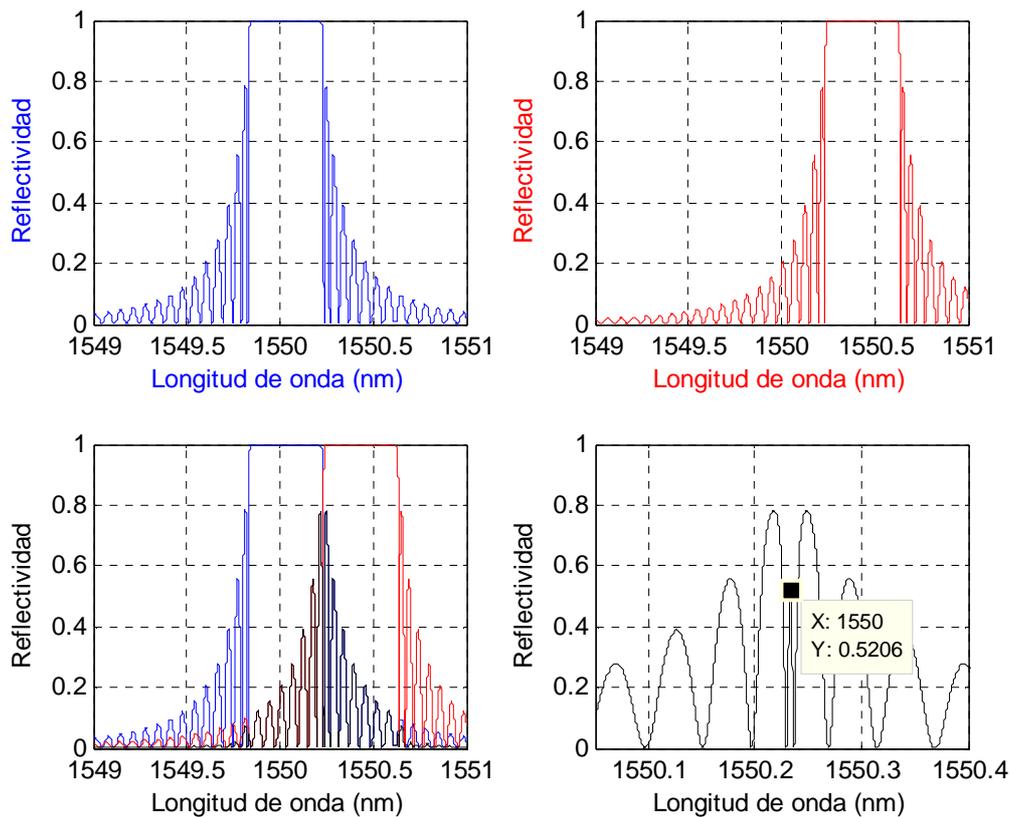


Figura 3.6: (a) RDFS1 saturada. (b) RDFS2 saturada (c) Solapamiento de RDFS1 y RDFS2 (d) Espectro resultante del solapamiento.

Un problema a tener en cuenta cuando la red está saturada consiste en el crecimiento de los lóbulos laterales del espectro, por donde se refleja una cantidad de potencia óptica importante, pero que corresponde a longitudes de onda cercanas a la longitud de onda que nos interesa filtrar. En estas longitudes de onda cercanas es importante que la potencia reflejada tenga un valor razonable. La consecuencia de tener unos lóbulos laterales con una reflectividad elevada la encontramos en que cuando solapamos y desintonizamos dos espectros saturados vamos a obtener un espectro con una reflectividad equivalente resultante cuando se realiza el desplazamiento que puede llegar a ser menor que el valor de los lóbulos laterales, siendo inviable el filtro.

Finalmente en este apartado se realiza una gráfica que muestra cómo evoluciona el ancho de banda de una sola RDFS de fibra óptica a medida que aumenta su longitud y se aumentan los valores de visibilidad hasta el punto en el que la red este saturada. Se realiza un estudio previo de los valores límite aceptables de visibilidad para cada longitud de la red (4-25mm) desde un valor de 0.01 hasta que se produzca la saturación de la red en el momento en el que el espectro tiene un 15% de puntos con valores máximos por encima del 99% de reflectividad.

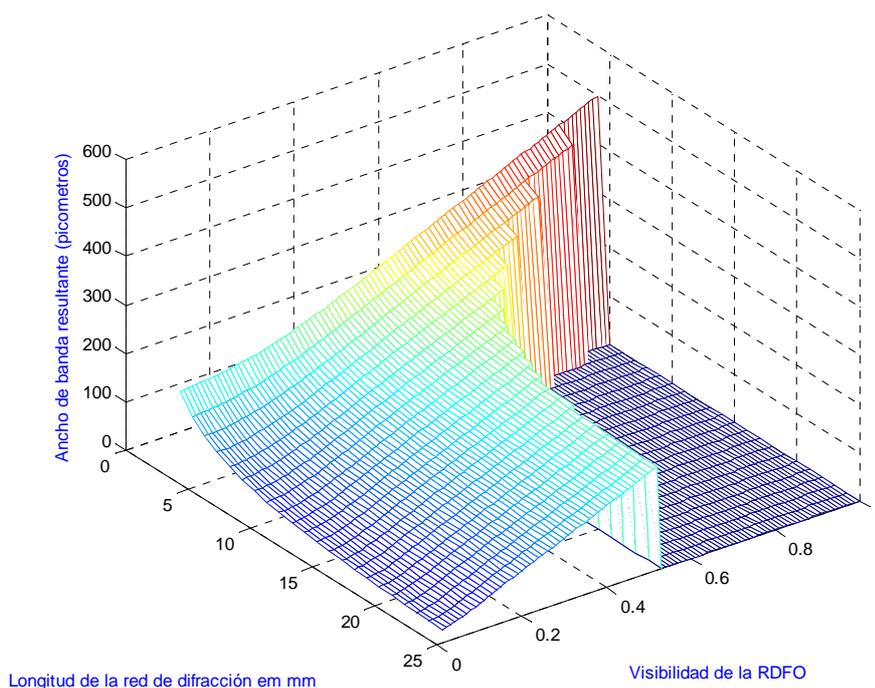


Figura 3.7: Evolución de BW con respecto a la visibilidad y longitud de la red

La matriz de valores de visibilidad admisibles tiene una dimensión de 22x100, correspondiendo a las 22 longitudes posibles (4-25mm) como se puede apreciar en la gráfica y a los 100 valores que van desde 0.01 hasta el máximo de 1 para la visibilidad. En la gráfica se puede apreciar una zona de ancho de banda con valores nulos, correspondientes a una zona en la cual la red está saturada.

Se aprecia que para longitudes más pequeñas calculadas podemos llegar al máximo valor de v ($v=1$), y como a medida que aumentamos este parámetro el ancho de banda aumenta. A medida que aumenta la longitud se llega a un punto límite de visibilidad en la cual la gráfica cae de forma brusca hasta un valor nulo. La gráfica muestra como aspecto más importante como a medida que aumenta la longitud dentro de un mismo valor de visibilidad el ancho de banda se hace más pequeño.

3.5 Simulación de la variación del ancho de banda de la red.

Para el filtrado óptico con RDFOs uno de los principales puntos de interés radica en el ancho de banda de la red a implementar. Por lo tanto se ha realizado una simulación de la variación del ancho de la red con respecto también a la longitud de esta y su longitud de onda central de Bragg dada la importancia que tiene este aspecto en los filtros.

En la simulación del apartado 3.1 hemos obtenido una serie de valores de índice de modulación admisibles para que la red no se saturara, con el valor máximo de visibilidad ($v=1$) posible, consiguiendo una matriz de 1382x211 puntos con los valores para cada una de los valores de longitud (4-25 mm) y longitudes de onda (1200-1600 nm) que se representaron en dicha simulación. Nos hemos servido de esta

matriz para esta simulación, con lo cual hemos garantizado que la red no estuviera saturada en los resultados obtenidos.

Para medir el ancho de banda, hemos utilizado el criterio antes comentado del 50% (3 dB) de caída de potencia, punto en el cual se ha realizado la medición.

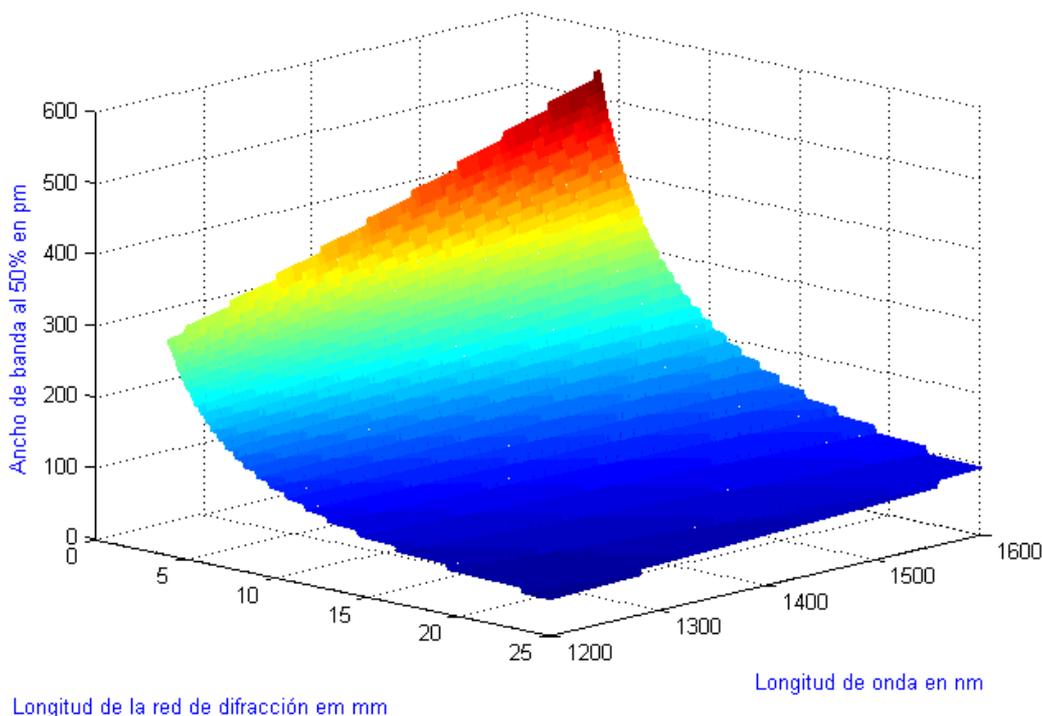


Figura 3.8: Evolución de BW con respecto a la longitud de la red y λ_B .

En la figura 3.8 se ha simulado una RDFO con un valor de visibilidad de 1. El hecho de haber utilizado la matriz de valores del índice de modulación del apartado anterior garantiza que la red no está saturada, pero también que sus valores de reflectividad son óptimos para medir el ancho de banda cuando la potencia óptica decae 3 dB.

Dentro del rango de los valores simulados se aprecia de forma clara la disminución del ancho de banda BW (50%) de la red de difracción, al aumentar la longitud de la red (4-25mm)

Si dentro de un mismo valor de longitud de la red, vamos aumentando la longitud de onda central de Bragg, vemos que su ancho de banda aumenta, siendo este aumento más pronunciado para longitudes de red pequeñas.

Para comprender de una forma más clara este último aspecto se han representado en la figura 3.9 los espectros de dos RDFOs para 4 mm y 25 mm.

En la figura 3.9 (a) se ha representado una RDFO de 4 mm con una longitud de onda central de 1200 nm la cual tiene un BW de 301,4 pm, frente a otra red de 4 mm, figura 3.9 (b) pero con una λ_B de 1600 nm con un ancho de banda de 539,1 nm.

Se puede ver claramente comparando el espectro entre las dos figuras, como aumenta el ancho de banda medido al 50% de reflectividad entre las dos redes. Cuando representamos una RDFO de 25 mm frente a las dos λ_B , obtenemos un ancho de banda para la RDFO de 1200 nm de 51,2 nm frente a 94,2 nm de la RDFO de 1600 nm, también apreciándose que el ancho de banda aumenta a medida que aumenta la longitud de onda central de Bragg pero viéndose que a medida que la longitud crece el rango entre los anchos de banda (para 1200-1600 nm) se hace más estrecho.

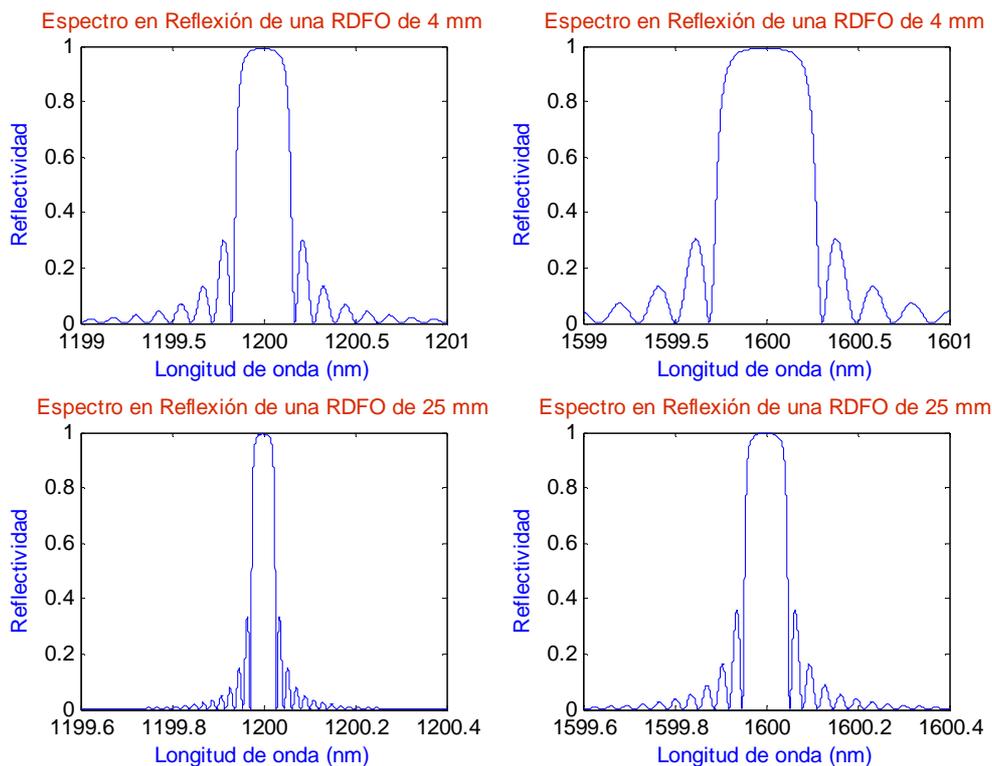


Figura 3.9: Espectro en reflexión de dos RDFOs de 4mm y 25mm.

