 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

# MULTIPLEXOR ÓPTICO RECONFIGURABLE MEDIANTE REJILLAS DE BRAGG

Autor:

David Alonso Vásquez Uribe

Programa Académico:

Ingeniería en telecomunicaciones

Director(es) del trabajo de grado:

Andrés Felipe Betancur Pérez

Ingeniero en electrónica

Profesor de T.C

**FACULTAD DE INGENIERIAS  
INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO  
ITM.**

**3 de Agosto del 2015**

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RESUMEN

---

En las redes WDM-PON (*Wavelength división Multiplexing Passive Optical Network*) se detectó un problema de congestión debido a las asignaciones de las longitudes de onda como también debido a la utilización de estas longitudes por parte de los usuarios, se vio la necesidad de estudiar un dispositivo que me permitiera hacer asignaciones dinámicas de longitudes de onda. Se construyó un multiplexor óptico reconfigurable por medio de la herramienta de simulación Optisystem, el cual tiene en su estructura básica fibras con rejillas de Bragg, que cambiando sus parámetros internos el multiplexor filtraran las frecuencias asignadas, dejándolas pasar o bloqueándolas, además de configurar los parámetros básicos de los dispositivos adicionales al sistema para que todo funcione de acuerdo a los objetivos planteados, así tener una reutilización de las longitudes de onda adecuada obteniendo que el usuario final tenga más ancho de banda o menos ancho de banda de acuerdo a sus necesidades. Todo esto fue analizado por medio de los analizadores de espectro óptico (**OSA**) y el analizador de tasa de error de bit (**BER**), arrojando resultados satisfactorios, se obtuvieron buenos valores de factor Q (factor de calidad), se obtuvo un buen diagrama de ojo, además de que los filtros con las rejillas de Bragg realizaron muy bien su tarea de filtrado. Al final el multiplexor óptico reconfigurable puede pasar a un segundo plano de estudio, un estudio físico donde se podrá ver el comportamiento del dispositivo en condiciones no ideales.

**Palabras clave:** Rejillas de Bragg, multiplexor, longitud de onda, ancho de banda, fibra óptica.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## RECONOCIMIENTOS

---

Al lograr el objetivo esencial en mi vida, consciente de que no es el final si no una etapa, miro hacia atrás y recuerdo tantos momentos difíciles, gratos, e inolvidables, solo me queda dar mis agradecimientos primordialmente a Dios, que ha sido mi guía y compañía principal. A mis padres y hermanos por el apoyo moral, espiritual y económico, que son un pilar fundamental para mi crecimiento personal. Agradecerle al Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), por el entorno estudiantil en el cual me forme en este proceso; una institución seria, sólida y comprometida con la formación de los jóvenes en la ciudad, agradecerle por facilitarme sus instalaciones y herramientas para la realización de este proyecto. Por ultimo quiero agradecerle al profesor Andrés Felipe Betancur Pérez, que con su profesionalismo y su tiempo ayudo en la asesoría durante la realización del proyecto.

**“LA GRATITUD ES EL RECUERDO DEL ALMA”**

GRACIAS, MIL GRACIAS.

David Alonso Vásquez Uribe.

Estudiante de Telecomunicaciones.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# ACRÓNIMOS

---

WDM-PON (**Wavelength división Multiplexing Passive Optical Network**) es una tecnología que multiplexa varias señales sobre una sola fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda, usando luz procedente de un láser o un LED.

AWG (**Arrayed Waveguide Grating**) se utilizan comúnmente como (de) multiplexores ópticos en los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM). Estos dispositivos son capaces de multiplexar un gran número de longitudes de onda en una única fibra óptica, lo que aumenta la capacidad de transmisión de las redes ópticas considerablemente.

Analizador de espectro óptico (**Optical Spectrum Analyzer**) es un equipo de medición que se utiliza para realizar medidas de potencia óptica en función de la longitud de onda.

Analizador de tasa de error de bit (**Bit Error Rate**) es un equipo de medición que me permite visualizar el número de bits recibidos de una corriente de datos a través de un canal de comunicación que se han alterado debido al ruido, la interferencia, distorsión o pocos errores de sincronización.

Multiplexor (**Mux**) es un dispositivo que puede recibir varias señales a la entrada y transmitir las por un medio de transmisión compartido.

Demultiplexor (**Demux**) es un dispositivo que puede recibir a través de un medio de transmisión compartido una señal compleja multiplexada y separar las distintas señales integrantes de la misma encaminándolas a las salidas correspondientes.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Nm (nanómetro)** Unidad de medida que equivale a una mil millonésima de un metro ( $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ).

**$\lambda$  (Lambda)** Longitud de onda es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo.

**THz (Terahertz)** Unidad de medida aplicado a las radiaciones electromagnéticas que se propagan en las frecuencias en el rango de los terahertz.

**OLT (Optical line termination)** Unidad óptica terminal de línea es un dispositivo que sirve como el proveedor de servicios de punto final de una red óptica pasiva. Proporciona dos funciones principales: una llevar a cabo la conversión entre las señales eléctricas utilizadas por los equipos del proveedor de servicios y las señales de fibra óptica utilizados por la red óptica pasiva, y dos para coordinar la multiplexación entre los dispositivos de conversión en el otro extremo de dicha red.

**ONU (optical line termination)** Unidad de red óptica es un dispositivo situado en el cliente y cumple con las siguientes funciones: conversión de señales ópticas a eléctricas, y demultiplexación de la señal.

**Splitter (Divisor Óptico)** Es un elemento pasivo donde recibe una señal y la envía a varias salidas.

**dBm (Decibelio-milivatio)** Es una unidad de medida de potencia, utilizada en radio, microondas y fibra óptica.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	8
1.1. Objetivo general.....	9
1.2. Objetivos específicos.....	9
1.3. Organización de la tesis.....	10
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	12
2.1. Orígenes de las rejillas de Bragg.....	13
2.2. Ley de Bragg.....	14
2.3. Clasificación de las rejillas de Bragg.....	16
2.3.1. Clasificación por características de acoplamiento.....	16
2.3.2. Clasificación por características de crecimiento.....	17
2.4. Fotosensibilidad.....	18
2.5. Métodos de fabricación de las rejillas de Bragg.....	20
2.5.1. Método holográfico.....	20
2.5.2. Método interferómetro.....	20
2.5.3. Método de mascara de fase.....	23
2.6. Aplicaciones de las rejillas de Bragg.....	25
2.6.1. Sensores.....	25
2.6.2. Filtros en fibras ópticas.....	26
2.6.3. Láseres.....	26
2.6.4. Aplicaciones de las rejillas de Bragg al monitoreo estructural.....	29
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	32
3.1. Etapa 1.....	31

 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3.2. Etapa 2.....	32
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>34</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>388</b>
5.1. Recomendaciones.....	39
5.2. Trabajos futuros.....	40
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>41</b>

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

# 1. INTRODUCCIÓN

---

Las redes de fibra ópticas actuales están siendo utilizadas cada vez más en la sociedad, ante el constante crecimiento de las redes de datos y la evolución de los medios digitales (audio, video, videojuegos, la internet, imágenes, etc.), esto conlleva a que el usuario final necesitara de un ancho de banda amplio para lograr tener una buena calidad en el servicio.

Actualmente se utiliza una tecnología llamada WDM-PON (**Wavelength división Multiplexing Passive Optical Network**), esta tecnología permite propagar varias señales de diferente frecuencia sobre una sola fibra óptica mediante un dispositivo pasivo denominado AWG (**Arrayed Waveguide Grating**) que además tiene el rol de distribuir cada una de las longitudes de onda al respectivo usuario. Estas redes permiten incrementar la capacidad de las redes de acceso ópticas actuales ya que por cada longitud de onda se pueden utilizar dispositivos pasivos como un divisor óptico —más conocido como splitter— para distribuir la señal en una red TDM-PON (**Time Division Multiplexing PON**); este divisor óptico o splitter divide las señales y envía información a cada usuario. Esta tecnología suplente la demanda de los usuarios ya que son redes de bajo costo operativo y de gran capacidad con una calidad en el servicio acorde a los servicios exigentes, que se demandan actualmente (Videoconferencias, Video bajo demanda, telefonía IP, juegos interactivos, etc.).

Ante el crecimiento de las redes de fibra óptica y la alta demanda, se observó que cada día se asignaban más longitudes de onda, así como los anchos de banda específicos a los usuarios, haciendo que la red crezca en un ritmo acelerado y se congestione la red. Se identificó que los usuarios no hacían uso frecuente de las longitudes de onda para enviar y recibir información, del mismo modo que los slots de tiempo empleados en las redes basadas en TDMA (**Time Division Multiple Access**) son subutilizados, se vio la posibilidad de



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

asignar las longitudes de onda y el ancho de banda de forma dinámica, según la demanda subyacente en la red.

