

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

**SIMULACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE GENERADOR DE COMB ÓPTICO PARA REDES WDM-PON  
FLEXIBLE**

Natalia Montoya Herrera

Ingeniería de Telecomunicaciones

Faculta de Ingenierías

Andrés Felipe Betancur

**INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO**

**Medellín**

**06 de Agosto de 2015**

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

## RESUMEN

---

A nivel mundial las redes de telecomunicaciones están siendo reemplazadas en su totalidad por redes de nueva generación, buscando siempre un mejor aprovechamiento del espectro electromagnético, una mejor calidad de transmisión y recepción, mayor velocidad.

Día a día se busca actualizar y mejorar las redes de comunicaciones y avanzar en los requerimientos que demandan los usuarios. Para suplir tales necesidades, es necesario investigar sobre nueva infraestructura que aumenten la calidad de servicio (QoS), disminuyan el consumo de ancho de banda del canal de comunicaciones y en redes de acceso se quiere dar solución a través de una red de nueva generación como es la red WDM-PON.

Debido a estas necesidades, con este trabajo de grado se quiere mostrar una posible arquitectura a implementar para avanzar en cuanto a las redes ópticas de acceso existentes. Actualmente, las redes WDM-PON están limitadas por el costo de implementación debido al uso masivo de LASERs en los dispositivos optoelectrónicos que la conforman, y esa solución se quiere dar por medio de la generación de Combs Ópticos mediante un modulador Mach Zehnder en operación dual, técnica con la que se busca conformar dos conjuntos de 4 portadoras ópticas espaciadas 50 GHz, con gran llanura espectral, equidistantes y que tengan suficiente potencia para emplearse en la etapa de transmisión de un transponder WDM, finalmente de este modo, se espera aminorar la utilización y costo de LASERs en las redes WDM-PON. Cada portadora generada se ecualizó y amplificó a valores de potencia alrededor de 2.175 dBm mediante el uso de un amplificador EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) y atenuadores. Este generador de Combs ópticos permitirá en las redes WDM-PON inyectar en las ONU las fuentes de luz necesarias para el envío de información en sentido upstream.

*Palabras clave:* Fibra óptica, generador de Comb óptico, modulador Mach-Zehnder, WDM-PON.

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

## RECONOCIMIENTOS

---

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia directa o indirecta de muchas personas a las que agradezco profundamente.

Le agradezco al profesor Andrés Felipe Betancur por su interés en dirigir mi trabajo de grado, por su colaboración, supervisión y apoyo en mi proceso el cual hizo que mi trabajo se desarrollara de manera satisfactoria.

Agradezco al Grupo de investigación automática, electrónica y ciencias conmutacionales por el espacio y los equipos que fueron necesarios en el trabajo realizado.

A todos los docentes del Instituto tecnológico Metropolitano que compartieron sus conocimientos dentro y fuera de clase, a mis amigos y compañeros quienes trabajaron conmigo durante este pregrado por el bien de nuestra formación.

A mi familia y especialmente a mi madre que ha luchado conmigo durante toda mi carrera y toda su vida, que se ha esforzado por darme la mejor educación y ejemplo posible, quien con su esfuerzo, compromiso y dedicación ha estado siempre presente apoyándome y alegrándose de mis logros.