3.6 Simulación del BW con respecto al desplazamiento de las dos RDFOs.

Una vez puestos de manifiesto en los apartados anteriores los aspectos mas importantes de las RDFOs con respecto a sus parámetros principales como longitud, visibilidad, índice de modulación, etc.. en este apartado se va a realizar un análisis detallado de la variación del ancho de banda para diferentes longitudes, visibilidad, reflectividad y desplazamiento de la RDFO.

Para poder comparar esta técnica de filtrado con los resultados que se obtendrán mas adelante a través de un filtro implementado con la técnica de cambio de fase, se han obtenido una serie de gráficas pormenorizadas que engloban los aspectos mas importantes de RDFOs que pueden influir en el filtrado óptico.

Se ha partido de una λ_B de 1550 nm, longitud de onda muy común en las comunicaciones ópticas.

Para realizar un análisis amplio a través de esta técnica se parte del solapamiento inicial de dos espectros, inicialmente sin estar desintonizados (desplazamiento inicial 0), en los que el espectro de reflectividad resultante obtenido a través del producto punto a punto de cada uno de los dos espectros de referencia tomara unos valores iniciales máximos del 50%, 70%, 90%, 99% y 100%.

Cada uno de estos valores iniciales de reflectividad del espectro resultante se simulará para cada una de las longitudes de RDFOs posibles (4-25mm) para obtener sus anchos de banda a medida que aumentamos la desintonización de uno de ellos sobre el otro hasta alcanzar un punto de máximo desplazamiento que vendrá dado cuando el espectro resultante alcance un valor máximo de reflectividad del 25%, momento en el cual se hace inviable el filtrado o cuando los lóbulos laterales del espectro resultante tengan un valor elevado y el desplazamiento estará condicionado a que el valor del lóbulo central este por encima de dichos lobulos laterales.

De los valores obtenidos en el apartado 3.1 se ha obtenido que para una visibilidad ($v=1$) máxima, y una longitud de onda central de 1550 nm el índice de modulación máximo admisible para una red de 4 mm es de 0,00037 y para una de 25 mm es de 0,00006 donde se pone de manifiesto que a medida que la longitud aumenta su índice máximo admisible que no sature la red decrece.

En la figura 3.10 (a) se ha representando una RDFO de 4 mm con un índice de modulación de 0.00006 un valor de visibilidad de 1; en la figura 3.10 (b) una RDFO de 25 mm con un índice de modulación de 0.00037 y un valor de visibilidad de 0.179. Podemos concluir que si se elige un índice de modulación muy bajo para las simulaciones posteriores, en la red de 4 mm, aunque aumentemos el valor de visibilidad al máximo, solamente se va a conseguir un valor máximo de reflectividad de 20,38%, por el contrario si escogemos un índice de modulación de 0.00037 la red de 25 mm no se satura empleando un valor de visibilidad bajo.

Para las simulaciones siguientes se ha escogido un valor para el índice de modulación de 0,00037 el cual nos permite ir decrementado el valor de visibilidad a partir de su valor máximo ($v=1$), y así obtener los valores iniciales del espectro resultante comentados anteriormente para las distintas longitudes de la red.

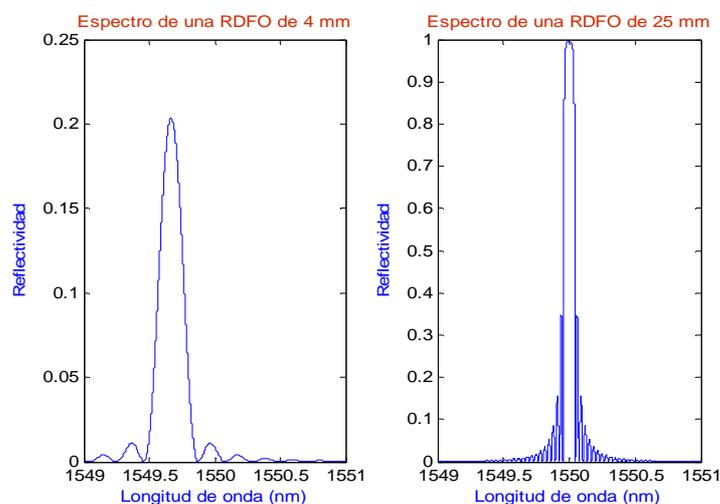


Figura 3.10: (a) Espectro de una RDFO con I. de Modulación de 0,00006
(b) Espectro de una RDFO con I. de Modulación de 0,00037.

Para ello se ha elaborado mediante el programa Matlab un código en el que obtenemos el valor de visibilidad adecuado para el cual los dos espectros tienen un valor máximo de reflectividad cuyo producto nos da respectivamente valores de reflectividad máximos del espectro resultante del 50%, 70%, 90%, 99% y 100%. A continuación y en las gráficas posteriores se muestra este valor para cada una de las longitudes de red estudiadas y para cada una de las reflectividades iniciales del estudio.

	Longitud de la red (mm)										
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
50%	0,409	0,327	0,273	0,234	0,205	0,182	0,164	0,149	0,137	0,126	0,117
70%	0,519	0,415	0,346	0,297	0,260	0,231	0,208	0,189	0,173	0,160	0,149
90%	0,722	0,578	0,482	0,413	0,361	0,321	0,289	0,263	0,241	0,223	0,207
99%	1,000	0,891	0,743	0,637	0,557	0,495	0,446	0,405	0,372	0,343	0,319
100%	1,000	1,000	1,000	1,000	0,941	0,837	0,753	0,685	0,628	0,580	0,538

Tabla 3.1: Valores de visibilidad calculados para conseguir las reflectividades iniciales y para una longitud de red de difracción de 4-14 mm

	Longitud de la red (mm)										
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
50%	0,109	0,130	0,097	0,091	0,086	0,082	0,078	0,075	0,071	0,069	0,066
70%	0,139	0,130	0,123	0,116	0,110	0,104	0,099	0,095	0,091	0,087	0,083
90%	0,193	0,181	0,170	0,161	0,152	0,145	0,138	0,132	0,126	0,121	0,116
99%	0,297	0,279	0,262	0,248	0,235	0,223	0,213	0,203	0,194	0,186	0,179
100%	0,502	0,417	0,443	0,419	0,397	0,377	0,359	0,343	0,328	0,314	0,302

Tabla 3.2: Valores de visibilidad calculados para conseguir las reflectividades iniciales y para una longitud de red de difracción de 15-25 mm

Para medir la evolución del ancho de banda se parte de una situación inicial en la que los espectros se encuentran totalmente solapados y posteriormente se van a ir desintonizando, incrementando el desplazamiento existente entre ellos hasta alcanzar el límite de desplazamiento posible.

En la gráfica 3.11 se muestra la situación inicial en la que los espectros están totalmente solapados, con una reflectividad del espectro resultante del 50%, línea con trazo negro. Para ello previamente se ha calculado el valor de visibilidad adecuado (en este caso $v=0.409$) con el que se consigue un valor máximo de cada espectro de 0.7084, que se encuentran superpuestos dado que el desplazamiento entre ellos es 0 (línea de color rojo). Inicialmente el ancho de banda de cada uno de los espectros, medidos cuando la potencia decae al 50% (3 dB) es de 271,7 pm, siendo para el espectro resultante de 216 pm.

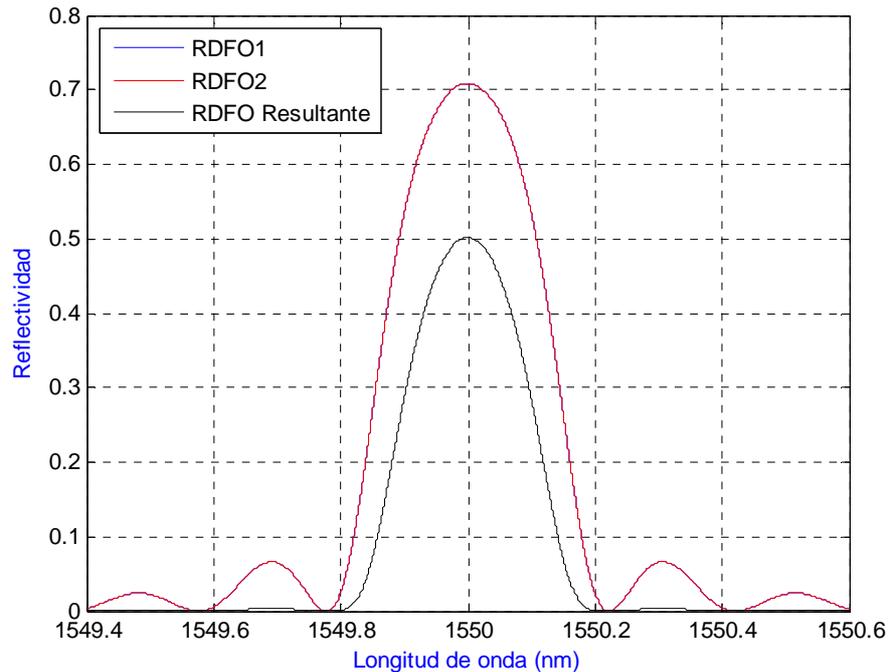


Figura 3.11: Solapamiento de dos RDFOs y espectro resultante.

En la figura 3.12 se han desintonizado las dos redes hasta llegar al límite en el cual el valor máximo del espectro resultante es del 25%, se observa como los dos espectros de las RDFOs se cortan en el punto de reflectividad 0.5. La reflectividad resultante ha ido disminuyendo de valor pero se mejora la capacidad de filtrado puesto que partíamos de una situación inicial de ancho de banda del espectro resultante de 216 pm para un desplazamiento inicial de 0 y ahora se obtiene un ancho de banda de 109 pm para un desplazamiento total de una de las redes sobre la otra de 216,4 pm.

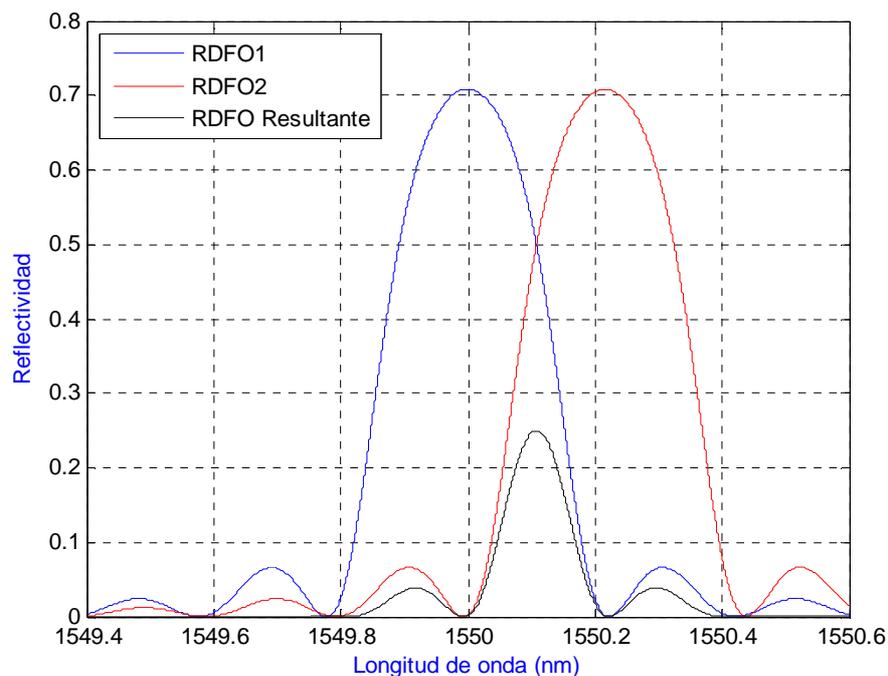


Figura 3.12: 2 RDFOs desintonizadas con espectro resultante en el límite del desplazamiento.

En la gráfica 3.13 se muestra también la situación inicial en la cual los dos espectros están totalmente solapados, con una reflectividad del espectro resultante del 99%, línea con trazo negro. Para ello se ha calculado un valor de visibilidad adecuado (en este caso $v=0.372$) con el que se consigue un valor máximo de cada espectro de 0.9951, que se encuentran superpuestos dado que el desplazamiento entre ellos es 0 (línea de color rojo). Se pone de manifiesto en esta figura que a medida que aumentamos la longitud de la red, la reflectividad máxima de esta va aumentando, con caídas laterales del lóbulo principal más abruptas y donde se aprecia claramente en la figura un aumento de los lóbulos laterales por donde existe una potencia óptica importante muy cercana a la longitud de onda que nos interesa filtrar. En este caso se parte de un ancho de banda de los espectros solapados de 180,4 pm y del espectro resultante de 171,4 pm.