En este proyecto se estudiara y por medio de un software de simulación se construirá un dispositivo el cual permita el paso de longitudes de onda especificas dependiendo de su utilización en la red o de lo que requiera el usuario. Este dispositivo tendrá como principal componente fibras que contienen rejillas de Bragg, estas fibras van a cumplir la función de un filtro óptico que de acuerdo a especificaciones dadas refleje o bloquee longitudes de onda asignadas, permitiendo que solo pasen longitudes de onda a usuarios específicos con requerimientos de mayor capacidad en el sistema.

Se pretende con el dispositivo diseñado dar una posible solución para la reutilización de las longitudes de onda en las redes WDM-PON, y llevarlo a un segundo nivel que sería el práctico y tener resultados reales que nos puedan dar seguridad en este proyecto.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 1.1. Objetivo general.

- Diseñar por medio de la herramienta de simulación Optisystem un modelo del multiplexor óptico reconfigurable que me permita filtrar longitudes de ondas, por medio de rejillas de Bragg.

## 1.2. Objetivos específicos.

- Definir la estructura interna del multiplexor óptico reconfigurable, para el correcto filtrado de las portadoras ópticas suministradas de la OLT a la ONU.
- Refinar la estructura interna del multiplexor óptico reconfigurable, mediante la sintonización de los parámetros propios de cada uno de los elementos que hacen parte del dispositivo.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 1.3. Organización de la tesis.

- **Marco teórico:** Se definen las fibras de Bragg, orígenes, leyes, clasificación, fenómenos, métodos de fabricación, y aplicaciones. ya que este es el elemento principal dentro del multiplexor óptico reconfigurable.
- **Metodología:** Se mencionan los pasos que se van a utilizar para la construcción del multiplexor óptico reconfigurable en el software de simulación, desde su investigación hasta el resultado final.
- **Resultados y discusiones:** Se analizan y se discuten los resultados mostrados en el software de simulación, se muestran gráficas, se hacen comparaciones, se da el visto bueno del funcionamiento del multiplexor óptico reconfigurable.
- **Conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro:** Se dan las conclusiones finales, recomendaciones, y se definen trabajos futuros con esta investigación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2. MARCO TEÓRICO

---

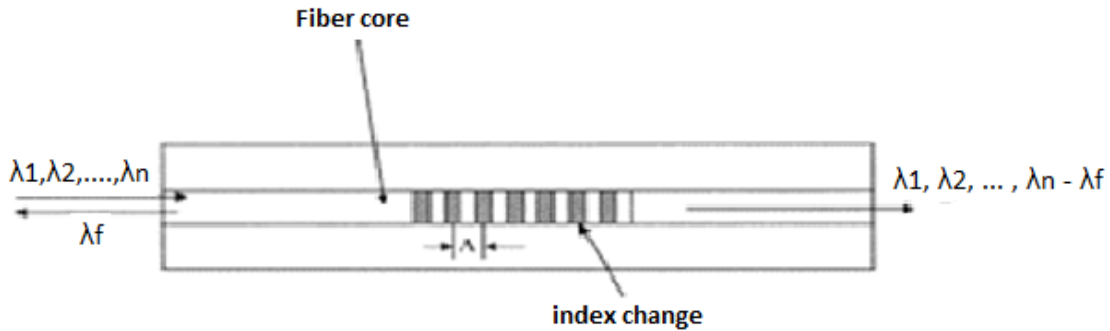
### Rejilla de Bragg.

Una rejilla de Bragg es un tipo de reflector, distribuido y construido en un corto segmento de la fibra óptica que refleja longitudes de onda particulares de la luz y transmite todos los demás. Esto se consigue mediante la creación de una variación periódica en el índice de refracción del núcleo de la fibra, lo que genera un espejo dieléctrico para una longitud de onda específica. Por tanto, una rejilla de Bragg puede ser utilizada como un filtro óptico para bloquear ciertas longitudes de onda, o como un reflector de longitud de onda específica (Docsetools, 2012).

El índice de refracción de la fibra tiene que ser modificada de forma permanente para crear una pila apropiada de las regiones de alta y de bajo índice de refracción a lo largo de una pieza de fibra óptica. Esto se logra mediante la exposición de la fibra óptica a los rayos ultravioleta (UV) con una longitud de onda alrededor de 240 nm o menos. La fotosensibilidad se debe principalmente al dopante de germanio utilizado en el núcleo de la mayoría de las fibras comerciales. La fotosensibilidad puede aumentarse elevando el nivel de dopaje germanio, o en la difusión de hidrógeno molecular, que actúa como un catalizador para la reacción del germanio con luz UV y reduce en gran medida el tiempo de exposición.

Las rejillas de Bragg también son definidas como una modulación periódica del índice de refracción a lo largo de una sección pequeña del núcleo de una fibra óptica con la habilidad de reflejar un pico espectralmente angosto de la luz guiada por la fibra. En la figura 1 se muestra un diagrama de la rejilla de Bragg (Arellano Sotelo, 2006).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 1.** Diagrama esquemático de la rejilla de Bragg.

La característica principal de las rejillas de Bragg es la banda de rechazo centrada en la longitud de onda Bragg ( $\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda$ , donde  $\Lambda$  es el campo espacial de la modulación de índice de refracción y  $N_{eff}$  es el índice efectivo del modo propagado) cuando la rejilla es iluminado por una fuente de banda ancha.

El funcionamiento de las rejillas de Bragg está basado en el principio de la reflexión de Bragg (Oullette, 2001). Cuando la luz se propaga a través de regiones que de manera periódica se alternan entre franjas de alto y bajo índice de refracción, parte de ellas es reflejada en cada interface de esta franja. Si el espacio entre estas regiones es tal que todas la reflexiones se suman en fase (es decir, que la distancia entre franjas es aproximadamente  $n$  veces la mitad de la longitud de onda) la reflexión total se puede alcanzar 100% de la luz transmitida, aun cuando las reflexiones individuales sean muy pequeñas. Esta condición es solo satisfecha por una longitud de onda especifica (longitud de onda de Bragg), para las demás longitudes de onda, las reflexiones se cancelan entre si resultando en una transmisión alta.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.1. Orígenes de las rejillas de Bragg.

La fotosensibilidad en la fibra óptica fue descubierta 1978 por Ken Hill. (Hill, Malo, Bilodeau y Johnson, 1993), durante experimentos usando fibras de sílice dopadas con germanio y radiación laser de iones de argón, en los laboratorios de Communication Research Center (CRC) en Canadá. En este experimento se observó un incremento de la atenuación cuando el núcleo de una fibra óptica se exponía prolongadamente a la luz de un láser de iones de argón. Una investigación posterior sobre el origen del incremento de la atenuación determinó que la intensidad de la luz reflejada por la fibra también incrementó significativamente como función del tiempo de exposición. Posteriormente se probó que este incremento en la reflectividad de la fibra era como resultado de una rejilla permanente (formada por índices de refracción diferentes) que se foto indujo en la fibra. Este nuevo efecto no lineal en las fibras ópticas fue llamado fotosensibilidad. A partir de este momento varios investigadores se interesaron en este fenómeno y realizaron investigaciones al respecto (Meltz, Dunphy, Glenn, Farina y Leon-Berger, 1987).

La fotosensibilidad en fibras ópticas tiene importancia tanto científica como práctica. El origen de este tipo de efecto no lineal en vidrio todavía no se entiende bien, por lo que los detalles del proceso de generación de cambio en el índice de refracción tampoco se entienden completamente. En la realidad se espera que más de un solo proceso esté involucrado en la formación dinámica de rejillas (Morey, Ball y Meltz, 1994).

Algunos vidrios, como los usados comúnmente en los espejos, lentes, etc. Se conocen desde hace cientos de años y se sabe que son transparentes a la radiación visible. Esto se debe a que no existe resonancia electrónica o molecular en este rango de frecuencias. En la resonancia molecular infrarroja la transmisión de radiación se bloquea, lo cual se manifiesta en un calentamiento gradual en la superficie. Con la radiación ultravioleta (UV), a longitudes de onda por debajo de 300 nm se va haciendo cada vez más y más energética. A esas

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

longitudes de onda corta, la energía de los fotones más alta y los enlaces electrónicos presentan resonancia. (En el caso del Si-O la absorción comienza justo por abajo de los 200 nm. y algunos defectos de bandas centrales ocurren entre 200-300 nm) (Russell, Archambault y Reekie, 1994).

El fenómeno de la fotosensibilidad no se restringe solo al germanio, si no que el cerio, el europio y el germanio con erbio han mostrado cierto grado de variaciones de sensibilidad cuando se introduce dentro del sílice de una fibra óptica, pero no son tan sensible como el germanio. En este sistema es posible que se induzcan cambios de la estructura microscópica producidos por la exposición de la radiación de la luz UV, realizando cambios en la densidad del material. (Morey et al., 1994).