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

# ACRÓNIMOS

---

**AWG** Array Waveguide Grating – Arreglo de rejillas de guía de onda

**CW** Continuous Wave - Onda continua

**CWDM** Coarse Wavelength Division Multiplexing - Multiplexación por división en longitudes de onda ligeras

**DWDM** Dense Wavelength Division Multiplexing - Multiplexación por división en longitudes de ondas densas

**EDFA** Erbium Doped Fiber Amplifier - Amplificador de fibra dopada con Erbio

**FO** Optical fiber - Fibra Óptica

**LAN** Local Area Network - Red de área local

**MDU** (Multi-Dwelling Unit)

**MPCP** Multipoint Control Protocol - Protocolo de Control Multipunto

**MZI** Mach Zehnder Interferometer - Interferómetro Mach Zehnder

**OCG** Optical combs generator - Generador de peine óptico

**ODN** Optical Distribution Network - Red de distribución Óptica

**OLT** Optical Line Termination - Terminal de Línea Óptica

**ONT** Optical Network Termination - Terminación de Red Óptica

**ONU** Optical Network Unit - Unidad de Red Óptica

**OSA** Optical spectrum analyzer - analizador de espectros óptico

**PON** Passive Optical Network - Red Óptica Pasiva

**SOA** Semiconductor Optical Amplifier - Amplificador óptico de semiconductor

**SSB** Single Side Band –Modulación de banda lateral única.

**TDM** Time Division Multiplexing - Multiplexación por división de tiempo

**WDM** Wavelength Division Multiplexing - Multiplexación por división de longitud de onda

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

# TABLA DE CONTENIDO

---

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	
<b>2.1 CARACTERISTICAS DE REDES WDM PON</b>	
<b>2.2. TIPOS DE REDES WDM PON</b>	
<b>2.3. GENERALIDADES DE GENERADORES DE COMBS ÓPTICOS</b>	
<b>2.4 ALGUNOS METODOS DE GENERADORES DE COMBS</b>	
2.5 METODO MEDIANTE MODULACIÓN DE FASE CON MODULADOR MACH ZEHNDER	
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	
<b>5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	
<b>REFERENCIAS.....</b>	
<b>APÉNDICE.....</b>	¡Error! Marcador

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

# 1. INTRODUCCIÓN

---

## GENERALIDADES

En las últimas décadas los sistemas de comunicación han adquirido grandes desarrollos debido al surgimiento de nuevos servicios de telecomunicaciones (televisión y vídeo bajo demanda de alta definición en 3D, comunicaciones unificadas y videoconferencia, juegos en red, etc.) en la vida cotidiana. Dichos servicios al estar al alcance de cualquier persona han hecho que la infraestructura de la red global de telecomunicaciones haya crecido desmesuradamente, planteando requerimientos en ancho de banda, capacidad y robustez ante el ruido. En la actualidad, el problema subyacente del crecimiento de usuarios y dispositivos conectados en la red demanda redes más avanzadas que además de poseer más capacidad, sea más flexible en el uso de los recursos de la red (anchos de banda, portadoras, slots de tiempo, etc.). De hecho se estima que habrá más de 50.000 millones de dispositivos conectados a Internet (Tejedor, 2012) lo que refuerza la idea de actualizar la infraestructura actualmente desplegada a redes reconfigurables de próxima generación. Para aumentar la velocidad de transmisión en las redes troncales, de largo alcance e incluso en la red de acceso, es ahora común el empleo de la fibra óptica debido a sus virtudes en cuanto a atenuación, ancho de banda, seguridad, e inmunidad al ruido electromagnético en los rangos de la radiofrecuencia. De este modo, la fibra óptica es un catalizador imprescindible para acelerar el desarrollo de las redes de próxima generación, sin embargo, para que una tecnología de telecomunicaciones basada en fibra óptica pueda ser desplegada en todos los sectores económicos, debe adaptarse a los requerimientos futuros y ser compatible con sus tecnologías predecesoras para incrementar los horizontes de tiempo de la infraestructura ya instalada.

Por tal motivo y además de que es necesario abastecer la continua demanda de ancho de banda más grande, mayores distancias, entre otras peticiones de los usuarios, las redes de fibra óptica surgen como la solución a estos problemas, y entre estas redes las redes PON.

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

Una red PON es una red que les permite a los usuarios contar con un mayor ancho de banda y mejores servicios al contar con accesos por medio de Fibra Óptica.

Además estas redes permiten reemplazar los elementos activos en una red por elementos pasivos, lo que permite que los costos de la red se reduzcan en un gran porcentaje. (Guevara, 2010)

Características redes PON.

- Aumento de la cobertura hasta los 20 km (desde la central).
- Mayor ancho de banda para el usuario.
- Mejora en la calidad del servicio y simplificación de la red debido a la inmunidad que presentan a los ruidos electromagnéticos.
- Minimización del despliegue de fibra óptica gracias a su topología.
- Reducción del consumo gracias a la simplificación del equipamiento.
- Más baratas que las punto a punto.

Existen varias empresas de alto renombre investigando y desarrollando sistemas PON, proveedores que son líderes en el mercado de las telecomunicaciones como: Alcatel-Lucent, Ericsson y su joint-venture LG-Ericsson, Huawei y ZTE, los cuales han realizado diversas pruebas piloto, además de pequeños despliegues comerciales y las experiencias obtenidas en estas pruebas han demostrado que estas prometedoras tecnologías no están lo suficientemente maduras para despliegues residenciales masivos y que sus costes son muy elevados; por lo que se busca la mejor opción para lograr abastecer la demanda y se quiere solucionar el problema a través de las redes WDM-PON. (Tejedor, 2012)

Un sistema WDM-PON lleva varias señales ópticas, cada una en su propia longitud de onda y cada una respetando las limitaciones de los tipos de datos aplicables al sistema de transmisión, esta tecnología ofrece mucho más que un aumento de la capacidad de tráfico-transporte.

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

WDM-PON puede aumentar la capacidad de las redes existentes sin la necesidad del costoso re-cableado y, por lo tanto, puede reducir significativamente el costo de la actualización de una red.