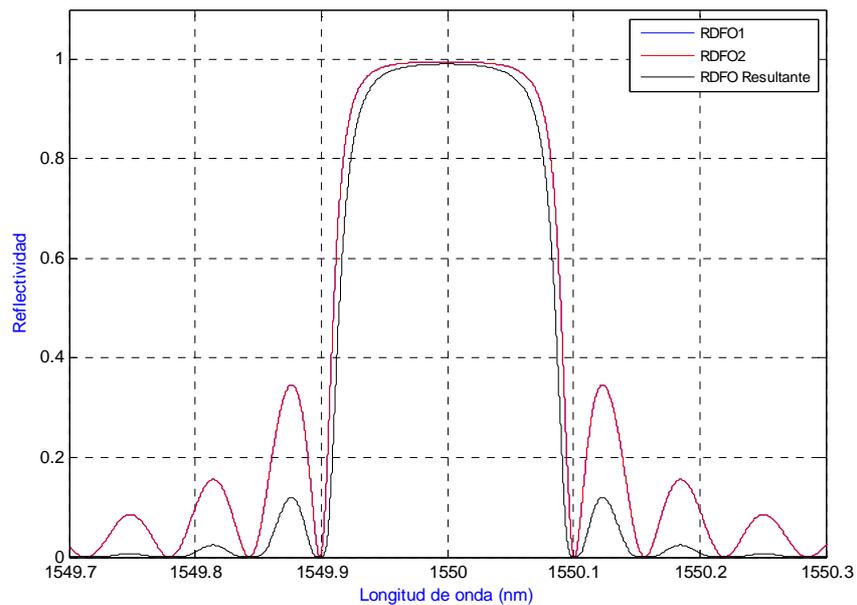


Figura 3.13: Solapamiento de dos RDFOs y espectro resultante.

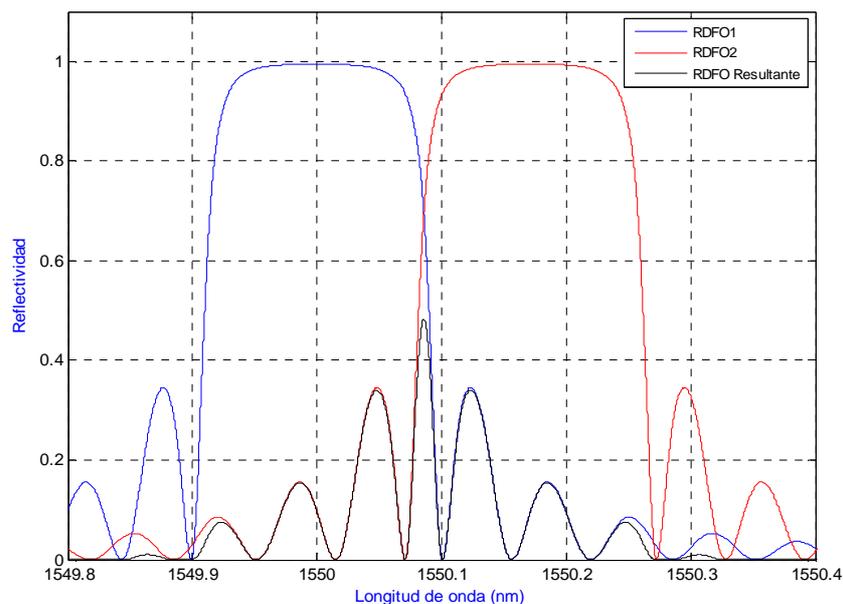


Figura 3.14: 2 RDFOs desintonizadas con espectro resultante y lóbulos laterales.

En esta figura 3.14 se pone claramente de manifiesto que a medida que vamos desintonizando una red sobre la otra el espectro resultante tiene un ancho de banda más pequeño, situación que es importante a la hora del filtrado óptico. Se parte de una situación de 171,4 pm de ancho de banda con los espectros totalmente solapados y se consigue llegar a 15,8 pm cuando alcanzamos el límite del desplazamiento, que en este caso se ha seguido otro criterio para alcanzar dicho límite puesto que los lóbulos laterales alcanzan una reflectividad con un valor más alto del 25%, por lo tanto no podemos desplazar los dos espectros hasta que el lóbulo principal de su resultante llegue a este valor. En la gráfica se aprecia que el valor máximo del lóbulo principal de la reflectividad resultante está por encima del valor de sus lóbulos laterales que en este caso es de 0.3459. Se plantea la necesidad de realizar un estudio previo de los valores que alcanzan los lóbulos laterales en los espectros inicialmente, sin estar desintonizados, para saber qué criterio de desplazamiento máximo aplicar al ser desplazados.

	Longitud de la red (mm)							
	4	5	6	7	8	9	10	11
50%	6,63%	6,62%	6,65%	6,65%	6,66%	6,65%	6,66%	6,65%
70%	10,26%	10,25%	10,26%	10,29%	10,30%	10,29%	10,30%	10,29%
90%	18,12%	18,14%	18,16%	18,15%	18,12%	18,13%	18,14%	18,17%
99%	29,80%	34,49%	34,52%	34,54%	34,51%	34,50%	34,55%	34,50%
100%	29,80%	39,88%	48,85%	56,52%	60,06%	60,09%	60,07%	60,10%

Tabla 3.3: Reflectividad máxima (%) de los lóbulos laterales del espectro resultante con desplazamiento inicial 0 (4-11mm)

	Longitud de la red (mm)							
	12	13	14	15	16	17	18	19
50%	6,65%	6,65%	6,65%	6,62%	6,72%	6,73%	6,65%	6,62%
70%	10,26%	10,30%	10,35%	10,34%	10,30%	10,40%	10,37%	10,39%
90%	18,16%	18,23%	18,22%	18,19%	18,20%	18,14%	18,23%	18,12%
99%	34,59%	34,54%	34,61%	34,50%	34,59%	34,49%	34,59%	34,60%
100%	60,11%	60,14%	60,09%	60,07%	60,11%	60,08%	60,15%	60,16%

Tabla 3.4: Reflectividad máxima (%) de los lóbulos laterales del espectro resultante con desplazamiento inicial 0 (12-19mm)

	Longitud de la red (mm)					
	20	21	22	23	24	25
50%	6,66%	6,65%	6,74%	6,61%	6,78%	6,74%
70%	10,30%	10,29%	10,39%	10,41%	10,37%	10,25%
90%	18,25%	18,23%	18,29%	18,23%	18,29%	18,25%
99%	34,55%	34,68%	34,61%	34,57%	34,59%	34,70%
100%	60,14%	60,13%	60,18%	60,16%	60,11%	60,20%

Tabla 3.5: Reflectividad máxima (%) de los lóbulos laterales del espectro resultante con desplazamiento inicial 0 (20-25mm)

De los valores máximos de los lóbulos laterales obtenidos en las tablas anteriores se puede determinar que para reflectividades iniciales del espectro resultante del 50% y del 70% para cualquier longitud de la red se puede realizar el desplazamiento hasta que la reflectividad resultante sea del 25%, pero para reflectividades iniciales del 90%, 99% y 100% el desplazamiento estará limitado por dichos lóbulos laterales no siendo posible que el lóbulo principal sea inferior en valor de reflectividad que estos.

A continuación se han obtenido una serie de gráficas que muestran las diferentes curvas con la evolución del ancho de banda equivalente que se obtiene para cada reflectividad inicial en estudio y a medida que aumentamos el desplazamiento de las RDFOS hasta el criterio límite en cada caso.

Las diferentes curvas obtenidas son de utilidad en la medida que aportan información sobre la capacidad de filtrado que es posible obtener con RDFOs que van desde una longitud de 4 mm hasta 25 mm. Se describe debajo de cada gráfica el ancho de banda máximo (BW Max) el cual corresponde a la red sin desplazamiento inicial, el ancho de banda mínimo (BW Min) que corresponde al punto de máximo desplazamiento y el total de la desintonización, desplazamiento en pm a la que se somete a la red.

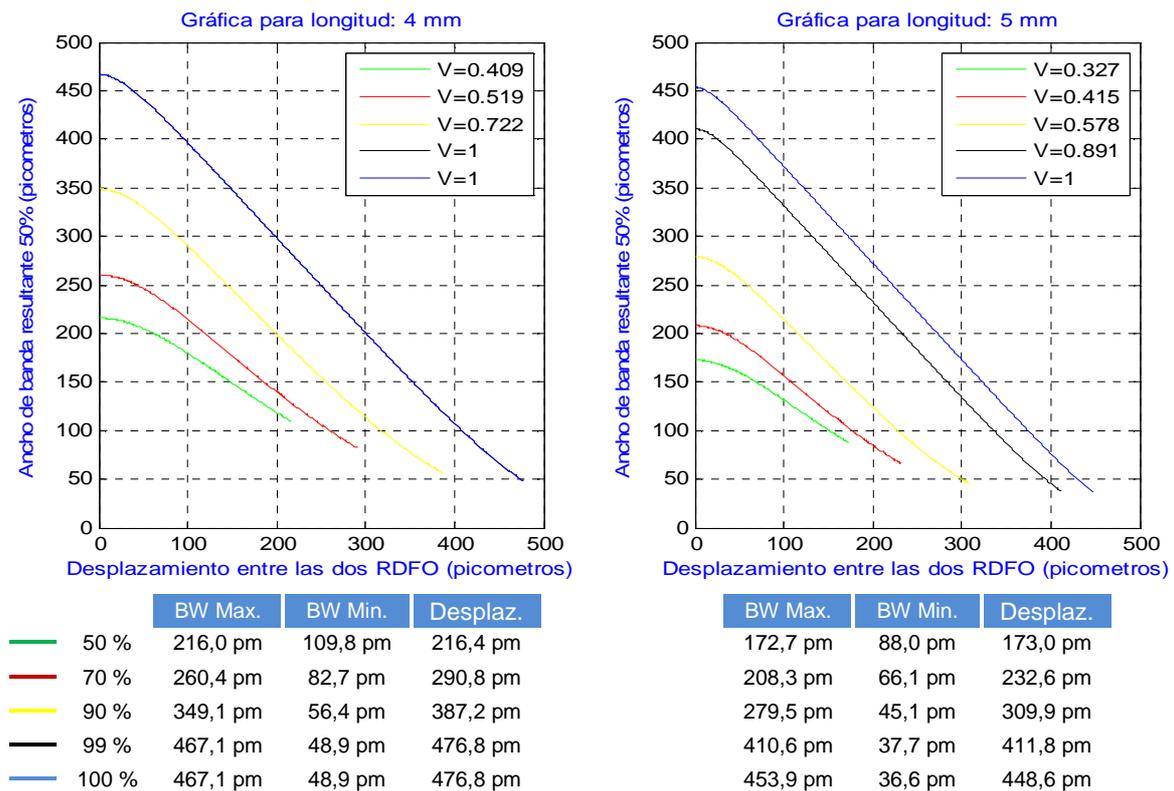


Figura 3.15: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 4 y 5 mm, en función del desplazamiento.

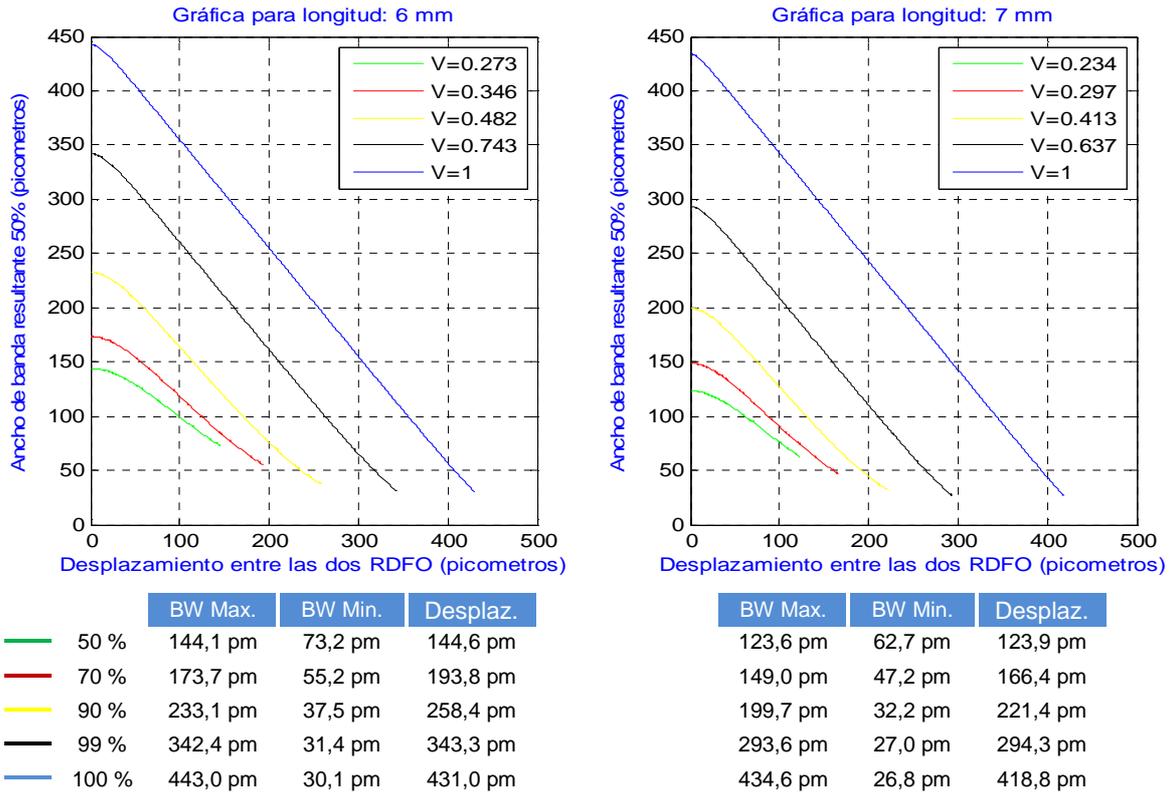


Figura 3.16: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 6 y 7 mm, en función del desplazamiento.