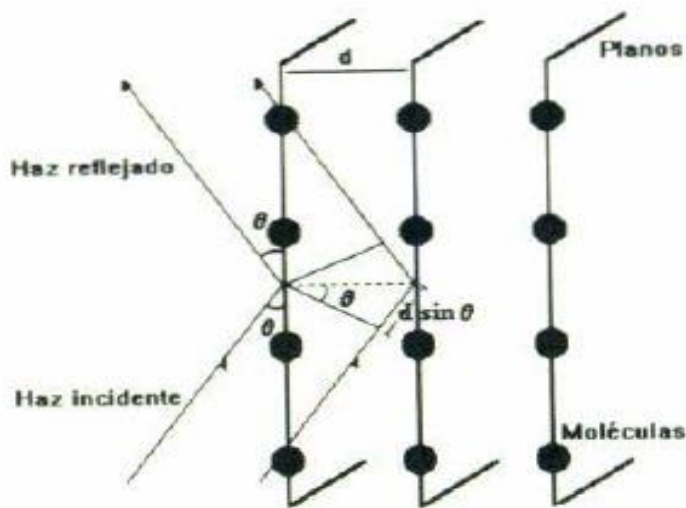
Actualmente existe dos razones de interés para la fotosensibilidad, la primera es para integrar un dispositivo reflectores en fibras que no contengan germanio. Un ejemplo son las fibras de Er:Yb, donde se utiliza mejor el fosforo en lugar de germanio para incrementar la transferencia de energía. La segunda razón es que una fibra común con germanio exhibe un cambio en el índice de refracción como función de la exposición a la luz UV y esto no es deseable cuando se está imprimiendo rejillas de Bragg. (Kashyap, 1994).

## **2.2. Ley de Bragg.**

La estructura de los cristales puede estudiarse mediante la difracción de un haz de electrones, fotones o neutrones que incide sobre ellos. La difracción de este haz depende de la estructura del cristal y de la longitud de onda del haz incidente (McKelvey, 1996). Los haces difractados en todas las direcciones aparecen cuando la longitud de onda incidente es comparable o menor que la constante de la red de la estructura cristalina.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En 1913 W.L Bragg dio una sencilla explicación para los haces difractados de un cristal. El considero los planos paralelos de la red distantes entre sí por una separación  $d$ , como se muestra en la **figura 2**, en ella se considera la radiación incidente perpendicular a los planos. La diferencia de trayectoria correspondiente a haces reflejados en planos adyacentes en  $2d\sin\theta$ , midiéndose  $\theta$  a partir del plano, y se produce interferencia constructiva de la radiación procedente de planos sucesivos cuando la diferencia de trayectorias es un numero entero  $N$  de la longitud de onda que incide, de modo que  $2d\sin\theta = N\lambda$ . Esta fórmula deducida por Bragg es simple, pero resulta convincente porque reproduce los resultados correctos. La reflexión de Bragg puede generarse únicamente para  $\lambda \leq 2d$  (Kittel, 1976).



**Figura 2.** Esquema de un haz de luz reflejado por “los planos paralelos” formados dentro de un cristal.

La ley de Bragg es una consecuencia de la periodicidad de la red cristalina. Dentro de un cristal existen muchos planos para los cuales los haces procedentes pueden ser reflejados para interferir constructivamente. Dependiendo del plano escogido, algunos de ellos concentraran más átomos que actúen como agentes reflectores que otros. En general, los haces reflejados por estos planos serán los de mayor intensidad.



	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

La explicación dada por Bragg para deducir la “ley de Bragg” se puede aplicar de manera análoga a las interfaces de un apilamiento de películas delgadas y, por lo mismo, a la interpretación del funcionamiento de una rejilla de Bragg dentro del núcleo de una fibra óptica, ya que físicamente, este ensamble de películas delgadas se comportan como lo hacen los planos de un cristal. En este caso las longitudes de onda que satisfacen la ecuación darán como resultado a una alta reflectancia de la longitud de onda incidente debido a que los haces reflejados por las interfaces interfieren constructivamente en la superficie inicial.

## **2.3. Clasificación de las rejillas Bragg.**

Las rejillas de Bragg se pueden clasificar en varios tipos, pero nos concentraremos específicamente en dos sistemas de rejillas, en función de las características de acoplamiento y comportamiento de crecimiento durante la fabricación de la rejilla.

### **2.3.1. clasificación por características de acoplamiento.**

Hay tres tipos diferentes de rejillas básicas dependiendo de la función de acoplamiento. Las rejillas de Bragg descritos anteriormente se refieren generalmente como rejillas de corto periodo. El periodo de red es típicamente 0,25 a 0,5  $\mu\text{m}$  con la luz acoplada en la dirección de propagación hacia atrás, la reflexión. Inclinando la periferia de la rejilla de corto periodo, es posible acoplar la luz hacia afuera desde el núcleo en los modos de radiación que se propaga hacia atrás. Estas rejillas de pérdida se refieren generalmente a las rejillas como sesgadas o inclinadas. Tales rejillas se han utilizado para la ecualización de ganancia en los amplificadores de fibra dopada con erbio (Riant, 2002).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Un tercer tipo de rejillas se conoce como rejillas de periodo largo (Vengsarkar, Lemaire, Judkins, Bhatia, Erdogan y Sipe, 1994). Estos tienen un periodo que es típicamente de 100 a 500  $\mu\text{m}$  y la luz se acopla en modos de revestimiento de propagación hacia adelante. Actuando como filtros de pérdida, estas rejillas se utilizan normalmente para la ecualización de ganancia. Debido al largo período de la rejilla, se pueden fabricar con éxito utilizando punto por punto de la escritura, ya sea con la exposición UV o calor. Para el calentamiento local de la fibra, se utiliza un láser de  $\text{CO}_2$  o una descarga de arco eléctrico que puede ser utilizado (Karpov, Grekov, Dianov, Golant, Vasiliev, Medvedkov, Khrapko, 1997).

### **2.3.2. clasificación por características de crecimiento.**

También hay un esquema de clasificación utilizado en función del comportamiento de crecimiento de la rejilla durante la inscripción. Este esquema se utiliza principalmente para describir las rejillas de periodo corto. Antes del descubrimiento de la fotosensibilidad en la fibra, se utilizó rejillas de relieve superficial para algunas aplicaciones. Donde una superficie ondulada / modificada de revestimiento cerca de los resultados fundamentales en la interacción con el campo evanescente causando fuerte reflexión. Estas rejillas se fabrican típicamente a través de ataque químico o pulido (Rowe, Bennion y Reid, 1987).

**Rejillas tipo 0 o rejillas de Hill:** son rejillas auto-organizadas (Hill, Fujii y Johnson, 1978), formadas por el lanzamiento de luz en la fibra de que la reflexión parcial en la cara final de la fibra creando el patrón de interferencia periódica. Como en la rejilla se forma más luz será reflejada dentro de la fibra y por lo tanto aumentar la tasa de crecimiento de la rejilla. Estas rejillas tienen un uso limitado, ya que la longitud de onda de la escritura es también la longitud de onda de Bragg de la rejilla.

**Rejillas tipo 1:** se refiere a las rejillas más comunes caracterizadas por un crecimiento monótono.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

**Rejillas tipo 2:** son de alta potencia para rejillas de pulso único (daño) que se caracterizan por las grandes pérdidas en el lado de longitud de onda corta de la longitud de onda de Bragg. El daño a menudo es localizado en la interface núcleo-revestimiento (Archambault, Reekie y Russel, 1993).

**Rejillas tipo 2a:** se caracterizan por el hecho de que la reflexión crece inicialmente que para rejillas del Tipo 1 luego disminuye seguido de un crecimiento posterior. También se hace referencia a las rejillas de índices negativos, estas rejillas probablemente contienen dos componentes; una rejilla de índice positivo (tipo 1) y una rejilla de índice negativo (Dong y Liu, 1997).

**Composición química de las rejillas:** (CCGs), no encajan claramente en ninguna de los tipos rejilla definidos anteriormente. Las propiedades ópticas de la rejilla final, no difieren de tipo 1 y tipo 2a, sin embargo, el procedimiento de fabricación, el crecimiento del índice de refracción y las propiedades térmicas difieren significativamente. La modulación del índice de refracción se atribuye a una variación periódica de uno o varios agentes de dopado en el núcleo. El mecanismo de la descomposición química de una rejilla requiere la difusión de los dopantes moduladas y por lo tanto estas rejillas muestran estabilidad térmica excepcional.

## 2.4. Fotosensibilidad.

Cuando una fibra óptica es radiada con luz ultravioleta el índice de refracción de la fibra es modificado permanentemente; este efecto se denomina fotosensibilidad (Hill et al. 1993). El cambio en el índice de refracción es permanente en el sentido de que durará por varios años (tiempo de vida aproximado de hasta 25 años). Inicialmente la fotosensibilidad fue entendida como un fenómeno asociado solamente a fibras con núcleo dopado con

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

germanio. Posteriormente, la fotosensibilidad fue observada en una amplia variedad de fibras, muchas de las cuales no contenían germanio como dopante. Sin embargo, las fibras ópticas con núcleo dopado con germanio siguen siendo las más empleadas en la fabricación de dispositivos basados en rejilla de Bragg.