WDM- PON ofrece grandes beneficios como:

- Altos anchos de banda garantizados, simétricos o asimétricos, dedicados y sin ningún tipo de contención, a cada abonado.
- Alta escalabilidad en ancho de banda debido a la transparencia de la tasa binaria y a la facilidad en añadir o quitar canales.
- Mayores distancias y factores de división, debido a las menores pérdidas ópticas.
- Gestión, operación y mantenimiento de la red más sencillo.
- Mayor seguridad, debido a la separación del tráfico entre abonados.
- Mayor facilidad para crear redes ópticas abiertas, lo cual permite la compartición de la misma red de acceso física por varios operadores tal y como ocurre en las actuales redes xDSL sobre cobre.
- Menor latencia.

Los objetivos principales de estas las redes WDM-PON son disminuir el costo y aumentar el rendimiento, ancho de banda y el alcance.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

Simular y caracterizar un Generador de Combs Óptico para redes WDM-PON flexible mediante el uso de un modulador Mach Zehnder en operación Dual.

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

## ESPECÍFICOS

- Desarrollar una arquitectura que permita generar 8 portadoras ópticas para una red WDM-PON que emplea la inyección de portadoras desde la OLT a un RSOA en la ONU.
- Definir las frecuencias y voltajes que logran generar 4 bandas laterales con diferencias de potencia menor a 4dBm en la salida mediante un barrido de parámetros en el modulador Mach Zehnder.

## ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

En el capítulo 1 se mostrará el estado de una emergente tecnología con gran futuro como es la WDM- PON, sus características y funcionamiento.

En el capítulo 2 se estudiará que es un generador de Combs óptico, sus generalidades y algunas técnicas de modulación utilizadas en las redes WDM-PON.

En el capítulo 3 se verá la metodología y parámetros utilizados para generar el espectro de señal que se quiere lograr con la técnica MZ.

En el capítulo 4 Posteriormente se empleara y simulara la técnica de modulación elegida para el proyecto, la cual es modulación Mach Zehnder en operación dual y se observarán los gráficos y resultados obtenidos con esta técnica a través del analizador de espectro.

En el capítulo 5 se dejarán las conclusiones del proyecto planteado según los resultados obtenidos.

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

## 2. MARCO TEÓRICO

---

### Características de redes WDM-PON

WDM-PON es actualmente una tecnología FTTH emergente, la cual se basa en la capacidad de una fibra óptica para llevar un conjunto de ondas de luz de diferentes longitudes de onda, simultáneamente y sin interferencia, que proporciona un canal óptico dentro de la fibra independiente para cada usuario en cada dirección de comunicación mientras que la arquitectura de fibra se comparte. Por lo tanto, combina la eficiencia de fibra con las potentes funciones de conectividad punto a punto.

Las redes PON proporcionan mayor ancho de banda de las redes tradicionales de acceso a base de cobre, por lo tanto WDM-PON tiene mejor privacidad y una mejor escalabilidad debido a que cada ONU solamente recibe su propia longitud de onda.

Las tecnologías WDM son particularmente valiosas en aplicaciones de larga distancia donde se necesita mayor ancho de banda, estas pueden soportar grandes distancias sin necesidad de extensores, pudiendo los operadores consolidar el equipamiento activo necesario en la red de acceso y reducir sensiblemente el número de centrales.

El principal reto de WDM-PON es cómo hacer que una misma ONU pueda trabajar en distintas  $\lambda$ s. La necesidad de que las ONU sean capaces de ser sintonizadas en cualquier  $\lambda$  es completamente imprescindible para mejorar la eficiencia en fabricación y logística, así como reducir los costes y complejidad de instalación y soporte posterior.

#### 2.2. Tipos de redes WDM-PON estáticas y dinámicas.

Las redes WDM-PON permiten el transporte de múltiples longitudes de onda sobre la infraestructura de una red TDM-PON. Las redes WDM-PON se clasifican en dos tipos: estáticas y dinámicas.

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

1. **ESTÁTICAS:** Cada grupo de ONTs tiene asignada unas lambdas concretas y fijas. Estas soluciones pueden ser de dos tipos:

1.1 ONUs dependientes de la longitud de onda: existe un ONU específico para cada lambda.

- La forma más sencilla de crear un WDM-PON es empleando una lambda fija entre cada ONU o grupo de ONUs y el OLT.
- Se utilizan lambdas separadas para los canales ascendente y descendente.
- Permite implementar diferentes subredes sobre la misma infraestructura (enlaces punto a punto, conjuntos de PONs, etc.)