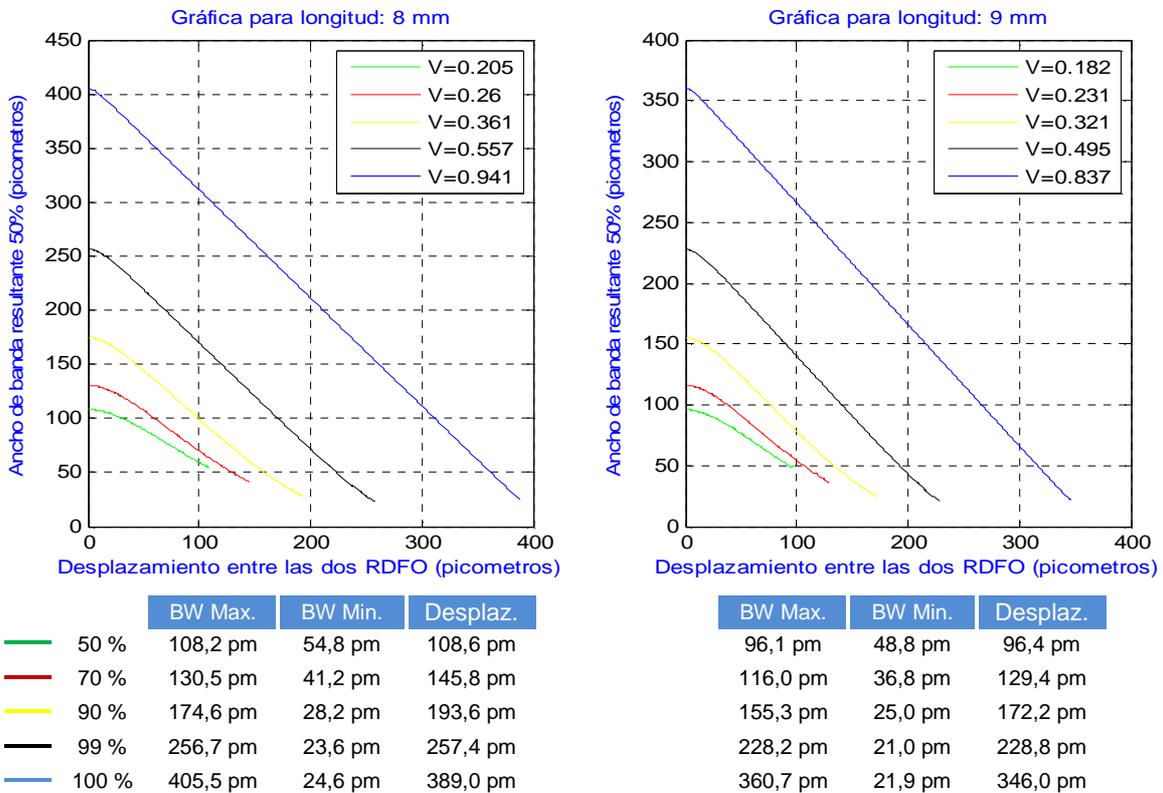


Figura 3.17: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 8 y 9 mm, en función del desplazamiento.

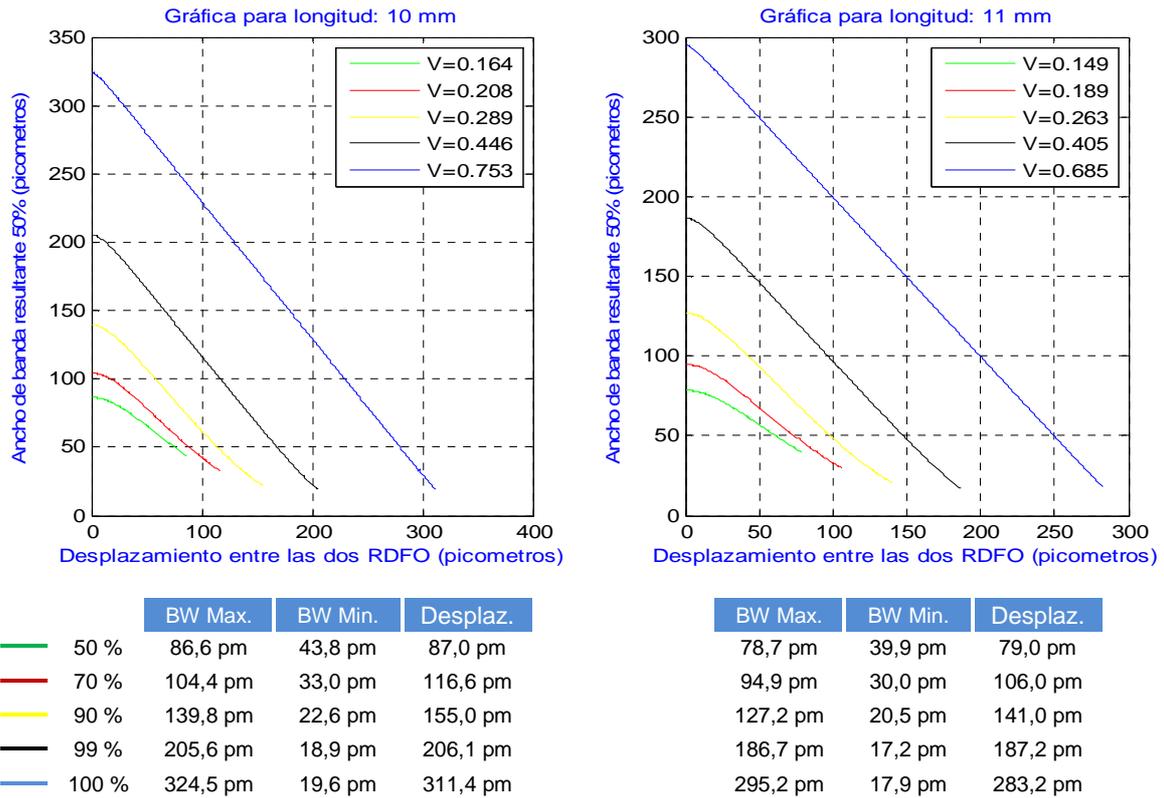


Figura 3.18 Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 10 y 11 mm, en función del desplazamiento.

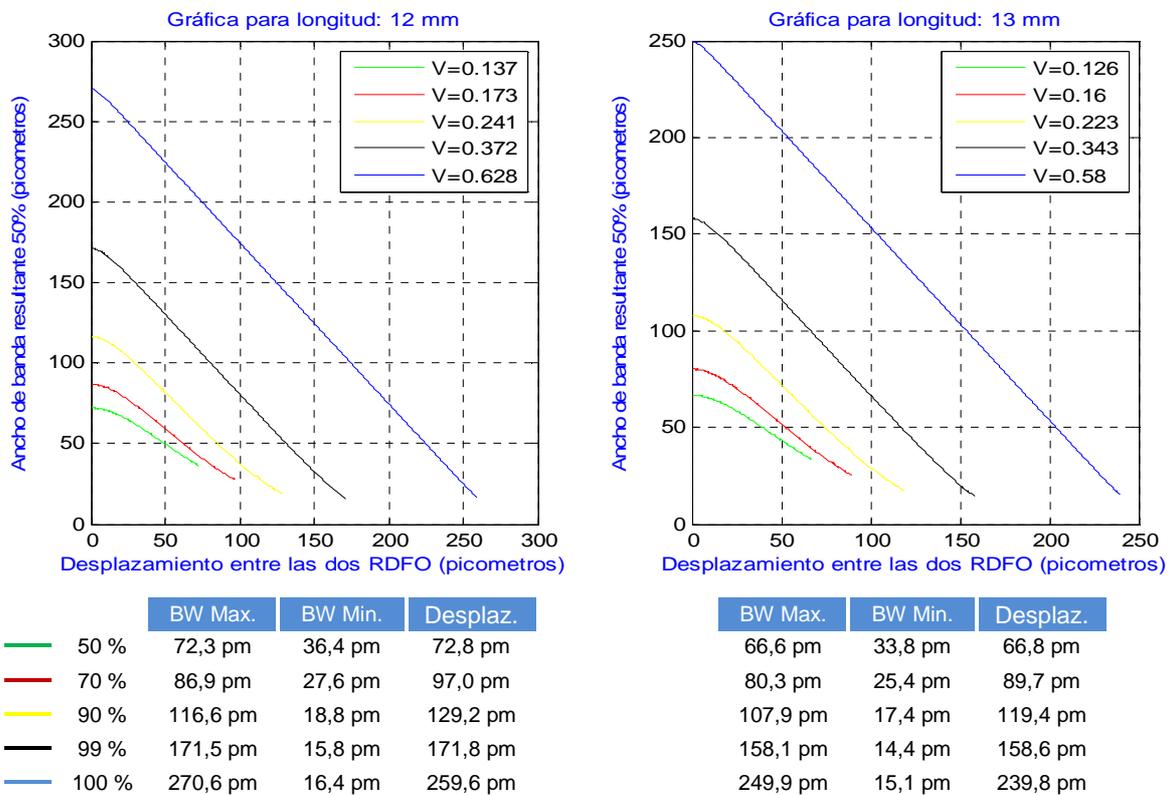


Figura 3.19: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 12 y 13 mm, en función del desplazamiento.

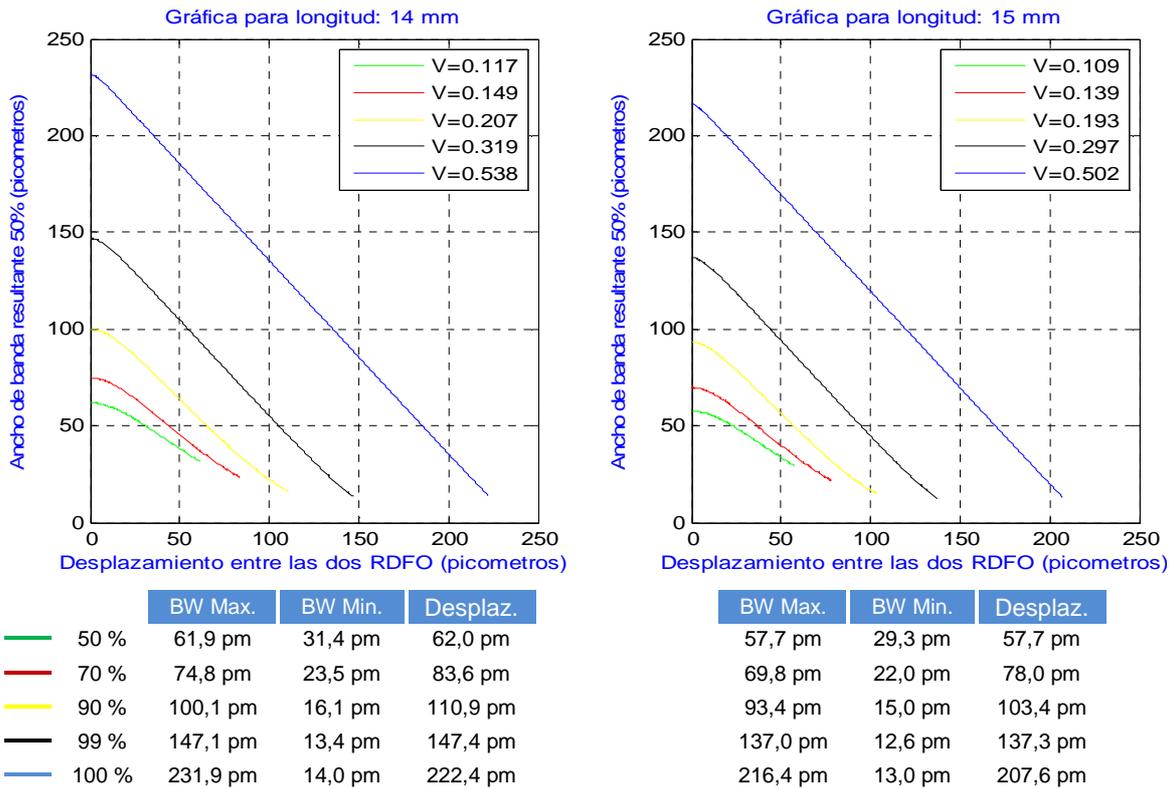


Figura 3.20: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 14 y 15 mm, en función del desplazamiento.