El cambio en el índice de refracción depende de diferentes factores entre ellos: las condiciones de irradiación (longitud de onda e intensidad), la composición del núcleo de la fibra óptica y cualquier procesamiento de la fibra antes y después de la irradiación. Una gran variedad de láseres pulsados y de onda continua en diferentes rangos de longitud de onda, desde el visible al ultravioleta, han sido usados para foto inducir cambios en el índice de refracción de la fibra óptica. Las fuentes de luz más comunes son los láseres excimer de KrF y ArF que emiten en los 248 y 193nm respectivamente. Típicamente, el núcleo de la fibra óptica es expuesto a irradiación láser por algunos minutos a niveles pulsados de entre 100 a 1000  $\text{mJ cm}^{-2} \text{ pulse}^{-1}$ , (Pulsos por segundo). En estas condiciones el valor del índice de refracción en una fibra monomodo dopada con germanio varía entre  $10^{-5}$  y  $10^{-3}$ .

El índice de refracción puede ser incrementado sometiendo a la fibra a un proceso de hidrogenización (Hill et al. 1993). Para esto, un segmento de fibra se coloca dentro de una cámara que se encuentra a temperatura ambiente y que contiene hidrogeno sometido a una presión que puede varía desde las 100 a las 1000 atmósferas. Después de unos cuantos días, el hidrógeno en su forma molecular se difunde en la fibra de sílice. La fibra es retirada de la cámara de gas y es irradiada antes de que el hidrógeno logre escaparse de la estructura de la fibra. A través de este procedimiento se logran incrementos de hasta 100 veces en el índice de refracción fotoinducido en el núcleo de la fibra óptica.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.5. Métodos de fabricación de las rejillas de Bragg.

A continuación se describen algunas técnicas para la elaboración de las rejillas de Bragg en fibras ópticas.

### 2.5.1. Método holográfico.

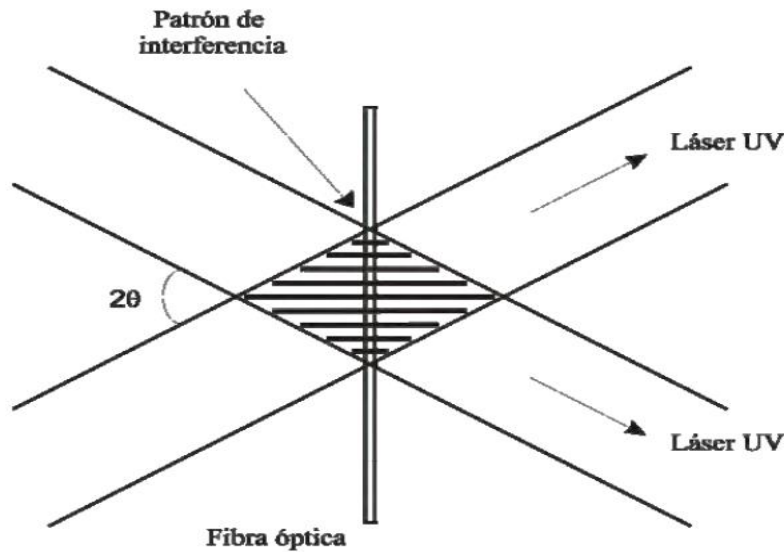
En este método de impresión holográfico se realiza puliendo el revestimiento de la fibra para tener acceso al campo evanescente del núcleo, o empleando una fibra con sección en “D”. Luego se coloca foto resina y se expone holográficamente usando un láser de longitud de onda corta. Después, normalmente se aplica una película de índice de refracción alto para incrementar el campo y optimizar su interacción con las corrugaciones de la rejilla (Udd, 1992).

### 2.5.2. Método interferómetro.

En este caso la elaboración de las rejillas de Bragg depende de los parámetros de interferencia que se producen entre dos rayos de luz coherente cuando se intersectan uno con el otro a un ángulo dado (Udd, 1992). Esta situación se muestra en la **figura 3**. Esta técnica ha sido usada en una configuración en la cual una fibra óptica monomodal sensibilizada con germanio es expuesta al patrón de interferencia. En el núcleo de la fibra se produce una periodicidad del índice de refracción en una variación longitudinal a lo largo de la fibra.

Este método se requiere de un estricto control experimental para evitar todo tipo de vibraciones mecánicas externas que puedan interferir en la fabricación de la rejilla de Bragg.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



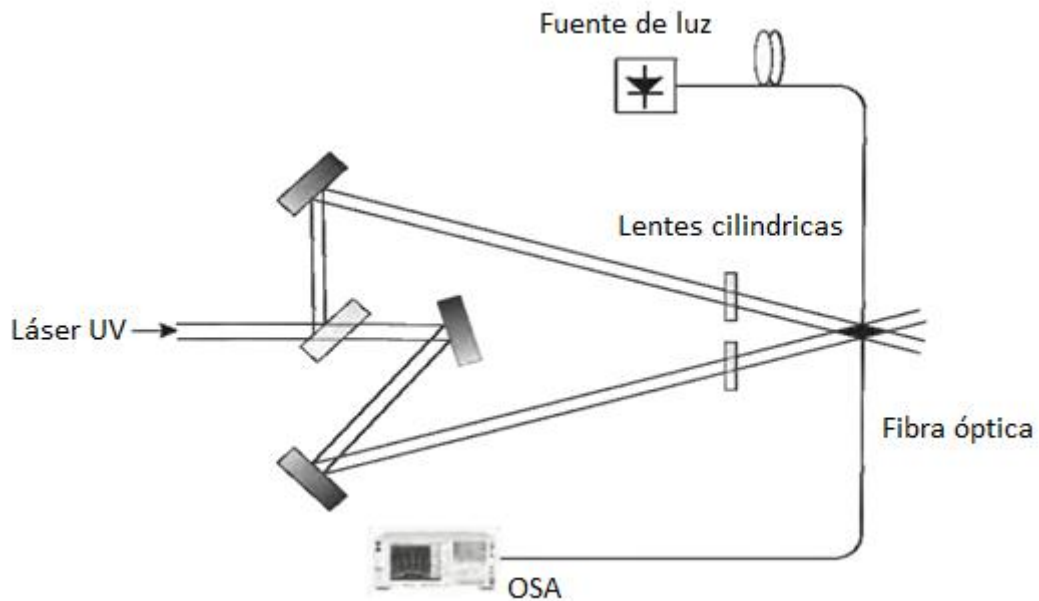
**Figura 3.** Fabricación básica de una rejilla de Bragg mediante método interferómetro.

Por medio de este método de interferómetro se han reportado dos técnicas principales las cuales se describen a continuación (Kashyap, 1994):

En la primera técnica se utiliza un divisor de haz para producir dos rayos, los cuales interfieren en una fibra usando dos espejos que los dirigen. El arreglo se muestra en la **figura 4**. En éste arreglo se permite que el ángulo entre los rayos sea variable para que el periodo del patrón de interferencia en la fibra pueda alterarse. Con ésta técnica es posible imprimir rejillas en 850 nm, 1100nm, 1300nm y 1500nm principalmente (Meltz, Morey y Glenn, 1978). Una lente cilíndrica se utiliza para enfocar sobre la fibra. Este interferómetro es excelente para tiempos cortos de exposición, pero requiere de un cuidadoso diseño si se quiere utilizar para tiempos largos de exposición.

Debido a que los espejos pueden transmitir vibraciones, cambios diferenciales en la longitud de la trayectoria pueden producir interferencia fuera de la rejilla o borrar el

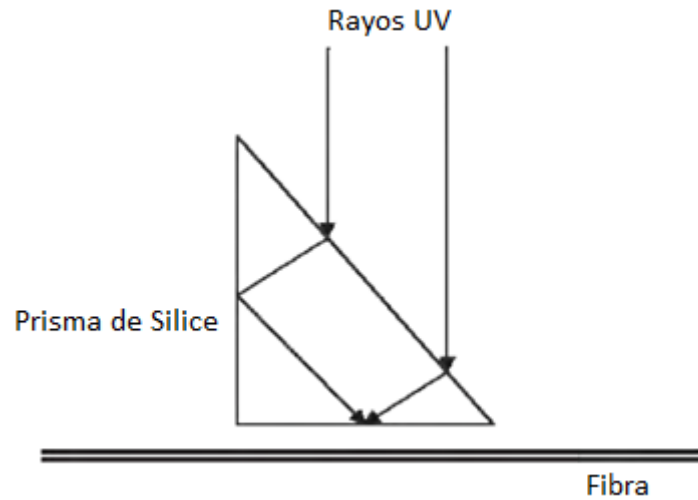
periodo de ella. Sin embargo, este arreglo es conveniente usando láseres de baja coherencia temporal de tal forma que la longitud de la trayectoria pueda hacerse idéntica. Se ha reportado que este tipo de interferómetro y sus variaciones pueden imprimir rejillas con un solo pulso de luz UV mientras que la fibra se manufactura.