1.2 El ONU es independiente de la longitud de onda

- Estas soluciones reducirían sensiblemente los costes respecto a las anteriores ya que permitirían la fabricación a escala de un único tipo de equipo ONU.
- Estas soluciones no están estandarizadas y existen diversas técnicas que permiten su implementación.

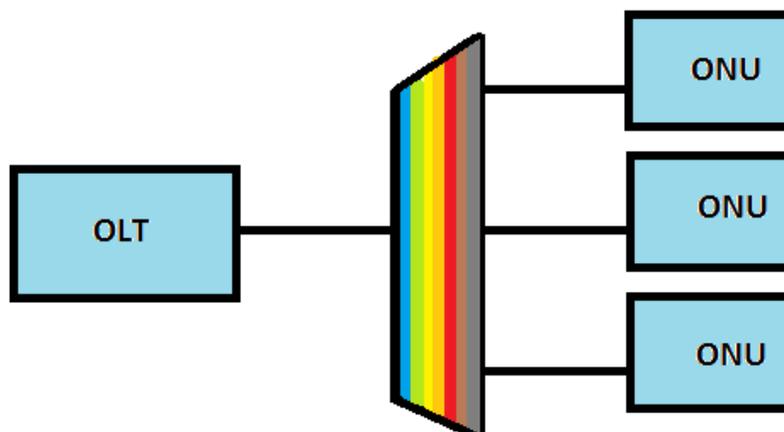


Fig. 1. Arquitectura WDM-PON estática basada en un router.

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

2. **DINÁMICAS:** La red es reconfigurable y los ONTs no tienen asignada una lambda concreta.

- Estas soluciones tan sólo existen de forma experimental.
- Los ONUs son independientes de la longitud de onda.
- Los mux/demux de la red son reconfigurables y se pueden controlar a partir del plano de control o del sistema de gestión.
- Esta solución permitiría optimizar los recursos de la red asignando la capacidad necesaria a cada ONU en función de las necesidades de cada momento. (Garcia, 2008, págs. 19-21)

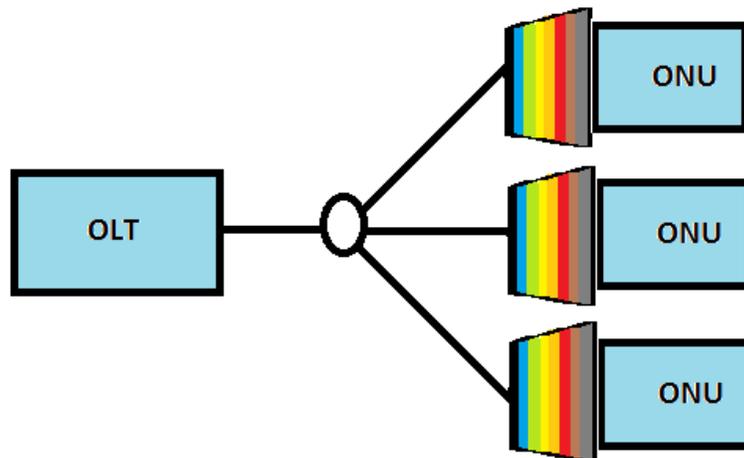


Fig. 2. Arquitectura WDM-PON dinámica basada en un splitter.

### 2.3. Generalidades de generadores de Combs ópticos

Un OCG es un generador de señales que produce múltiples armónicos de su señal de entrada. El aspecto de la salida en la pantalla del analizador de espectro, se asemeja a los dientes de un peine, de ahí el nombre del dispositivo.

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

Varios métodos ópticos están disponibles para combinar los canales individuales dentro de una fibra y extraerlos en los puntos adecuados a lo largo de una red, veremos algunos que son utilizados en la generación de señales en las redes WDM-PON. (Roebuck, 2011, pág. 9)