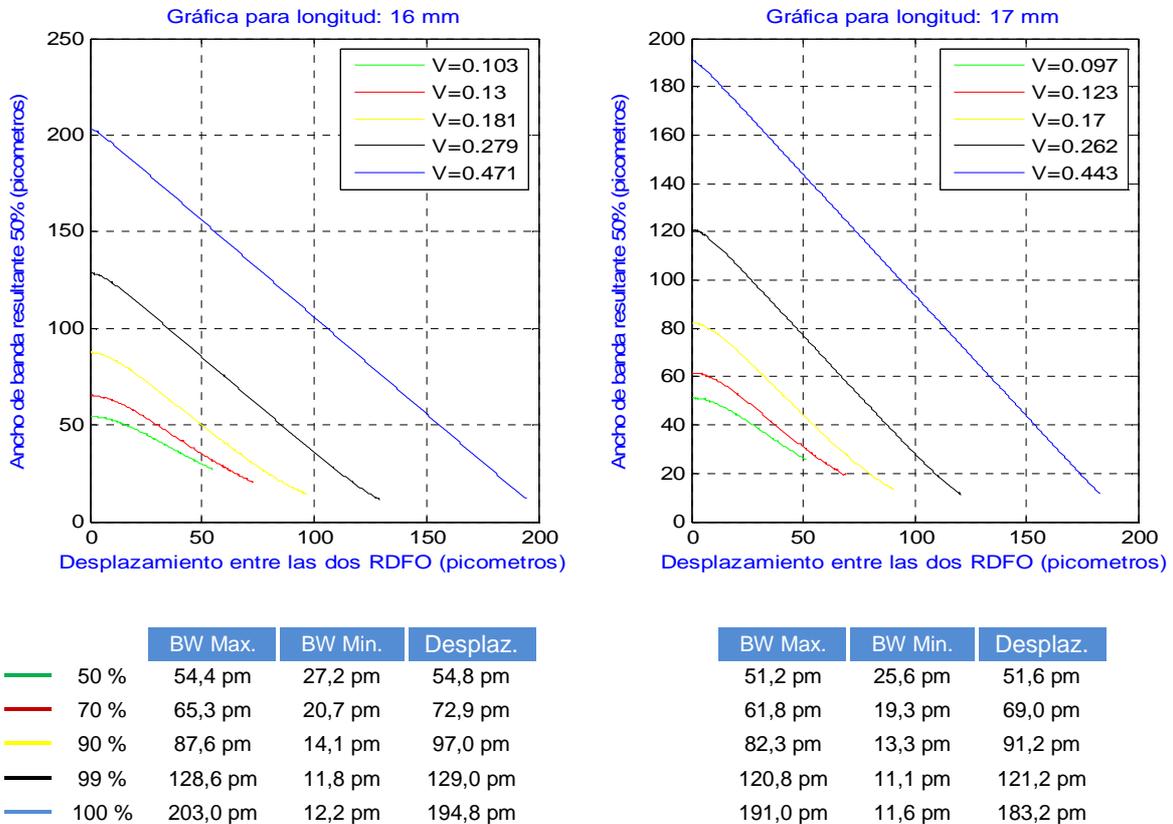


Figura 3.21: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 16 y 17 mm, en función del desplazamiento.

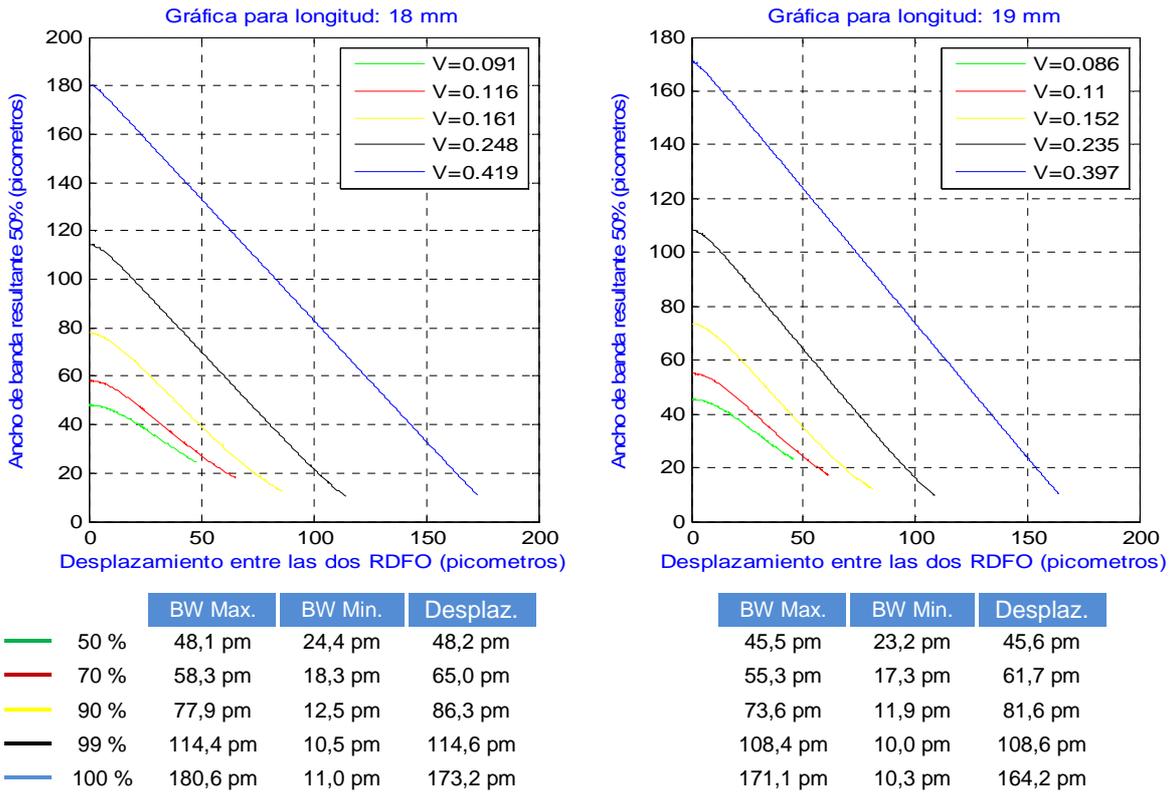


Figura 3.22: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 18 y 19 mm, en función del desplazamiento.

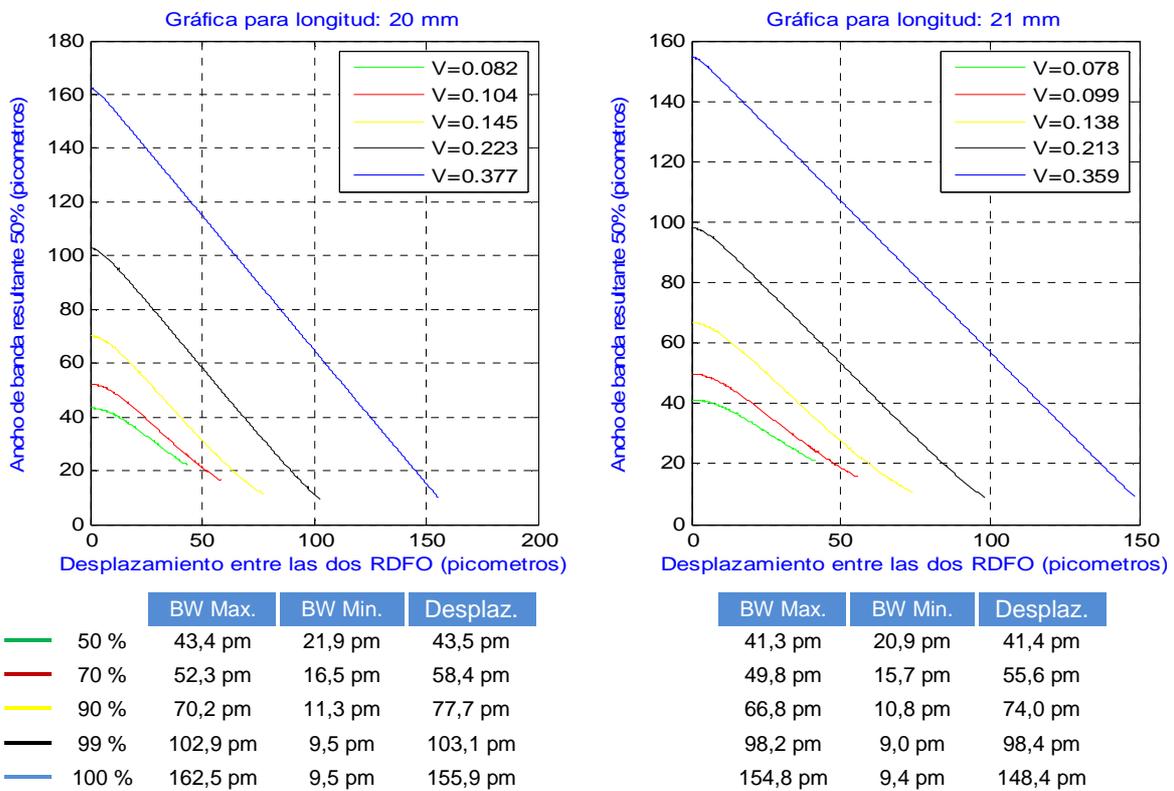


Figura 3.24 Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 20 y 21 mm, en función del desplazamiento.

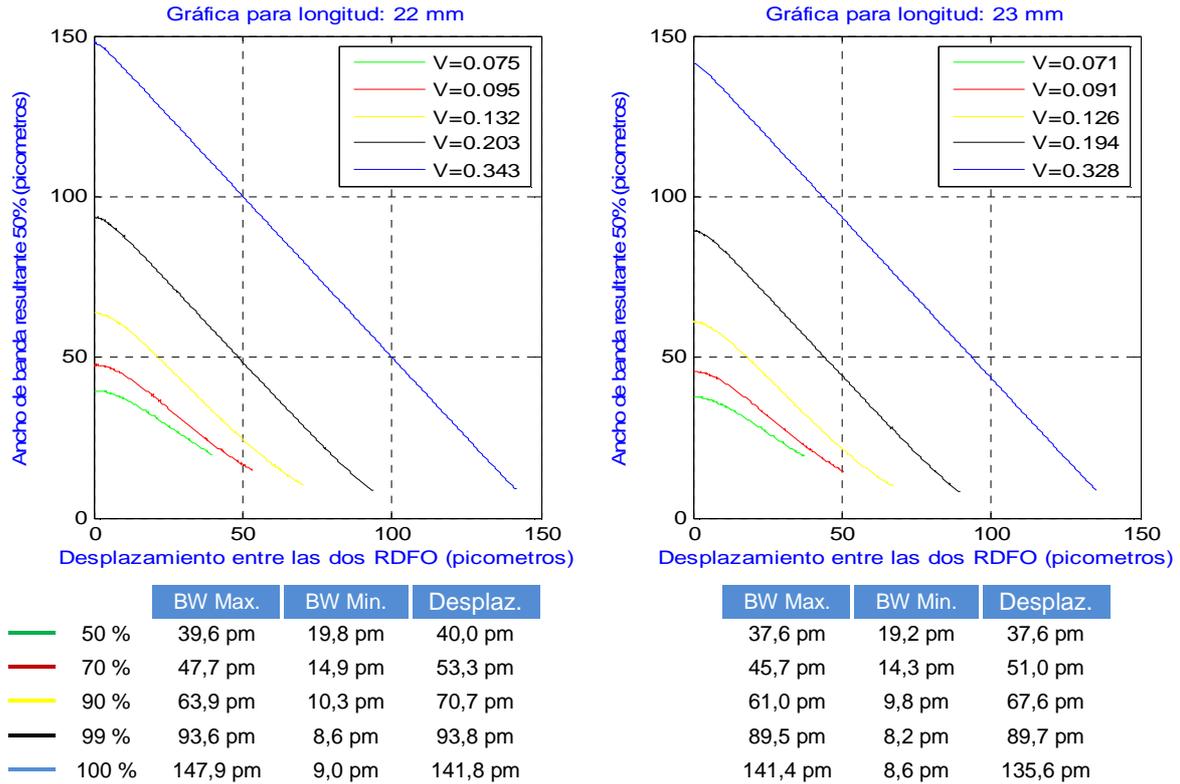


Figura 3.25: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 22 y 23 mm, en función del desplazamiento.

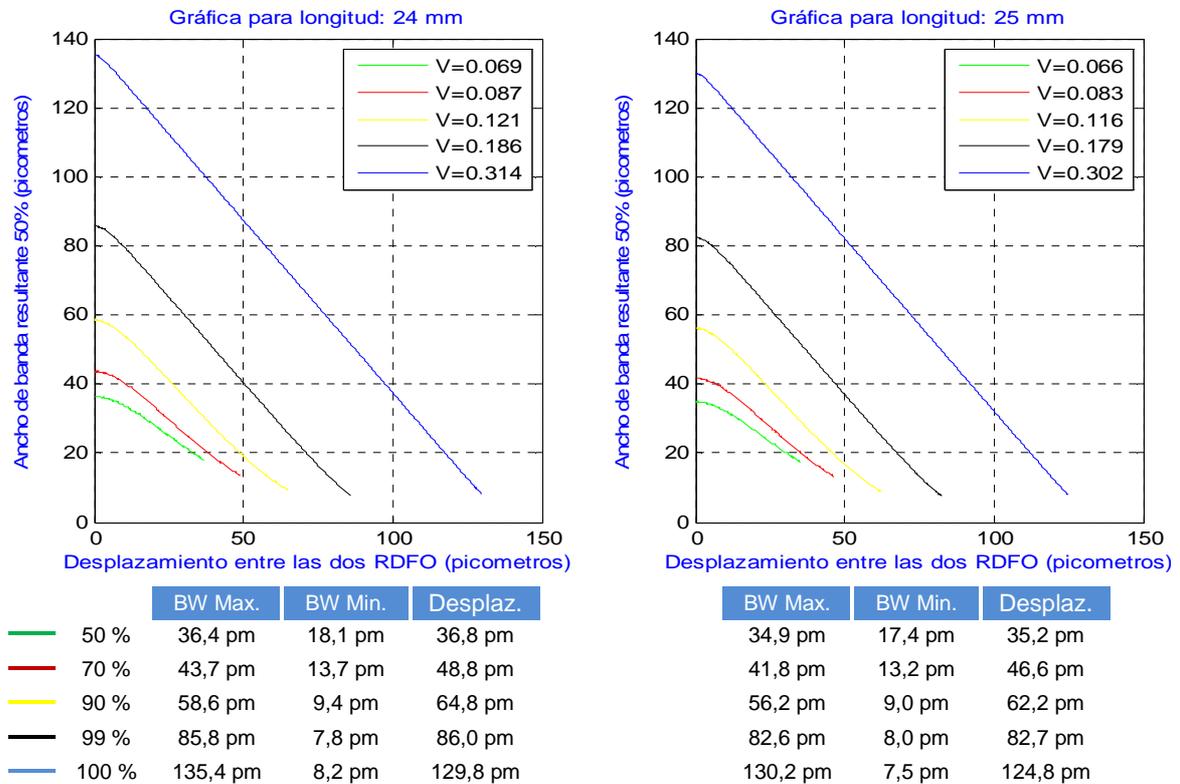


Figura 3.26: Ancho de banda del espectro equivalente medido con caída de 3 dB para redes de 24 y 25 mm, en función del desplazamiento.