**Figura 4.** Interferómetro de espejos para imprimir rejillas.

La segunda técnica alternativa se muestra en la **figura 5**, en ella, un rayo de luz UV se dirige de la hipotenusa de un prisma de noventa grados hacia la cara perpendicular y a la fibra.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



**Figura 5.** Interferómetro de prisma para imprimir rejillas en las fibras ópticas.

La fibra se coloca en la cara inferior del prisma y se hace una lente cilíndrica para hacer que el rayo tenga un foco lineal sobre ella. Debido a que el interferograma se forma al juntar los rayos, este interferómetro requiere el uso de una fuente con coherencia espacial. El interferómetro es intrínsecamente estable, debido a que la diferencia de trayectoria se genera con un prisma y permanece inafectada por vibraciones. Con ésta técnica se han reportado tiempos de exposición de alrededor de 8 horas (Kashyap, Armitage, Wyatt, Davey y Williams, 1990).

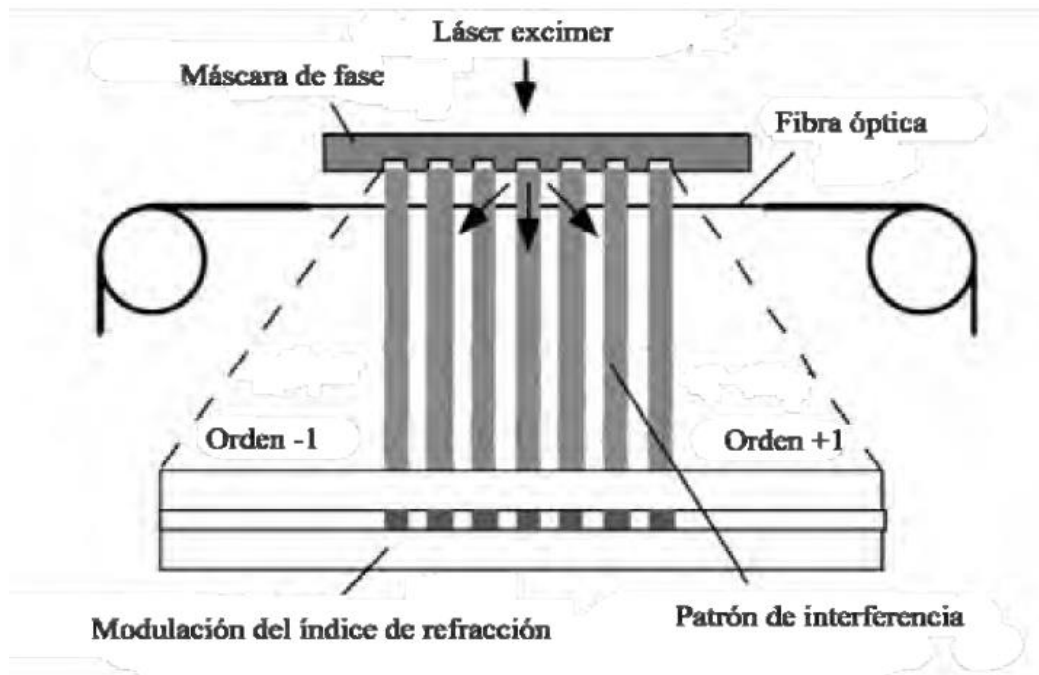
En ambos métodos se requiere una alineación angular cuidadosa del interferómetro para escoger la longitud de onda de reflexión deseada.

### **2.5.3. Método máscara de fase.**

Las técnicas mencionadas anteriormente no son convenientes para escribir rejillas con la misma longitud de onda en forma reproducible, debido a que es muy difícil lograr reproducir el patrón de interferencia entre los rayos. Sin embargo, existe una técnica



simple, mostrada en la **figura 6**, la cual resuelve el problema de reproducibilidad; esta ésta basada en la replicación de una rejilla de relieve formada como una máscara de fase en transmisión. Un rayo UV se difracta por la máscara en los órdenes -1, 0 y +1 (Kashyap, 1994).



**Figura 6.** Técnica de impresión holográfica basada en una máscara de fase.

Este método de fabricación es altamente estable, e insensible a traslaciones de rayos, y es extremadamente compacto. Esta técnica permite que las rejillas se repliquen en el núcleo de la fibra (Prohaska, Snitzer, Rishton y Boegli, 1993).

El método de máscara de fase ha simplificado la producción de rejillas bajando los requerimientos del láser tanto en coherencia espacial, como en coherencia temporal.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 2.6. Aplicaciones de las rejillas Bragg.

La alta demanda de componentes basados en fibras ópticas se ha incrementado con el desarrollo de nuevas redes de comunicación. Existe un gran número de dispositivos que pueden desarrollarse con fibras foto sensitivas, entre estos incluyen filtros de reflexión de ancho de banda ancho, fibras láser y láseres semiconductores con rejillas en cavidad láser externa, filtros pasabandas, compensadores de dispersión, fuentes láser de doble frecuencia con anchos de línea estrechos, fuentes de pulsos no lineales, fuentes de solitones, y aplicaciones en redes sensoras (Kashyap, 1994).

### 2.6.1. Sensores.

Desde los primeros experimentos realizados en el grabado de rejillas de Bragg en una fibra óptica, se encontró que estos dispositivos tenían una importante dependencia de la temperatura y el esfuerzo aplicado externamente. La principal ventaja de este dispositivo es que la respuesta que entrega está codificada en longitud de onda, lo que lo hace un sensor autorreferenciales (es decir no necesita señal de referencia). La respuesta de una rejilla es inmune a las fluctuaciones de potencia de la fuente y las pérdidas en los conectores. Las bajas pérdidas de inserción y el angosto ancho de banda de reflexión de las rejillas es una ventaja que se puede aprovechar en el desarrollo de sistemas multiplexados.

Además las rejillas poseen las ventajas inherentes a las fibras ópticas, por ejemplo, inmunidad a la interferencia electromagnética, flexibilidad, estabilidad, tolerancia a las altas temperaturas, ligeras, e incluso durabilidad en un medio con altos niveles de radiación.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Los sensores basados en rejilla de Bragg pueden ser aplicados para medir esfuerzo, presión, voltaje, campos magnéticos y eléctricos, corriente, flujo, vibraciones, perturbaciones acústicas, y muchos otros parámetros (Kashyap, 1994).

### **2.6.2. Filtros en fibras ópticas.**

Existen rejillas con anchos de banda que van desde los 0.05 nm a 20 nm, que son utilizadas como filtros de ancho de banda estrecho. Estos filtros pueden utilizarse como controladores de elementos que estabilizan láseres semiconductores o láseres DBR (Distributed Bragg Reflector), reflectores de ancho de banda angosto para fibras laser, o simplemente como reflectores de estrecho ancho de banda para una gran variedad de aplicaciones. Se pueden imprimir múltiples rejillas reflectoras, en una sola pieza de fibra para generar un gran número de reflexiones (Legoubin, Fertein, Douay, Bermage, Niay y Georges, 1991).

### **2.6.3. Láseres.**

#### **Láseres semiconductores con rejillas en fibra óptica.**

Los láseres semiconductores pueden recubrirse con capas antirreflectoras en la cara de salida; entonces sí se acopla una fibra mediante la ayuda de un lente, y luego se empalma en el otro extremo de ésta misma fibra con una rejilla reflectora, se forma un resonador que permite que el láser oscile en la longitud de onda de Bragg de la rejilla. El ancho de banda de la rejilla puede ser estrecho para que con esto se obligue la operación a una sola longitud de onda (Kashyap, 1994).

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## Láseres con rejilla en fibras activadas con tierras raras.

Las rejillas reflectoras en fibras en 1550 nm fueron las primeras que se aplicaron a las fibras láser. Las rejillas pueden imprimirse también directamente en la fibra activada con tierras raras, pero debido a que las fibras tienen muy poco o nada de germanio en el núcleo, es más difícil de imprimir rejillas que en aquellas que están altamente activadas con germanio; sin embargo esto se ha logrado. Estas rejillas pueden usarse para formar cavidades láser de bajas pérdidas, debido a que no hay pérdidas por fusión.

A pesar de todo puede ser más conveniente imprimir las rejillas en una fibra aparte y aceptar las pérdidas adicionales por empalme (Kashyap, 1994). La tabla 1 muestra las principales longitudes de onda de emisión láser para fibras ópticas dopadas con diferentes iones de tierras raras.