#### **2.4 Algunas técnicas de generadores de Combs Ópticos**

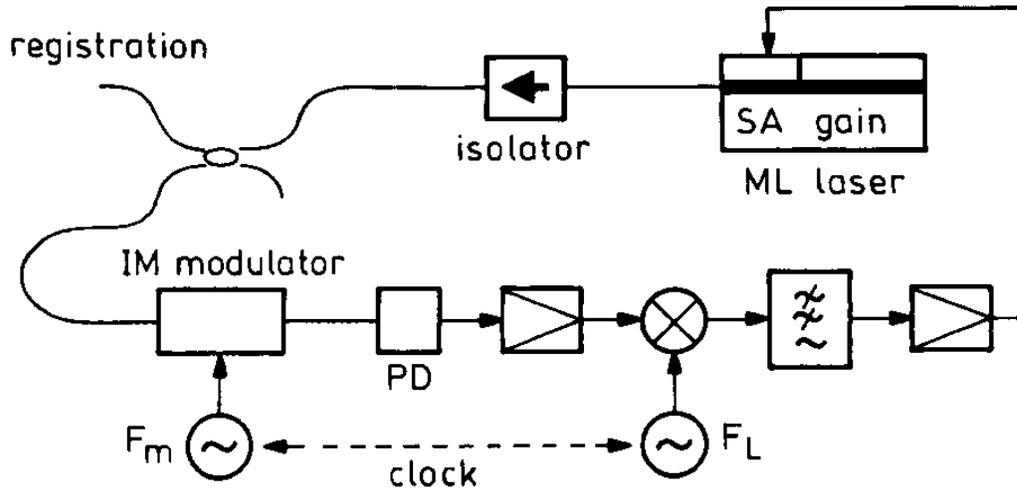
Existen diferentes técnicas de modulación que se pueden utilizar, para hacer un uso más eficiente del ancho de banda óptico disponible, entre ellas se presentan a continuación tres técnicas para la generación de OCG, las cuales se describen en términos de sus principales características:

##### **Láser de modo discreto.**

En la figura 3 podemos observar el esquema de la técnica de filtrado espectral sencilla dentro de una cavidad que selecciona un número finito de modos en Fabry-Perot (FP) láser de diodo monolítico estándar, permite fijar la frecuencia armónica y adaptar el perfil de intensidad de la salida del láser de modo bloqueado, en la que un láser puede hacer producir pulsos de luz de muy corta duración, del orden de picosegundos o femtosegundos. (Bitaul, 2011).

Este interferómetro (FP) hace uso de las múltiples reflexiones entre dos superficies parcialmente plateadas y muy próximas entre sí. Parte de la luz se transmite cada vez que llega a la segunda superficie, resultando en múltiples rayos desfasados que pueden interferir unos con otros. El gran número de rayos de interferencia, produce un interferómetro con una resolución extremadamente alta, algo así como lo hacen las múltiples rendijas de una rejilla de difracción, aumentado su resolución.

La base de la técnica es el de inducir una relación de fase fija entre los modos de cavidad resonante del láser. El láser entonces se dice que es de enganche de fase o de modo bloqueado, la interferencia entre estos modos hace que la luz láser sea producida como un tren de pulsos. (Arjit Saha, 2011, pág. 70)



- Fig. 3. esquema de un bucle de enganche de fase utilizado para la estabilización de un láser de modo bloqueado pasivamente. (E.A.Avrutin, 2000)

### Optical Fiber Loops con SSB (modulación de banda lateral única).

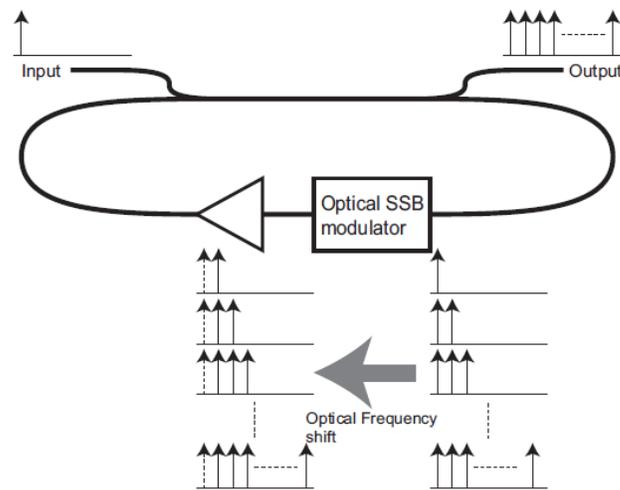
Un OCG se compone de un bucle de fibra óptica provisto de un modulador óptico SSB, un amplificador óptico para compensar una pérdida de conversión por el modulador SSB óptico, un puerto de entrada óptica, y un puerto de salida óptica.

El modulador de SSB óptico es un modulador óptico capaz de obtener una luz de salida de haber desplazado sólo una cantidad de una frecuencia de una señal de modulación.

Una luz de entrada se introduce en el puerto de entrada del generador de peine óptica. La luz de entrada es una luz continua (FO) de un solo modo. Entonces, una frecuencia de la luz de entrada se desplaza ( $f_0 + f_m$ ) por el modulador SSB óptica.

Un componente de luz cuya frecuencia se ha desplazado, círculos del bucle que combinarse con una nueva luz introducida en el puerto de entrada ( $f_0$ ,  $f_0 + f_m$ ). Estas luces son guiados al modulador SSB óptica, y las frecuencias de ambos componentes se desplazan ( $f_0 + f_r$ ,  $f_0 + 2f_m$ ). Mediante la repetición de estos procesos, se pueden obtener luces que tienen numerosos componentes de espectro como se puede observar en la figura 4.