Del análisis de las gráficas se puede extraer la conclusión que con el solapamiento de dos RDFOs se pueden realizar filtros muy selectivos en frecuencia. Se llega a obtener anchos de banda mínimos a medida que aumentamos la longitud de la red y aumentamos su reflectividad, ya que al efectuar el desplazamiento y solaparse las zonas laterales donde el espectro tiene una pendiente de brusca transición se puede conseguir un filtrado muy fino.

Para mostrar con claridad los valores mínimos que podemos llegar a conseguir en la gráfica 3.27 se muestra para las diferentes reflectividades iniciales los valores mínimos logrados en función de las longitudes que van desde los 4 mm hasta los 25 mm.

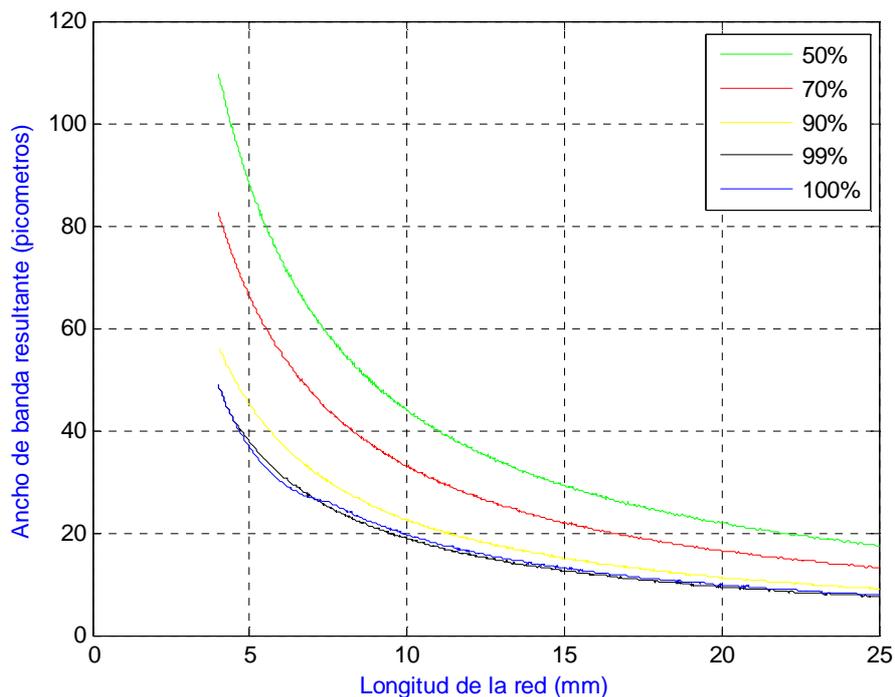


Figura 3.27:

		BW Max.	BW Min.	BW Max.	BW Min.
—	50 %	109,8 pm	17,4 pm	13,708 Ghz	2,172 Ghz
—	70 %	82,7pm	13,2 pm	10,312 Ghz	1,642 Ghz
—	90 %	56,4 pm	9,0 pm	7,040 Ghz	1.123 Ghz
—	99 %	48,9 pm	8,0 pm	6,116 Ghz	998,9 Mhz
—	100 %	48,9 pm	7,5 pm	6,116 Ghz	936,5 Mhz

Estos valores mínimos muestran que se pueden llegar a conseguir un ancho de banda del filtro para solapamiento de dos RDFOs y con reflectividades iniciales de su espectro equivalente 99% y 100% con valores muy similares llegando estos a 8 pm (998,9 Mhz) y 7,5 pm (936,5 Mhz) respectivamente.

CAPÍTULO 4

Análisis y resultados
Técnica de cambio de fase

4.1 RDFO con cambio de Fase

Como se explicó en el apartado 2.5 las redes de difracción de Bragg con cambio de fase actúan generalmente transmitiendo una estrecha banda centrada en una longitud de onda asociada al periodo medio de la RDFO. El hecho de introducir un cambio de fase en la estructura genera una estrecha banda en transmisión a una longitud de onda de resonancia que vendrá dada por el tamaño del cambio de fase introducido y la localización de este, estando esta banda de transmisión dentro de las longitudes de onda de la banda en reflexión.

En las simulaciones siguientes se han escogido varios cambios de fase localizados en la mitad de la RDFO siendo estos de $\pi/2$, π y $3\pi/2$. Las simulaciones se han realizado mediante la Matriz-T (Matriz de Transferencia), introduciendo en cada caso el término de fase correspondiente a cada una de ellas, en nuestro caso a la mitad de la RDFO, que corresponderá a la mitad de las N secciones en las que dividimos la RDFO para realizar la simulación mediante esta matriz.

En la figura 4.1 se muestra una gráfica con los espectros resultantes de una RDFO a la que se han realizado los tres cambios de fase antes comentados.

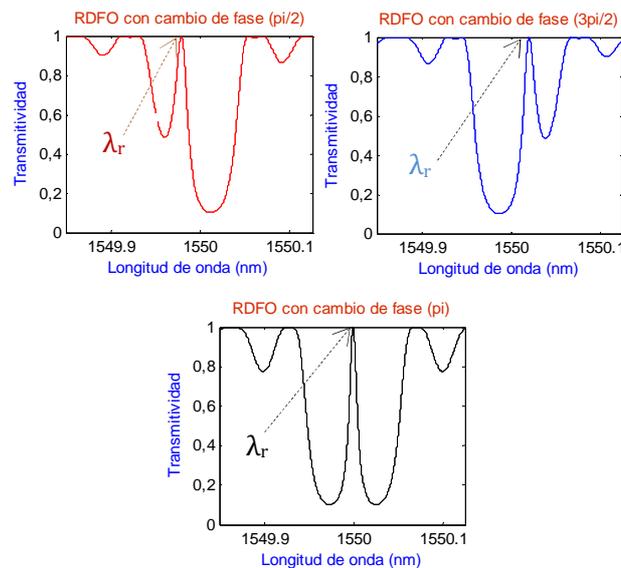


Figura 4.1: (a) RDFO con cambio de fase $\pi/2$. (b) RDFO con cambio de fase π . (c) RDFO con cambios de fase. $3\pi/2$

La figura 4.1 (a) muestra como al introducir un cambio de fase de $\pi/2$ provoca que la longitud de onda central de resonancia que será transmitida esté situada por debajo de 1550 nm apreciando que en la red de $3\pi/2$ obtenemos un espectro simétrico al anterior pero en el cual la λ_r se sitúa por encima de los 1550 nm. En la red con cambio de fase de π la longitud de onda de resonancia se sitúa en los 1550 nm apreciándose de manera muy clara la banda que será transmitida dentro de la banda reflejada. En la figura 4.1 (b) las potencias ópticas reflejadas al lado de la de resonancia tienen una reflectividad del 90% dejando muy bien definida la longitud de onda de resonancia y el ancho de banda transmitido.

La figura 4.2 nos muestra una red a la que se ha introducido una RDFO con cambio de fase. En esta la potencia óptica se introduce a partir del puerto 1 del circulador, pasará a la RDFO en reflexión por el puerto 2, esta reflejará las longitudes de onda para las cuales se ha grabado, posteriormente este espectro pasa a través del puerto 3 del circulador a la RDFO con cambio de fase de π lo que provocará que tengamos en transmisión una banda muy estrecha consiguiendo un filtrado más selectivo.

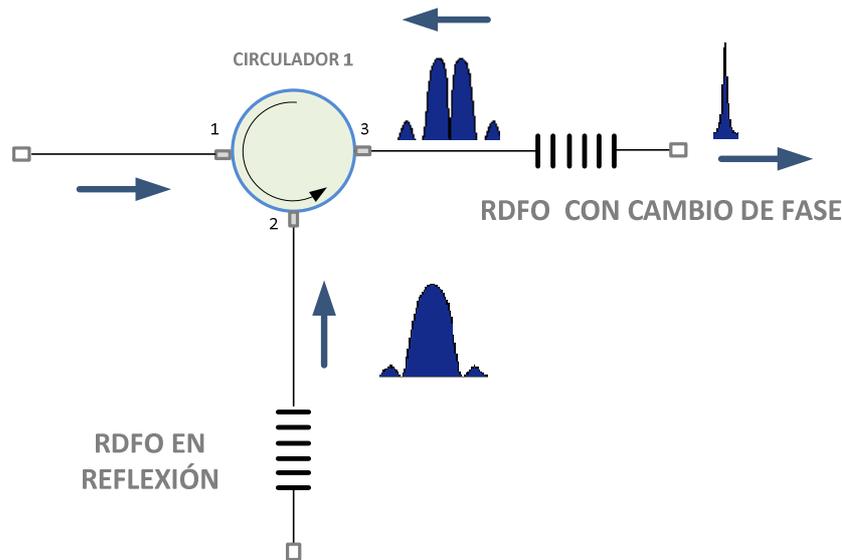


Figura 4.2: Funcionamiento de una red con cambio de fase.

En los siguientes apartados analizaremos hasta donde podemos llegar en cuanto al ancho de banda que podemos obtener variando los parámetros de una RDFO con cambio de fase que están implicados en que este ancho de banda sea lo más estrecho posible.

4.2 Simulación del BW con respecto a la visibilidad y longitud

Para las RDFO con cambio de fase se ha utilizado el mismo índice de modulación que para las simulaciones previas con desplazamiento de dos RDFO. En esta simulación se muestra como varía el ancho de banda en las RDFOs con cambio de fase en función de la longitud y la visibilidad. Este último parámetro puede provocar que una misma red este saturada o sea perfectamente válida debiendo tenerse en cuenta que valores máximos de visibilidad puede alcanzar la red.

Previamente a la realización de la gráfica, se ha realizado un estudio de los valores de visibilidad que son admisibles para cada longitud de la red, desde valores iniciales de visibilidad de 0,01 hasta un valor de esta en la cual la red alcance el criterio de saturación. Para ello se ha considerado que cuando la red está saturada existen alrededor de 15% de puntos en la zona de máxima reflectividad que alcanzan

un valor del 100%, el mismo criterio que se utilizó en los apartados previos. La gráfica se ha elaborado con un cambio de fase de introducido de π .

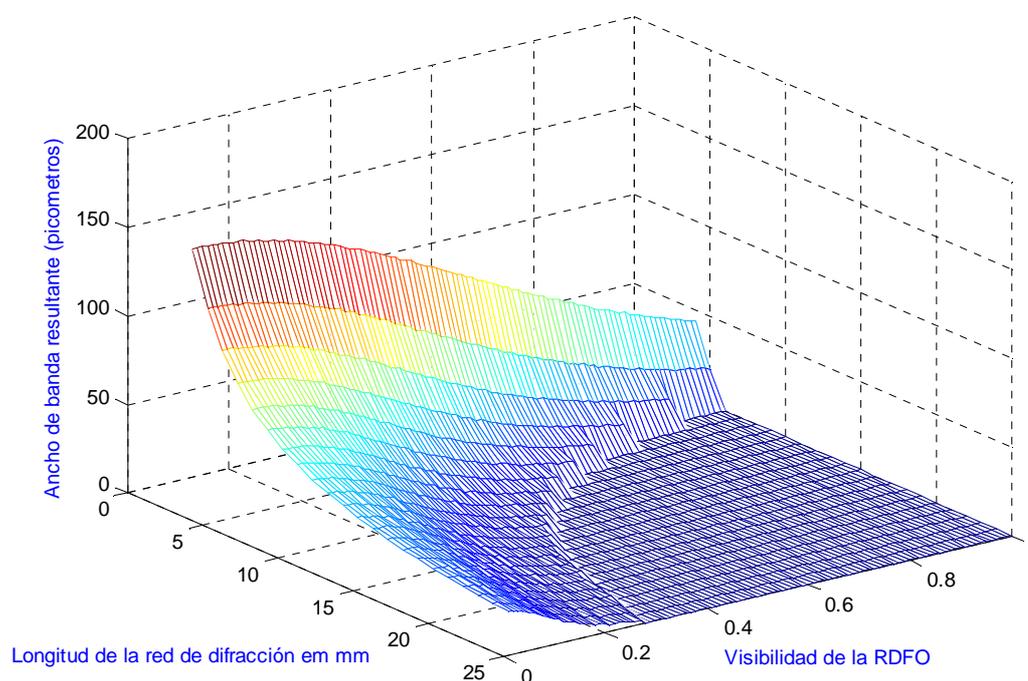


Figura 4.3: Variación del ancho de banda con respecto a la longitud y la visibilidad.

De la figura podemos extraer la conclusión de que a medida que aumenta la longitud de la red el ancho de banda del espectro en transmisión de la red de cambio de fase va disminuyendo. A medida que aumenta el valor de visibilidad en la red de 4 mm el ancho de banda disminuye haciéndose cada vez más pequeño y admitiendo el valor de visibilidad ($v=1$) máximo posible sin que se sature esta. A medida que aumentamos la longitud de la red, por ejemplo en 15 mm el valor de visibilidad tiene un límite, sin alcanzar el máximo ($v=1$), para el cual la red también se satura, pero también se observa que hasta alcanzar este límite el ancho de banda también decrece. La RDFO de 25 mm es la que menos incremento de valores de visibilidad admite puesto que para de $v \approx 0,29$ ya está saturada. Lo descrito anteriormente explica los valores de ancho de banda nulos que se muestran en la gráfica para ciertos valores de visibilidad y longitud.