Ion	Longitudes de onda de emisión típicas
neodimio ( $\text{Nd}^{3+}$ )	1.03-1.1 $\mu\text{m}$ , 0.9-0.95 $\mu\text{m}$ , 1.32-1.35 $\mu\text{m}$
ytterbio ( $\text{Yb}^{3+}$ )	1.0-1.1 $\mu\text{m}$
erbio ( $\text{Er}^{3+}$ )	1.5-1.6 $\mu\text{m}$ , 2.7 $\mu\text{m}$ , 0.55 $\mu\text{m}$
thulio ( $\text{Tm}^{3+}$ )	1.7-2.1 $\mu\text{m}$ , 1.45-1.53 $\mu\text{m}$ , 0.48 $\mu\text{m}$ , 0.8 $\mu\text{m}$
praseodimio ( $\text{Pr}^{3+}$ )	1.3 $\mu\text{m}$ , 0.635 $\mu\text{m}$ , 0.6 $\mu\text{m}$ , 0.52 $\mu\text{m}$ , 0.49 $\mu\text{m}$

**Tabla 1.** Longitudes de onda de emisión típicas en láseres de fibra óptica dopada con iones de tierras raras.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## **Láseres con longitud de onda selectiva.**

El ancho de banda de ganancia de las fibras activadas con tierras raras o el de un láser semiconductor se extiende sobre decenas de nanómetros. Es posible hacer operar el láser a la longitud de onda de Bragg de una rejilla una vez que ésta se empalma a la fibra activada o se acopla al semiconductor. Sin embargo algunas veces es necesario cambiar la longitud de onda de láser sin la complicación de empalmar otra rejilla. Un dispositivo que supera estas limitaciones es precisamente el láser de longitud de onda selectiva. Este dispositivo ha sido posible solo con rejillas de reflexión de ancho de banda estrecho. La característica esencial de este láser es la fácil conectorización tanto del medio con ganancia como de las rejillas reflectoras. Ambos reflectores de la cavidad son removibles mediante un conector mecánico. Con el solo cambio del reflector de fibra conectorizado, es posible cambiar la longitud de onda del láser. Este principio se ha demostrado con fibras activadas y con láseres semiconductores (Chernikov, Kashyap, McKee y Taylor, 1993).

## **Láseres de doble frecuencia.**

Debido a que las rejillas de reflexión en fibra tienen un ancho de banda estrecho, es posible conectar dos rejillas en serie y forzar a un láser a operar con dos longitudes de onda de una manera simultánea. Por ejemplo, una longitud corta de fibra activada con erbio se puede empalmar con dos rejillas reflectoras a diferentes longitudes de onda de Bragg. El otro extremo de la fibra se coloca de una manera adecuada a un espejo altamente reflector. Cuando se bombea con un láser de zafiro activado con titanio a 980nm dos picos de emisión son observados. La salida es una señal de 60GHz y cada línea de láser tiene un ancho de línea de menos de 1GHz (Corning, 2014).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## **2.6.4. Aplicaciones de las rejillas de Bragg al monitoreo estructural.**

Normalmente las rutinas de inspección de las estructuras civiles tales como puentes, presas, túneles, edificios, etc., dependen de una inspección visual periódica. El uso de sensores ópticos modernos da lugar a mediciones en tiempo real, que monitorean la formación y evolución de defectos estructurales. La ventaja de las fibras ópticas es que pueden ser adheridas a estructuras ya existentes o bien embebidas en concreto. Una de las aplicaciones más importantes de las rejillas de Bragg es su aplicación como sensor para monitorear la distribución de esfuerzos en este tipo de estructuras.

Las rejillas de Bragg en fibra óptica son elementos sensores simples e intrínsecos que tienen la capacidad inherente de auto reverenciarse y multicanalizarse a lo largo de una fibra óptica. Estas ventajas de las rejillas de Bragg sobre otro tipo de sensores de fibra óptica, las han hecho muy atractivas para el desarrollo e implementación de muchos sistemas prácticos para el monitoreo de grandes estructuras y de objetos con acceso difícil para su inspección (Rao, 1999).

Para el censado en distintos puntos distribuidos de manera discreta a lo largo de la fibra óptica o censado cuasidistribuido en monitoreo estructural, se han desarrollado diferentes técnicas de multicanalización. Entre ellas se encuentra la técnica de multicanalización por división de longitud de onda que permite utilizar de 10 a 20 rejillas, con longitudes de onda de Bragg diferentes, en un solo arreglo de sensores. Por otro lado, la multicanalización por división de tiempo puede incrementar este número mediante la reutilización del espectro de la fuente. Sin embargo, en orden de incrementar significativamente el número de sensores multicanalizados, se han desarrollado técnicas que combinan la multicanalización

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

por división de onda con la multicanalización por división de tiempo, del espacio y de la frecuencia (Rao, Webb y Jackson, 1996).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

### 3. METODOLOGÍA

---

El diseño y simulación del multiplexor óptico reconfigurable se realizara por medio de la herramienta Optisystem de Optiwave; este software permite la simulación de sistemas de comunicación por medio de fibra óptica a nivel de capa física, incorporando una amplia librería de componentes (transmisores, fibras, receptores, amplificadores ópticos, entre otros). Incluye igualmente instrumentos virtuales como osciloscopios, analizadores de espectros ópticos y eléctricos, o diagramas de ojo; aunque su principal instrumento virtual es un estimador de la tasa de bit (**BER**), el cual nos permite medir el parámetro de calidad básico en los sistemas de transmisión digital.

Luego de dar a conocer la herramienta de simulación que se va a utilizar para el diseño, se procede a desarrollar la metodología propuesta para realizar el presente proyecto. La metodología tendrá dos etapas: una etapa para definir los componentes que harán parte de la estructura del multiplexor en el diseño para luego su construcción en el software de simulación, y dos es refinar la estructura del diseño mediante parámetros propios de cada componente para obtener los resultados óptimos.

#### **3.1. Etapa 1:** Definir los componentes para el diseño del multiplexor óptico y su construcción en el software Optisystem.

**Fase 1:** Se realiza un bosquejo del multiplexor óptico con componentes teóricos, se definen parámetros básicos, como frecuencias y anchos de banda.



 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

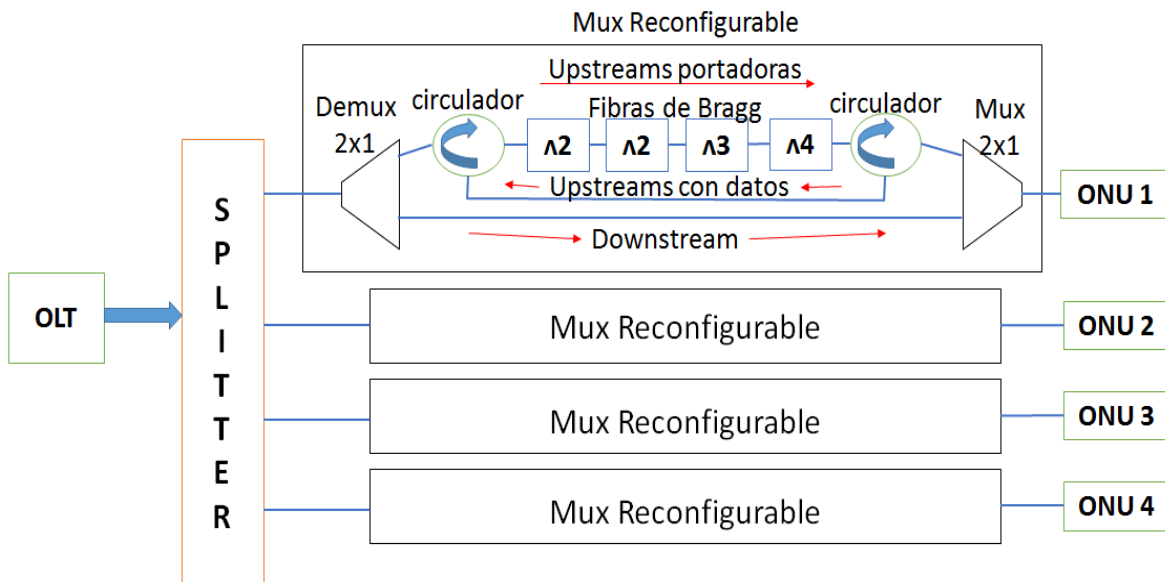
**Fase 2:** En el software de simulación Optisystem proporcionado por el ITM, se construirá el multiplexor óptico con el bosquejo realizado en la fase anterior, se añadirán todos los dispositivos que harán parte de la estructura del multiplexor y se hacen pruebas iniciales.

### **3.2. Etapa 2:** Refinar la estructura del dispositivo para obtener los resultados esperados.

**Fase 1:** Se hacen cambios en los dispositivos de la estructura del multiplexor óptico, de acuerdo a las simulaciones realizadas en software.