El generador de Combs óptico utilizando un bucle SSB asegura salidas que tienen un intervalo de frecuencia óptica determinada con precisión, sin la necesidad de control de estabilización de la longitud del camino óptico. Por lo tanto, esta tecnología puede hacer que el dispositivo sea menos caro. (shinada, Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation, 2004).



**Fig. 4. Optical combs generator usando un modulador óptico SSB.** (shinada, Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation, 2004).

Por último la técnica de generación de comb óptico que fue utilizado en la simulación de este proyecto.

## 2.5 Técnica de generación de comb óptico mediante modulador Mach Zehnder en operación dual.

Un esquema atractivo y flexible para la generación de un OCG es la modulación de fase de un único cw-laser en un modulador electro-óptico.

En el OCG la luz láser se inyecta en el modulador óptico Mach-Zehnder el cual controla eléctricamente la amplitud de salida o la fase de la onda de luz que pasa a través del dispositivo.

Mediante la aplicación de un voltaje a través del interferómetro, se puede alterar el índice de refracción del material de guía de ondas y desencadenar un desplazamiento de fase de una de las ondas electromagnéticas que se propagan, entonces, posteriormente las dos ondas se combinan de nuevo en un segundo acoplador direccional, y debido a la diferencia de fase creada por la tensión, se obtiene interferométricamente una modulación de amplitud. (Littmarck, 2014)

La circulación en el modulador genera un amplio abanico de bandas laterales separadas por la frecuencia de accionamiento modulador, luego la señal pasa a través de un amplificador EDFA que se encarga de compensar la pérdida de conversión en el modulador, este puede amplificar directamente las señales ópticas, supera las pérdidas de inserción y proporciona un funcionamiento de alta calidad.

El espaciamiento de las señales está sintonizado a cierta frecuencia lo que permite la generación de cualquier frecuencia definida a este tamaño de paso. (Zetie, 2000)

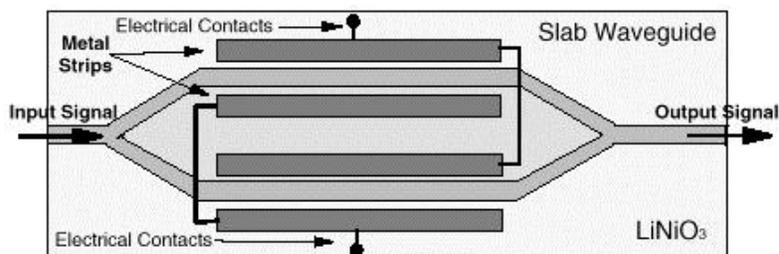


Fig. 5. Optical combs generator técnica mediante modulador Mach Zehnder en operación dual. (IBM Rebooks, 1998).

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

### 3. METODOLOGÍA

---

Para llevar a cabo este proyecto se contará con el conocimiento y la orientación por parte del docente y asesor Andrés Betancur, con el apoyo de los equipos de laboratorio y en especial con la herramienta de diseño computacional Opti-System, la cual es utilizada para simular y medir de una manera más o menos exacta los parámetros que caracterizan a este tipo de dispositivos ópticos.

Este proyecto se hará a partir de un estudio teórico de las redes WDM-PON, los OCG y las técnicas de modulación que en estos se utilizan, se definirán los valores para la configuración de parámetros y características de los dispositivos ópticos que conforman el generador y a través del software Opti-System se hará la simulación, finalmente se visualizarán en los resultados las gráficas de las diferencias de potencial entre portadoras a través del paso de dispositivos ópticos y el resultado final del generador.

Esta propuesta surge como un requerimiento en el desarrollo de las redes de nueva generación en las que es necesario implementar nuevos modelos, resolver problemas de las redes actuales y mejorar infraestructura y capacidad de las redes de comunicación.

El trabajo se realizará teniendo en cuenta las siguientes etapas:

- Búsqueda del problema de investigación: ésta constituye la primera etapa de investigación y para llevarla a cabo se realizará una observación y análisis de los posibles problemas que se presentan en las redes actuales y se planteará una solución para mejorar el desempeño de las redes actuales, solución que se buscará dar con las redes WDM-PON.
- Compilación y análisis de información acerca de la evolución de las redes wdm y posibles mejoras para su implementación.

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

- Definición de los elementos, parámetros y valores necesarios para llevar a cabo la simulación y poder obtener los objetivos planteados.
- Desarrollo de la simulación con la técnica de modulación MZ en un OCG para una red WDM-PON, teniendo en cuenta la información suministrada por el asesor, y recomendaciones pertinentes.
- Diseño final del proyecto: muestra de la simulación, forma y funcionalidad del generador e informe final.