4.3 RDFO CON CAMBIO DE FASE $\pi/2$ Y $3\pi/2$

En la gráfica 4.4 se muestra el espectro en transmisión de una RDFO de 4 mm en la que se ha introducido un cambio de fase de $\pi/2$ para diferentes valores iniciales de reflectividad máxima de la RDFO. Dentro de las longitudes de onda reflejadas, las que están situadas por debajo de la longitud de onda de resonancia (que es transmitida), van también aumentando su valor a medida que la reflectividad máxima inicial aumenta

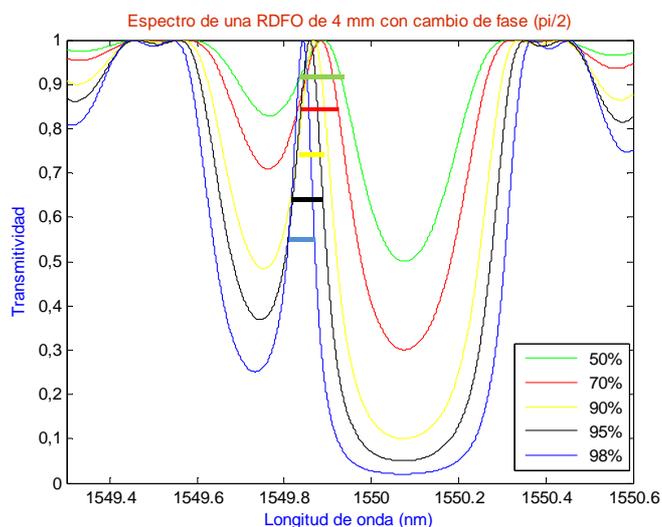


Figura 4.4: Espectro en transmisión de una RDFO de 4mm con cambio de fase ($\pi/2$).

Para medir el ancho de banda de las longitudes de onda de transmisión utilizaremos el criterio de caída de 3 dB con respecto a la máxima reflectividad de las potencias que se encuentran situadas por debajo de la longitud de onda de resonancia como viene representando en la gráfica con líneas de trazo continuo, este ancho de banda vemos que se va haciendo más estrecho a medida que aumentamos la reflectividad. Con respecto a la longitud de onda a la que está centrada la banda de transmisión tiene un valor para una reflectividad inicial de 50% de 1549,8893 nm mientras que para una $R=98\%$ su valor es de 1549,8432 nm, estando por debajo de la anterior, debido a que el espectro en reflexión al aumentar la reflectividad se ensancha.

En la figura 4.5 se ha representado una RDFO en la que el único parámetro que se ha variado es la longitud de la RDFO que en este caso es de 25 mm. Al aumentar la longitud y dando los valores de visibilidad adecuados para las reflectividades iniciales el ancho de banda de la red disminuye como ya ha sido descrito en apartados anteriores, hecho que también se pone de manifiesto en esta gráfica, estrechándose también el ancho de banda en transmisión. Con respecto a la longitud de onda central de resonancia se ha desplazado a valores superiores como consecuencia lógica del estrechamiento del espectro, con un $R=50\%$ su valor es de 1549,9822 y con una $R98\%$ el valor es de 1549,9748 nm.

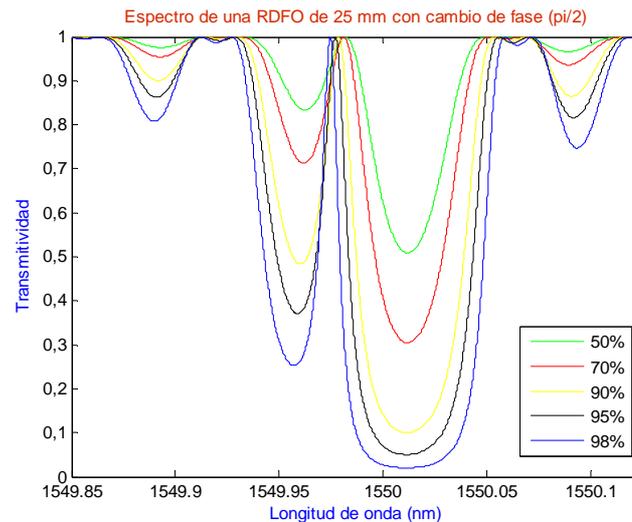
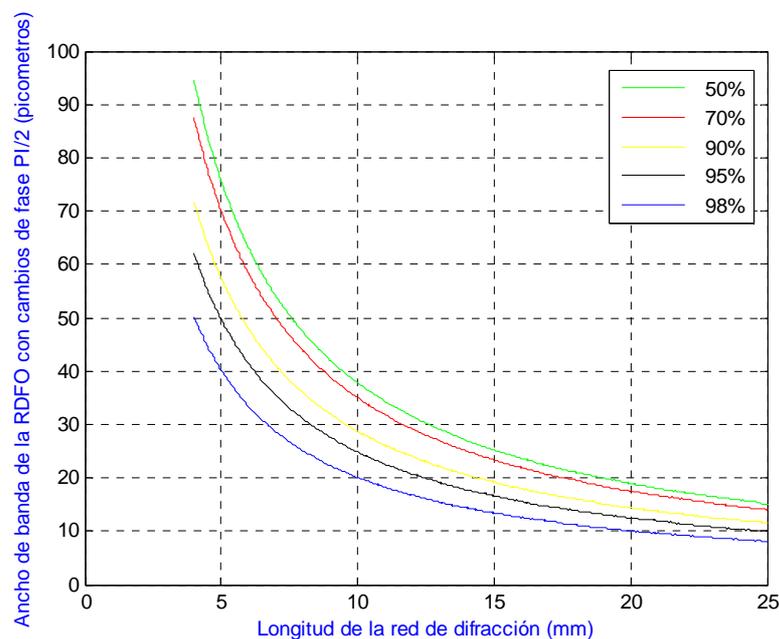


Figura 4.4: Espectro en transmisión de una RDFO de 25 mm con cambio de fase ($\pi/2$).

El hecho de que la visibilidad y la longitud de la red sean parámetros que influyen en el espectro en transmisión nos conduce a la medición del ancho de banda variando estos parámetros. Hemos calculado inicialmente los valores de visibilidad con los que obtenemos reflectividades iniciales del 50%, 70%, 90%, 95% y 98%, para longitudes de las RDFO de 4-25 mm. Una vez obtenida la matriz de visibilidades hemos ido variando las longitudes obteniendo la gráfica de la figura 4.3.



		BW Max.	BW Min.	BW Max.	BW Min.
—	50 %	94,6 pm	15,2 pm	11,814 Ghz	1,898 Ghz
—	70 %	87,5 pm	14,1 pm	10,928 Ghz	1,760 Ghz
—	90 %	71,9 pm	11,5 pm	8,979 Ghz	1,436 Ghz
—	95 %	62,1 pm	10,0 pm	7,755 Ghz	1,248 Ghz
—	98 %	50,2 pm	8,1 pm	6,269 Ghz	1,011 Ghz

Figura 4.5: Ancho de banda para una RDFO con cambio de fase ($\pi/2$)

Los mejores resultados en cuanto a filtrado más selectivo se obtienen cuando la longitud de la RDFO es de 25 mm y reflectividades iniciales del 90%, 95% y 98%. Con reflectividades iniciales del 50% y 70% las longitudes de onda situadas por debajo de la de resonancia alcanzan un nivel de reflexión no muy elevado pudiendo transmitirse potencia óptica de estas longitudes de onda que están muy cercanas a la de la resonancia, situación que no sería deseable para un filtrado óptico.

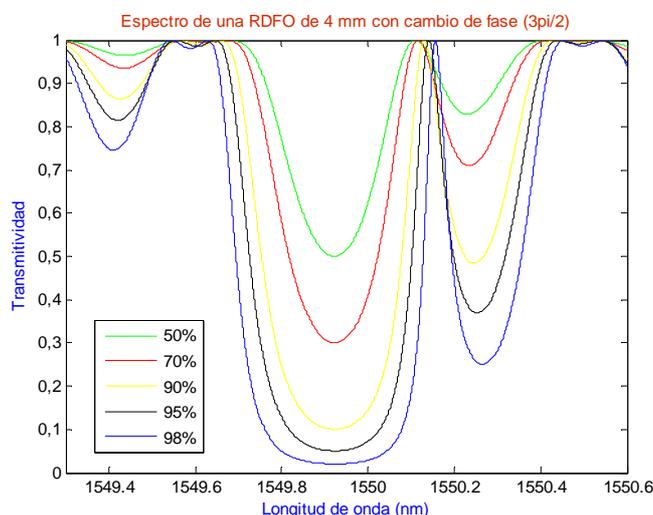


Figura 4.6: Espectro de una RDFO de 4 mm con cambio de fase ($3\pi/2$).

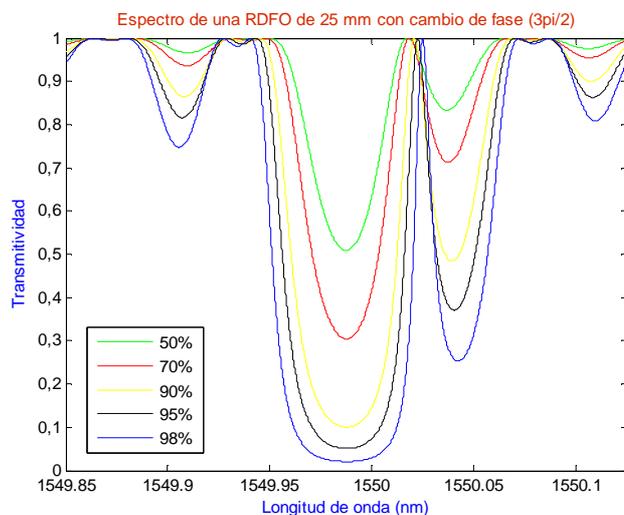
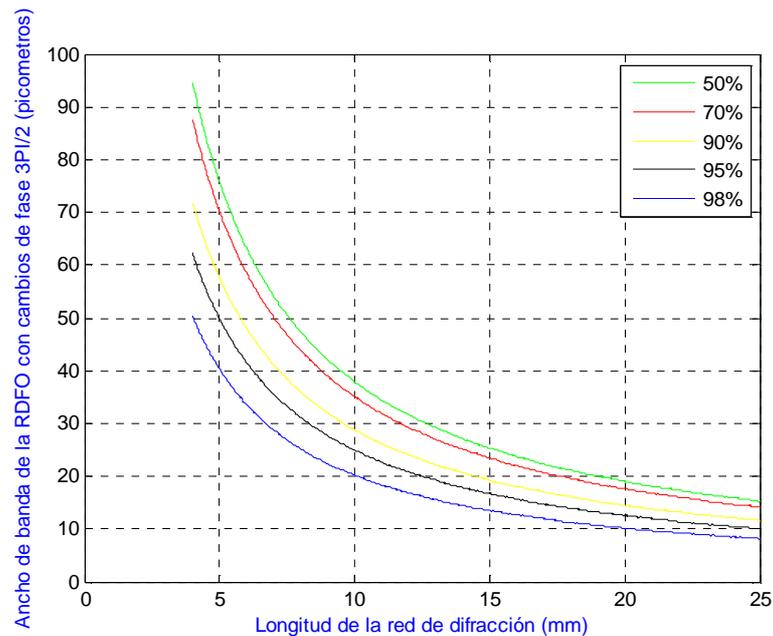


Figura 4.7: Espectro de una RDFO de 25 mm con cambio de fase ($3\pi/2$).

En las figuras 4.6 y 4.7 se ha representado el espectro de dos RDFOs de 4 y 25 mm con un cambio de fase de $3\pi/2$, apreciándose un espectro con cierto grado de simetría con respecto al eje de ordenadas al mostrado en las gráficas 4.3 y 4.4. La variación del espectro se comporta de la misma manera cambiando únicamente la longitud de onda de resonancia central que es transmitida, hacia valores más elevados siendo estos para la red de 4 mm de 1550,1103 pm ($R=50\%$) y 1550,1565 pm ($R=98\%$) y la para la red de 25 mm de 1550,0175 pm ($R=50\%$) y 1550,0248 ($R=98\%$).



		BW Max.	BW Min.	BW Max.	BW Min.
—	50 %	94,7 pm	15,3 pm	11,823 Ghz	1,910 Ghz
—	70 %	87,7 pm	14,1 pm	10,949 Ghz	1,760 Ghz
—	90 %	71,9 pm	11,6 pm	8,976 Ghz	1,448 Ghz
—	95 %	62,3 pm	10,1 pm	7,777 Ghz	1,261 Ghz
—	98 %	50,3 pm	8,1 pm	6,279 Ghz	1,011 Ghz

Figura 4.8: Ancho de banda para una RDFO con cambio de fase ($3\pi/2$)

De la misma manera que en el apartado anterior se han calculado los valores de visibilidad válidos para las reflectividades iniciales y medido el ancho de banda para redes de 4-25 mm dando como resultado la gráfica 4.8. Los valores obtenidos son muy similares que los obtenidos en la red con cambio de fase de $\pi/2$.

4.3 RDFO CON CAMBIO DE FASE π

En las figuras 4.9 y 4.10 se han representado el espectro en transmisión de dos RDFOs de 4 y 25 mm con cambio de fase para distintas reflectividades iniciales. En los dos casos la longitud de onda central que es transmitida dentro del rango de reflexión se encuentra situada en un valor 1550 nm, dividiendo el espectro en reflexión en dos lóbulos con máximos de reflectividad similares. A medida que va aumentando su reflectividad estos lóbulos tienen un valor cada vez mayor reflejando las potencias ópticas cercanas a la de resonancia y transmitiendo solo un cada vez más estrecho margen de longitudes de onda. Por otro lado al aumentar la longitud de la red su espectro en reflexión será cada vez más estrecho, afectando de igual forma a las longitudes de onda transmitidas que de la misma manera irá disminuyendo su ancho de banda consiguiéndose un filtrado más selectivo.