**Fase 2:** Por medio de los instrumentos de medida se analizan los resultados de las simulaciones y se hacen ajustes minuciosos en la configuración de los componentes para mayor confiabilidad en el sistema del multiplexor óptico configurable.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



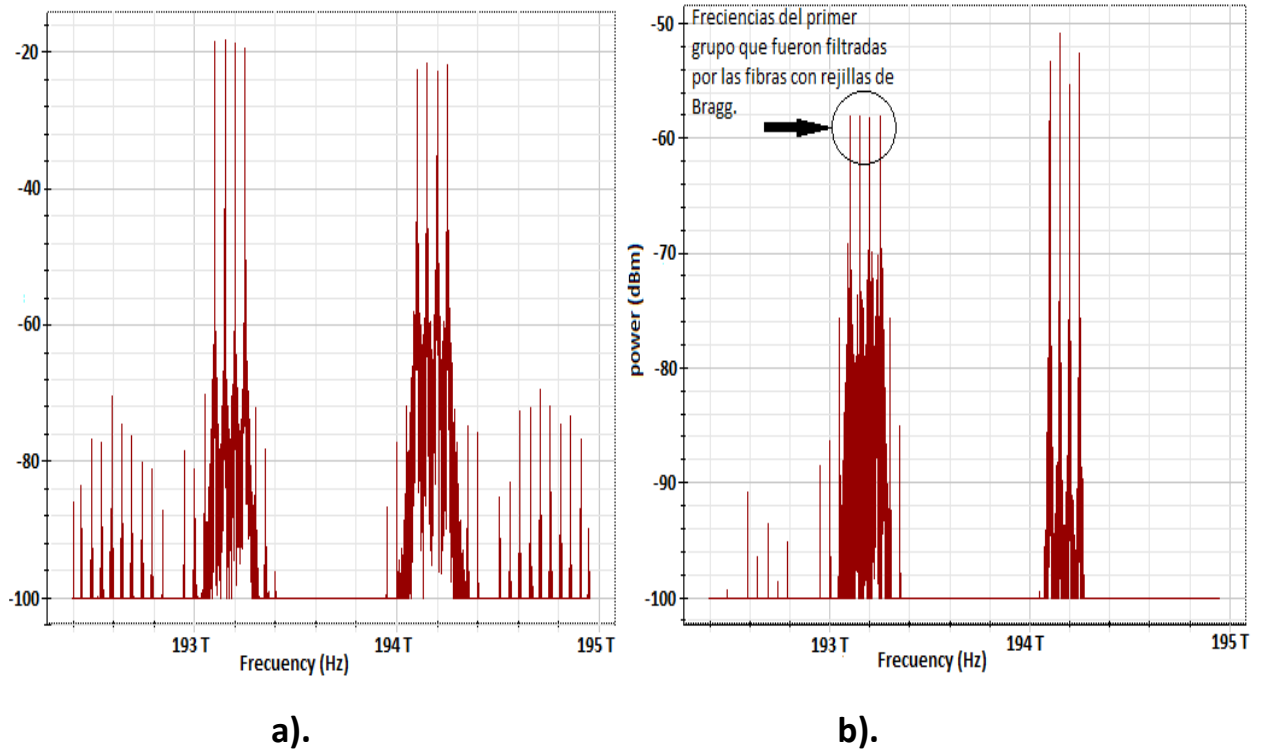
**Figura 7.** Esquema del multiplexor óptico reconfigurable.

En el software Optisystem se construyó y se simuló el bosquejo mostrado en la figura anterior (**figura 7**), se utilizaron dos grupos de frecuencias: El primer grupo está asignado así 193.1 THz, 193.15 THz, 193.2 THz, 193.25 THz con un ancho de banda de separación de 50 GHz entre cada frecuencia; el segundo grupo está asignado así 194.1 THz, 194.15 THz, 194.2 THz, 194.25 THz, con un ancho de banda de separación de 50 GHz entre cada frecuencia. La separación entre los dos grupos es de 1 THz.

Se añadieron a la simulación dos equipos de medición, uno es el analizador de espectro óptico (**OSA**) y el otro equipo es el medidor de la tasa de error de bit (**BER**); con el primero se va analizar el comportamiento en la señal cuando pasa por el multiplexor óptico

reconfigurable, y el segundo se va analizar la calidad de la señal a la salida del sistema del multiplexor.

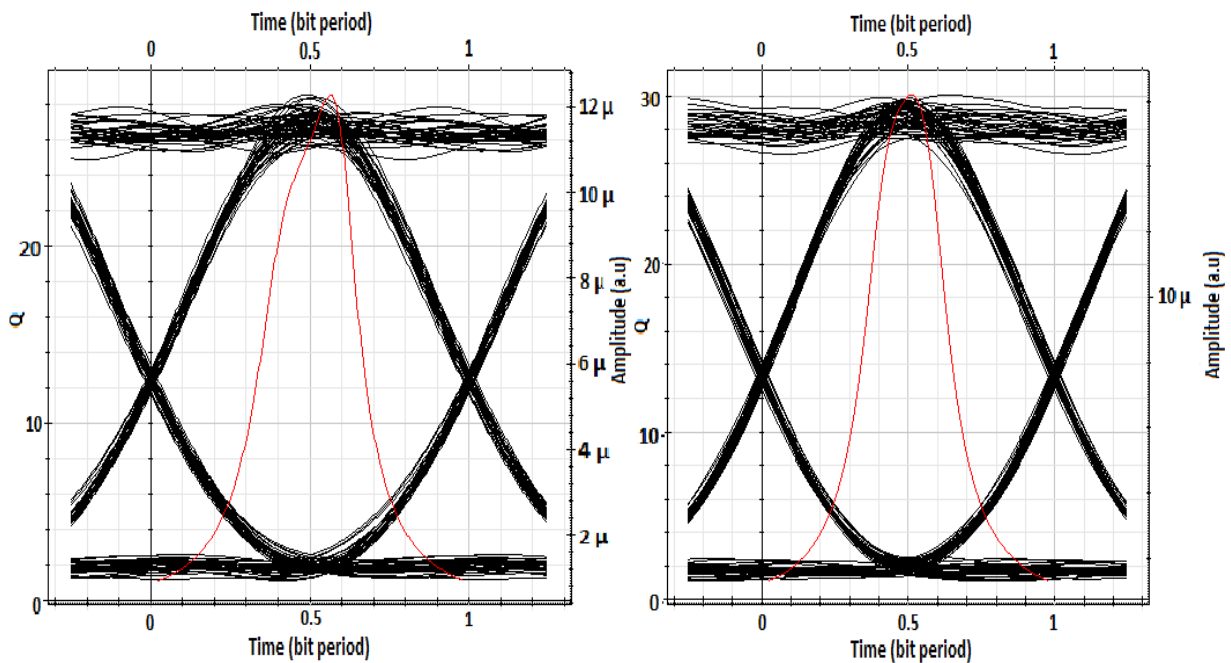
A continuación se discutirán los resultados obtenidos y analizados durante la simulación del multiplexor óptico reconfigurable:



**Figura 8. a)** Señal antes de entrar al multiplexor óptico, **b)** Señal después de ser filtrada por fibras con rejillas de Bragg.

En la figura anterior (**figura 8**) se tiene dos figuras comparativas la cual muestra la señal con los dos grupos de frecuencias asignadas y en diferentes puntos, antes y después de recorrer el multiplexor óptico reconfigurable. La figura de la izquierda representa la señal antes de entrar al multiplexor, y como se puede ver los dos grupos de frecuencias tienen una potencia cercana a los -20 dBm.

La figura de la derecha representa la señal cuando ha recorrido al multiplexor reconfigurable, pero en esta figura solo nos interesa las frecuencias del primer grupo ya que estas, van a hacer filtradas por las fibras con rejillas de Bragg durante el paso de la señal por el multiplexor, cada fibra va tener asignada una frecuencia del primer grupo para ser filtrada. En la figura se puede observar que la señal ha tenido una atenuación y ha bajado su potencia significativamente con respecto a la figura de la izquierda, se pasó de un nivel inicial aproximado de -20 dBm hasta un nivel final de -58 dBm, esto nos quiere decir que las fibras con las rejillas de Bragg asignadas a cada frecuencia, están realizando su trabajo de filtrado y me atenúan la señal a un nivel requerido, aunque estas fibras con las rejillas de Bragg se pueden configurar de acuerdo a nuestras necesidades y dejarme pasar frecuencias que se necesite utilizar en el sistema.



**Figura 9.** Señal obtenida por el analizador de BER a la salida del multiplexor óptico reconfigurable.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En la figura anterior (**figura 9**), se tiene el resultado obtenido por el medidor de la tasa de error de bit (**BER**) a la salida del multiplexor óptico reconfigurable, en estas graficas se tiene solo el análisis de 2 señales del segundo grupo de frecuencias que asignamos en el inicio del proyecto, en el cual se puede observar dos indicadores los cuales nos van a indicar la calidad de la señal, el primero en el factor Q o el factor de calidad, y el segundo es el diagrama de ojo.

En el factor Q se puede observar un poco de variación entre las dos figuras, la primera figura corresponde a la frecuencia de 193.1 THz, y tiene un nivel de factor Q de 29.58 y en la segunda figura a la cual la frecuencia es 193.2 THz el factor Q de 31.94, lo cual quiere decir que tenemos un factor Q con buenos niveles y aceptables para nuestro sistema del multiplexor óptico reconfigurable y que no habrá problema alguno durante el tráfico de datos.

En el diagrama de ojo obtenidos en el análisis de las dos señales se puede observar un buen flujo en el sistema del multiplexor, ya que estos diagramas los podemos observar continuos y sin mucha distorsión que me pueda afectar el sistema, en estos diagramas se puede ver solo un poco de distorsión a un lado del diagrama pero esto es debido a la cercanía del flujo de las otras frecuencias, pero no afecta la señal que estamos transmitiendo, además se puede decir que el sistema no está siendo afectado por ruido y por ello no hay distorsión en el sistema.