Se hará la simulación del OCG incluyendo dos LASERs de onda continua en los que los haces de luz atravesarán un multiplexor para luego ingresar a un modulador Mach-Zehnder, en el MZ entrará un solo haz de luz que se dividirá en dos partes, un haz de luz se transmitirá y otro se reflejara lo cual terminará en un desplazamiento, posteriormente se unirán los dos haces en uno solo y este haz de luz que sale del modulador, atravesara un amplificador EDFA que se encargara de potenciar la señal, esta señal pasará a un demultiplexor para ser separada en 8 ondas las cuales ingresaran por separado a un atenuador, que se encargará de proporcionar estabilidad y una señal más clara de la transmisión, sin afectar la longitud de onda de la señal y luego se multiplexarán las ondas para poder observar el resultado final de las bandas a través del analizador de espectro.

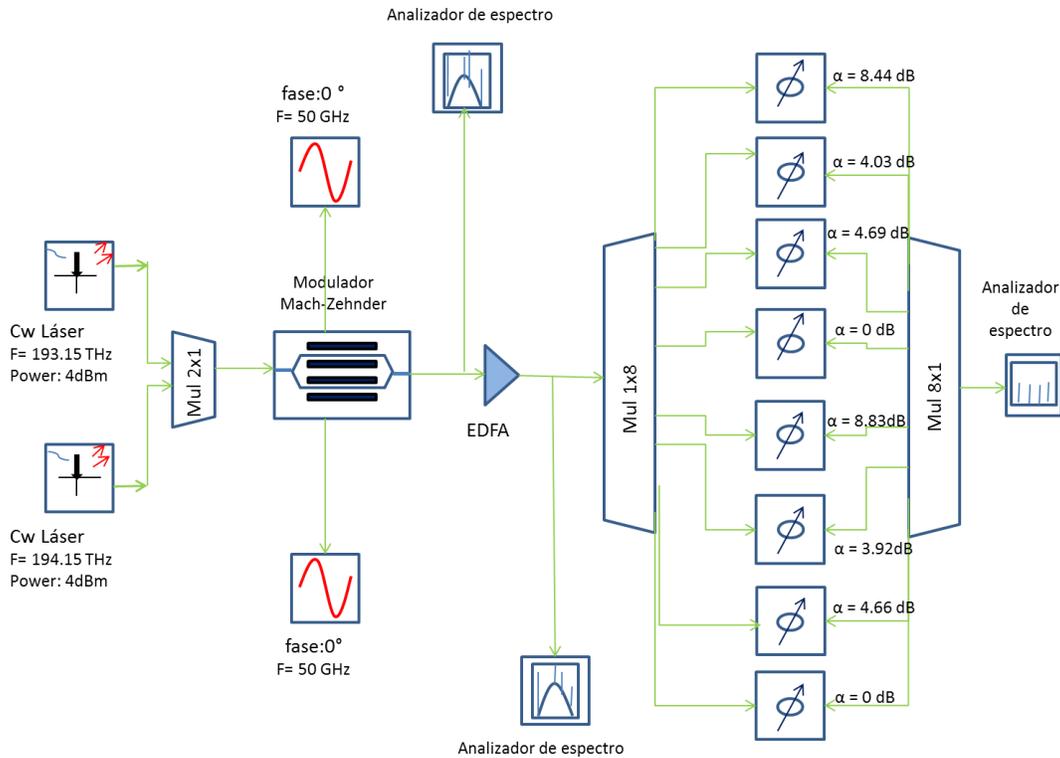
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN EN LA SIMULACIÓN DEL MODULADOR MACH-ZEHNDER

	FRECUENCIA CENTRAL	POTENCIA
láser 1	193,15 THz	4 dbm
láser 2	194,15 THz	4 dbm
CANALES		FRECUENCIA
Frequency[0]	193.1 THz	
Frequency[1]	193.15 THz	
Frequency[2]	193.2 THz	
Frequency[3]	193.25 THz	
Frequency[4]	194.1 THz	
Frequency[5]	194.15 THz	
Frequency[6]	194.2 THz	
Frequency[7]	194.25 THz	
ATENUADOR		
FRECUENCIA	ATENUACIÓN	
193.1 THz	8,42 dB	
193.15 THz	3,98 dB	
193.2 THz	4,68 dB	
193.25 THz	0 dB	
194.1 THz	8,42 dB	
194.15 THz	3,9 dB	
194.2 THz	4,63 dB	
194.25 THz	0 dB	