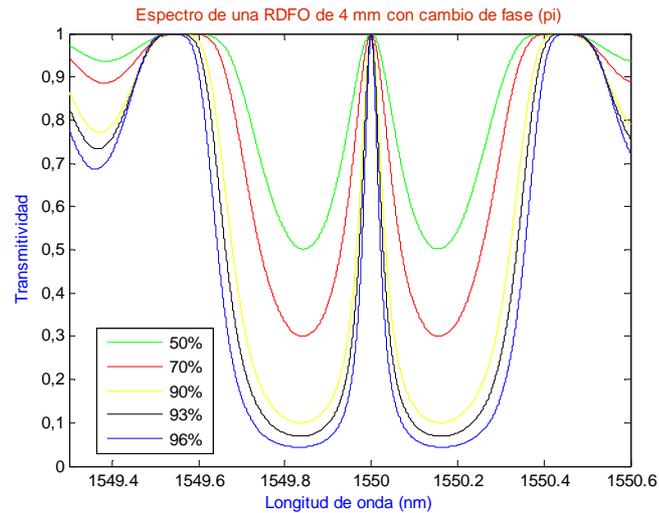


Figura 4.9: Espectro en transmisión de una RDFO de 4 mm con cambio de fase (π).

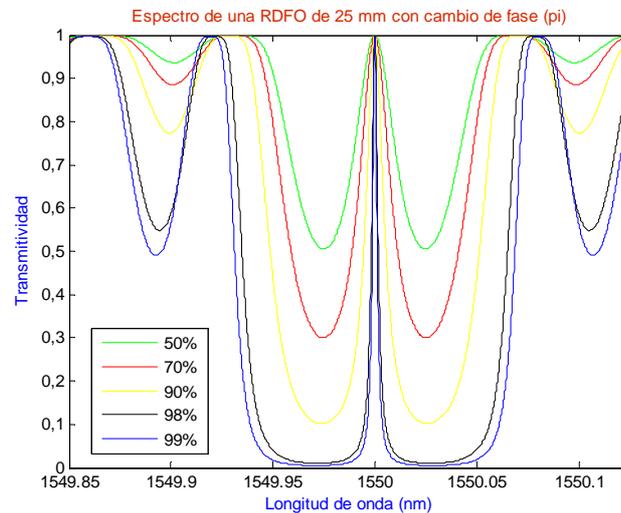
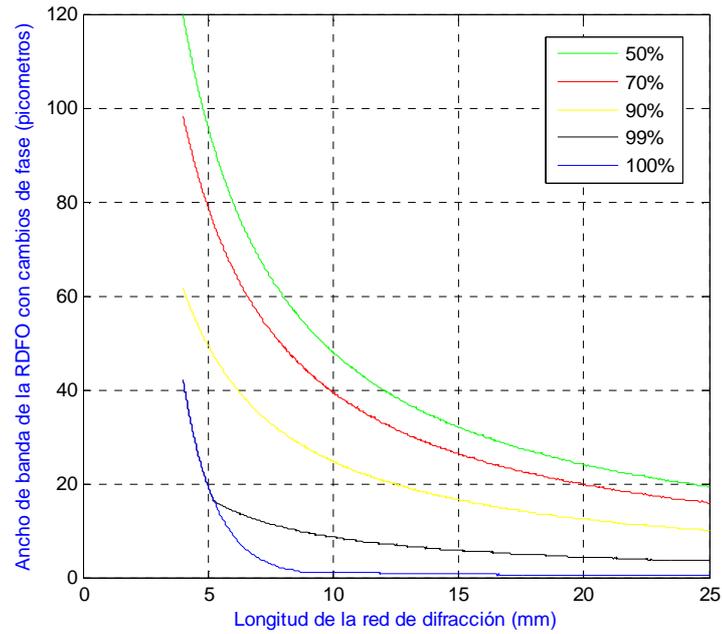


Figura 4.10: Espectro en transmisión de una RDFO de 25 mm con cambio de fase (π).

En la gráfica 4.11 se han obtenido los valores de ancho de banda para RDFO con cambio de fase de π , habiéndose calculado previamente una matriz con los valores de visibilidad para estas reflectividades iniciales. Dentro de estos resultados en la red de 25 mm con reflectividades del 90 y 99% los anchos de banda son los más estrechos. En las redes con cambio de fase a medida que introducimos un cambio de $\pi/2$ a $3\pi/2$ la longitud de onda central que es transmitida va desplazándose desde los 1549,8432 nm hasta los 1550,1565 nm consiguiéndose un rango de sintonización de 313,3 pm (39,12 Ghz), de tal forma que se puede conseguir un filtro dinámico si a la RDFO se la aplica por ejemplo un campo magnético de forma local que altere el periodo de la red. Aunque aquí se ha realizado el cambio de fase en la mitad de la RDFO en general las dos secciones de la RDFO no tienen por qué estar colocadas simétricamente.



		BW Max.	BW Min.	BW Max.	BW Min.
—	50 %	119,8 pm	19,3 pm	14,959 Ghz	2,410 Ghz
—	70 %	98,4 pm	15,8 pm	12,287 Ghz	1,972 Ghz
—	90 %	61,6 pm	10,0 pm	7,692 Ghz	1,248 Ghz
—	99 %	42,2 pm	3,6 pm	5,269 Ghz	449,53 Mhz
—	100 %	42,2 pm	0,5 pm	5,269 Ghz	62,435 Mhz

Figura 4.11: Ancho de banda para una RDFO con cambio de fase de π

CAPÍTULO 5

Conclusiones
Líneas Futuras

5.1 CONCLUSIONES

En el presente proyecto se han analizado dos técnicas de filtrado óptico que pueden ser utilizadas en filtros fotónicos de RF y Microondas. Dichas técnicas se han basado en Redes de Difracción de Fibra Óptica, la primera mediante el solapamiento de dos RDFO, técnica que ha surgido del Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria y la segunda con redes de difracción con cambio de fase.

Se han ido evaluando los parámetros de las redes para ver cuáles de ellos resultan más óptimos y con cuáles podemos obtener un filtro con un ancho de banda más estrecho.

Se puede concluir que la técnica del solapamiento de dos de estas redes es una técnica óptima para el filtrado óptico si establecemos unos criterios de desplazamiento que nos permitan que el espectro resultante no se vea afectado por los lóbulos laterales o que no tenga una reflectividad equivalente demasiado pequeña y asegurándonos que la red no está saturada. Con todo ello y con los criterios establecidos en el proyecto se ha visto que con esta técnica se pueden filtrar señales de RF de hasta 936,5 Mhz de ancho de banda, siempre teniendo en cuenta que se han estudiado para una longitud de onda de 1550 nm y un índice de refracción concreto

Con la técnica de cambio de fase en la que dentro de la banda de rechazo en reflexión se genera una estrecha banda en transmisión se ha visto que se puede llegar a filtrar señales de hasta 62,435 Mhz. Aunque con esta técnica obtenemos un ancho de banda más estrecho, grabar redes con cambio de fase necesita un proceso más complejo.

Por lo tanto el hecho de que a partir de RDFO sencillas podamos realizar un filtro mediante el solapamiento de dos de éstas constituye una alternativa a las redes de cambio de fase. Para desintonizar una red con respecto a la otra se puede someter a una de ellas a un esfuerzo de tensión para que de esta forma quede fijado un estiramiento que nos varíe el periodo de la RDFO y por lo tanto la longitud de onda central. Una vez hecho esto la RDFO se puede sumergir en una resina/plástico para que quede fijada al cabo de un tiempo con lo que se puede de forma sencilla realizar una RDFO solapada para su posterior comercialización con unos costes reducidos.

5.2 LÍNEAS FÚTURAS DE INVESTIGACIÓN

El presente proyecto deja abiertas la siguientes líneas futuras:

- Una vez vista la viabilidad de esta técnica, necesita su implementación experimental en un sistema real de filtrado fotónico para señales de RF y microondas.
- Estudio de la técnica del solapamiento con RDFOs no uniformes por ejemplo, con función de apodización ya que grabar RDFO con determinadas funciones de la envolvente minimizan los lóbulos laterales.
- Estudio de la elongación a la que podemos someter a la RDFO que tiene que ser desintonizada para los desplazamientos que hemos calculado sin que llegar a dañar la RDFO.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Mario Bolea Boluda, "*Sistemas ópticos incoherentes para la generación de señales arbitrarias basados en filtros fotónicos de microondas*".: Tesis Doctoral, Departamento de Comunicaciones, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2012.
- [2] J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, J. Mora, M. Andrés, "Photonic processing of microwave signals," *IEE Proceeding Optoelectronics*, vol. 152, no. 6, pp. 299-320, (2005).
- [3] J. Capmany, D. Pastor, B. Ortega, J. L. Cruz, M. V. Andrés, "Applications of fibre bragg gratings to microwave photonics," *IEEE*, 1999.
- [4] K. Wilner and A. P. Van Den Heuvel, "Fiber-optic delay lines for microwave signal processing," *Proc. IEEE*, vol. 64, no. (5), pp. 805-807, May (1976).
- [5] D. B. Hunter, R. A. Minasian, "Photonic signal processing of microwave signals using an active-fiber Bragg Grating pair structure," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1463-1463, Aug. 1997.
- [6] Lin I. S., J. D. McKinney, A. M Weiner, "Photonic synthesis of broadband microwave arbitrary waveforms applicable to Ultra-Wideband communication," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 15, no. 4, pp. 226-228, (2005).
- [7] F. Zeng and J. P. Yao, "Investigation of phase modulator based all optical bandpass filter," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. (4), pp. 1721-1728, April 2005.
- [8] J. Wang, F. Zeng, and J. P. Yao, "All optical microwave bandpass filters implemented in a radio-over-fiber link," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 17, no. (8), pp. 1737-1739, Aug. 2005.
- [9] F. Zeng and J. P. Yao, "Ultrawideband impulse radio signal generation using a high-speed electrooptic phase modulator and an FBG-based frequency discriminator," *IEEE Photon Technol. Lett.*, vol. 18, no. (19), pp. 2062-2064, Oct. 2006.
- [10] J. M. López-Higuera, A. Ullán, C. Galindez, F. J. Madruga, A. M. Cubillas, "Técnica para modificar el espectro Brillouin en fibras ópticas," Proyecto TEC 2007.
- [11] You Min Chang, Ju Han Lee, "High-Q, tunable, photonic microwave single passband filter based on stimulated Brillouin scattering and fiber Bragg grating filtering," *Optics Communications*, vol. 281, no. (20), pp. 5146-5150, Oct. 2008.
- [12] K. O. Hill, Y. Fujii, D. Johnson and B.S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: Application to reflection to filter fabrication," *Applied Physics Letters*, vol. 32, pp. 647-649, (1978).
- [13] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D.C. Johnson and Y. Fujii, "Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers," *Optics Letters*, vol. 3, pp. 66-68, (1978).

- [14] G. E. Villanueva, J. L. Cruz, M. V. Andrés, J. Martí and B. Vidal J. P. Pere Pérez-Millán, "Tunable photonic microwave filter with single bandpass bases on a phase-shifted Fiber Bragg Grating," *IEEE Photonic Technology Letters*, vol. 22, no. (19), pp. 1467-1469, Oct. 2010.
- [15] L. Xia, S. Aditya, P. Shum Ping and B. Putra Parhusip J. Zhou, "Nonlinearly Chirped Grating Based continuously tunable high notch rejection microwave photonic filter," in *2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology*, 2009, pp. 913-915.
- [16] J. Yao F. Zeng, "All-Optical Microwave Filters using uniform Fiber Bragg Gratings with identical reflectivities," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 23, no. (3), pp. 1410-1418, Mar. 2005.
- [17] A. Quintela, "*Contribuciones a la fabricación y al desarrollo de nuevos dispositivos y transductores basados en redes de difracción en fibra óptica*".: Tesis Doctoral, Dep. Tecnología Electrónica, Universidad de Cantabria, Santander, 2006.
- [18] A. Othonos and K. Kally., "*Fiber Bragg Gratings, Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*". Norwood: Artech House, 1999.
- [19] J. Azaña, "*Procesado de señal fotónica mediante tratamientos duales en redes de difracción en fibra*".: Tesis Doctoral, Departamento de Tecnología Fotónica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2000.
- [20] T. Erdogan, "Fiber Grating Spectra," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1277-1294, (1997).
- [21] H. Kogelnik, "*Theory of Optical Waveguides, in Guided-Wave Optoelectronics*", T. Tamir, Ed. New York: Springer-Verlag, (1990).
- [22] R. Kashyap, "*Fiber Bragg Gratings*". San Diego: Academic Press, (1999).
- [23] P. Menezo, "*Estudio y aplicación de una técnica de filtrado óptico en tecnologías de fibra para el desarrollo de láseres en fibra*".: Proyecto Fin de Carrera, Universidad de Cantabria, Santander, 2013.
- [24] H. Asseh, H. Storoy, J.T. Kringlebotn, W. Margulis, B. Sahlgren and S. Sand-gren, "'10 cm long Yb DFB fiber laser with permanent phase shifted grating'," *Electronics Letter*, vol. 31, pp. 969-970, (1995).
- [25] S. Torres, "*Fabricación de fibras de cristal fotónico y grabación de redes de Bragg*".: Tesis Doctoral, Dep. de Física Aplicada y Electromagnetismo, Universidad de Valencia, Valencia, 2011.
- [26] B. J. Eggleton, P. A. Krug, L. Poladin and F. Ouellette, "Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibers," *Electronics Letters*, vol. 30, no. (19), pp. 1620-1621, (1994).