Con las discusiones anteriores de los resultados obtenidos, tanto dentro del multiplexor óptico como a la salida del sistema, se ha obtenido resultados aceptables y precisos, con los cuales se puede decir que la simulación del multiplexor óptico reconfigurable en el software Optisystem ha sido satisfactorio.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5. CONCLUSIONES

---

- El multiplexor óptico reconfigurable mediante rejillas de Bragg, se empleó para dar una solución al problema de asignación y congestión de longitudes de onda en la tecnología WDM-PON. El principal elemento del multiplexor son las fibras que contiene rejillas de Bragg a las cuales se les asignaron 4 frecuencias (193,1 THz, 193,15 THz, 193,2 THz, 194,25 THz, con un ancho de banda de separación de 50 GHz). mediante el análisis de la simulación del multiplexor se observó que la señal de las 4 frecuencias asignadas al paso del sistema de fibras con las rejillas de Bragg se atenuó en forma variable, y por medio de la variación del parámetro del índice efectivo (effective index) se pudo graduar las señales a un nivel fijo de acuerdo a la necesidad planteada en el proyecto (filtrado de longitudes de onda mediante rejilla de Bragg), el cual paso de un nivel aproximado de -20 dBm a un nivel aproximado de -58 dBm en las 4 frecuencias, con lo anterior se puede concluir que las fibras que contienen rejillas de Bragg se pueden utilizar como filtros ya que atenúan la señal, y realizando cambios en sus parámetro (effective index, longitud de la rejilla, numero de segmentos, y frecuencia.) podemos atenuar la señal a niveles requeridos en futuros proyectos con el multiplexor.
- En el multiplexor óptico reconfigurable se utilizó un segundo grupo de frecuencias (194.1 THz, 194.15 THz, 194.2 THz, 194.25 THz con ancho de banda de separación entre ellas de 50 GHz.), empleando transmisores ópticos para su transmisión en el sistema del multiplexor, y en la salida receptores ópticos para recibir la señal transmitida, también se conectó a estos transmisores analizadores de BER (Bit Error Rate) para estudiar la señal a la salida del multiplexor. realizando la simulación y analizando el estado de la señal a la salida del multiplexor por medio del instrumento de medida (analizador de BER) se pudo concluir que la señal cuenta con

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

un alto nivel del factor Q (factor de calidad), esto indica que la señal tiene una tasa baja de pérdida en el sistema; y observando el diagrama de ojo proporcionado por este instrumento se pudo observar que el sistema induce poca distorsión, ruido e interferencia en la señal. Un atenuador óptico a la entrada del sistema ayudo a obtener los buenos resultados a la salida ya que este proporciona una estabilidad y hace una señal más clara de la transmisión.

## 5.1. Recomendaciones.

Al haber realizado la simulación del multiplexor óptico reconfigurable se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Al trabajar con el multiplexor óptico se debe tener cuidado si se va a cambiar las frecuencias, ya que los dispositivos dentro del sistema (demultiplexores, multiplexores y rejillas de Bragg.) hay que asignarles las frecuencias en sus respectivos canales, como asignarle el ancho de banda para su correcto funcionamiento.
- En la configuración interna de las rejillas de Bragg, asignarle la frecuencia a la cual va atenuar la fibra con las rejillas, cambiar los parámetros internos como el índice efectivo para atenuar la señal al nivel que se requiera, el número de segmentos ósea el número de espejos dentro de la fibra con las rejillas, también la longitud entre los espejos dentro de la fibra con la rejilla, entre otros parámetros, todos estos cambios variaran de acuerdo a los objetivos planteados en proyectos futuros.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## 5.2. Trabajos futuros.

Con el multiplexor óptico se espera varias aplicaciones en el futuro, como hacer un mejor aprovechamiento de las frecuencias y ancho de banda en las redes WDM-PON. El siguiente paso es probar el comportamiento del multiplexor óptico con todos los elementos que conforman una red WDM-PON con enlaces de 20Km. De ser satisfactorios los resultados, lo siguiente es probar físicamente en el laboratorio el dispositivo diseñado y así observar su rendimiento en un entorno real con parámetros físicos no ideales.



 Institución Universitaria	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

## REFERENCIAS

---

Archambault J. L., Reekie L., Russell P. St. J., (1993), "100% reflectivity Bragg reflectors produced in optical fibres by singles excimer laser pulses" *Electron. Lett.* 29, Pp. 453-455.

Arellano Sotelo, H. (2006). "Aplicación de las rejillas de Bragg en fibra óptica para medición de vibraciones en eventos de baja frecuencia", Tesis de maestría no publicada, centro de investigaciones en óptica, A.C, León, Guanajuato, México.

Chernikov S. V., Kashyap R., McKee P. F., Taylor J. R., (1993). "Dual Frequency all fiber grating laser source", *Electron. Lett.* Vol. 29, Pp. 12-1089.

Corning, (2014), Glass Works, Folleto: "Fused Silica", N.Y., E.U., Pag. 8.

Docsetools. (2012). *Rejilla de Bragg de Fibra*. Recuperado de [http://docsetools.com/articulos-noticias-consejos/article\\_130739.html](http://docsetools.com/articulos-noticias-consejos/article_130739.html)

Dong L., Liu W. F. (1997), "thermal decay of fiber Bragg gratings of positive and negative index changes formed at 193 nm in a boron-codoped germanosilicate fiber" *Appl. Opt.*, 36, Pp. 8222-82226.

Hill K. O., Fujii Y., Johnson D. C. (1978), Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication, *Appl. Phys. Lett.* 32. Pp. 647-649.

Hill K.O., Malo B., Bilodeau F., Johnson D.C. (1993). *Photosensitivity in optical fiber*, Annu. Rev. Mater. Sci., Vol. 23, Pp. 125-157.

Karpov V. I., Grekov M. V., Dianov E. M., Golant K. M., Vasiliev S. A., Medvedkov O. I., Khrapko R. R. (1997), "Thermo-induced long- period fiber gratings", ECOC'97, Pp. 22-25, Edinburg, published by IEEE, Conference Publications No. 448, vol.2, pp.53-56.

Kashyap R. (1994). "Photosensitive optical fibres: devices and applications", *Optical Fiber Technology*, 1. Pp. 17-34.

Kashyap R., Armitage J. R., Wyatt R., Davey S. T., Williams D. L., (1990), "All fiber narrow band reflection gratings at 1500 nm", *Electron. Lett.* Vol. 26, Pp. 11-730.

Kittel C. (1976). *Introduction to Solid State Physics, 5th edition* (John Wiley and Sons. Inc.). U.S.A.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Legoubin S., Fertein E., Douay M., Bermage P., Niay P., Georges T., (1991), "84 Formation of Moiré gratings in core of germanio silicate fibre by transverse holographic double exposure", *Electron. Lett.* Vol.27, Pp. 21-1945.

McKelvey J.P. (1996). *Física Del Estado sólido y de semiconductores*. Octava reimpresión, (Editorial Limusa, México).

Meltz G., Dunphy J.R., Glenn W.H., Farina J.D., Leon-Berger F.J. (1987). "Fiber optic temperature and strain sensors", *Fiber Optic Sensors SPIE798*, Pp. 104-111.

Meltz G., Morey W. W., Glenn W. H., (1978). "Formation of Bragg Gratings in Optical fibres by transverse holographic method", *Opt. Lett.*, Vol. 14, Pp. 15-823.

Morey W.W., Ball G.A., Meltz G. (1994), "Photoinduced Bragg gratings in optical fibers", *Optics and Photonics News*. Pp. 8-14.

Oullette F. (2001). Fiber Bragg Grating. *SPIE's OE Magazine*, Pp. 38-41.

Prohaska O.D., Snitzer E., Rishton S., Boegli V., (1993). "Magnification of mask fabricated fibre Bragg gratings", *Electron. Lett.* 29, Vol. 18. Pp. 1614-1615.

Rao Y. J., (1999). "Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors", *Optics and Lasers in Engineering* 31, Pp. 297-324.

Rao Y. J., Webb D. J., Jackson D. A. (1996), "simultaneous spatial, time and wavelength division multiplexed in-fiber grating sensing network". *Optics Communications* 125. Pp. 53-58.

Riant I. (2002), "UV-photoinduced fiber gratings for gain equalization", *Optic Fiber Technology.*, 8, Pp. 171-194.

Rowe J., Bennion I., Reid D. C. J. (1987), "High-reflectivity surface relief gratings in single-mode optical fiber", *IEEE Proc.*, Vol.134, Pp. 197-202.

Rusell P. ST J., Archambault J., and Reekie L. (1994). "Grating-frustrated coupler: a novel channel-dropping filter in single-mode optical fiber", *Opt. Lett.* 19, Pp. 180-182.

Udd E. (1992), Fiber Optics Sensors, *Optical Reviews, SPIE*, Vol. CR44: Pp. 31-101.

Vengsarkar M., Lemaire P. J., Judkins J. B., Bhatia V., Erdogan T., Sipe J. E., (1994), "Long-period fiber gratings as band-rejection filter", *lightware technology.* 14, Pp. 58-65.

	<b>INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO</b>	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

FIRMA ASESOR \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD \_\_\_\_\_

RECHAZADO\_\_\_      ACEPTADO\_\_\_      ACEPTADO CON MODIFICACIONES\_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD \_\_\_\_\_

ACTA NO. \_\_\_\_\_

FECHA ENTREGA: \_\_\_\_\_