MULTIPLEXOR 2X1	
Ancho de banda	300 GHz
pérdida de inserción	0 dB
profundidad	100 dB
MODULADOR MACH-ZEHNDER	
voltaje 1	-4 v
voltaje 2	-3.7 v
Voltaje de modulación	1.2 v
AMPLIFICADOR EDFA	
Frecuencia central de ruido	193.4 THz
ancho de banda de ruido	10 THz
Contenedores de ruido espaciado	50 THz
umbral de ruido	-100 dB
ruido dinámico	3 dB
longitud	5 m
DEMULTIPLEXOR 1X8	
Ancho de banda	10 GHz
pérdida de inserción	0 dB
profundidad	100 dB

**Esquema de un generador de comb óptico mediante el uso de un modulador Mach Zehnder en operación Dual.**



Se ingresaron los valores de frecuencia para las dos portadoras con 193.1THz y 194.1THz respectivamente, se sintonizaron diferentes voltajes en el modulador Mach-Zehnder como prueba para observar la potencia de salida de las portadoras que se generaban y así poder determinar cuáles eran los valores que representaban mejor la señal en el analizador, al parametrizar el modulador con los valores que se visualizan en la tabla 1 se logra obtener en la salida portadoras con gran llano espectral.

MODULADOR MACH-ZENHDER	
voltaje 1	-4 v
voltaje 2	-3.7 v

**Tabla 1.** Voltajes ingresados al modulador Mach-Zehnder.

## SEÑAL GENERADA

En la figura se 6 se observan las portadoras al circular a través del modulador MZ, las potencias de las portadoras se encuentran en la tabla 2.

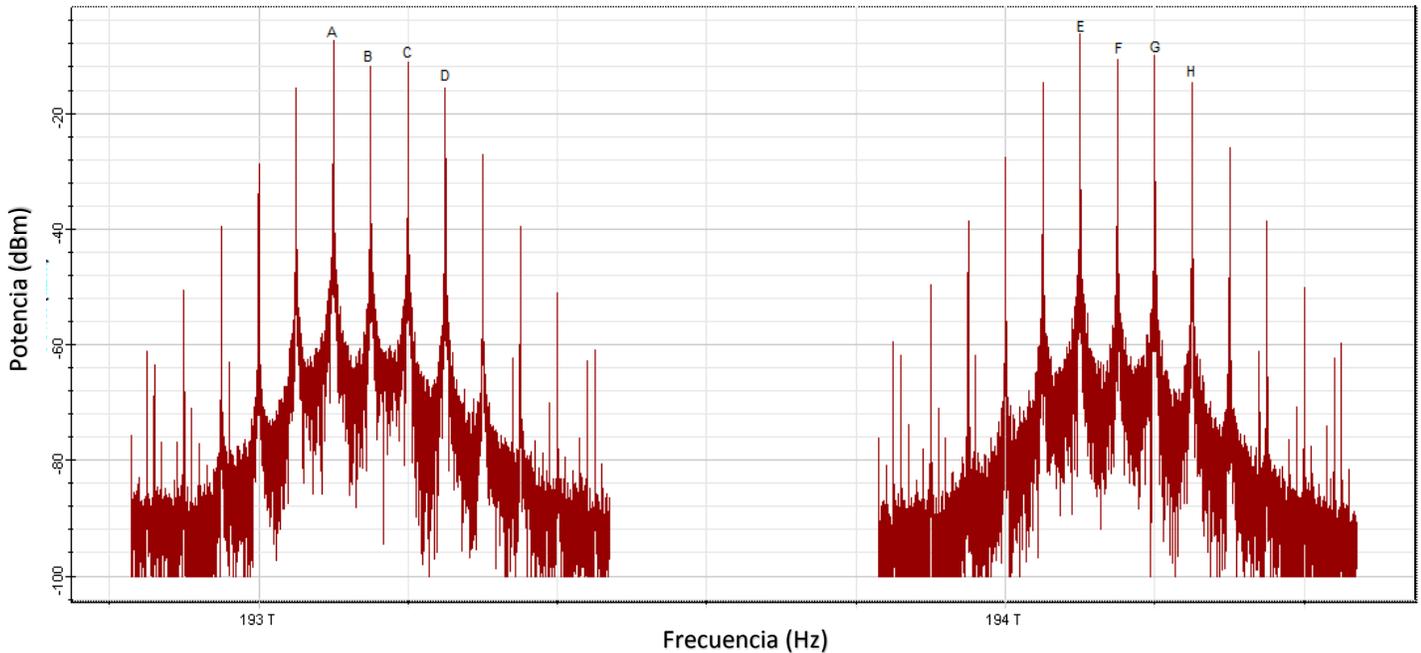


Fig. 6. Señal generada al atravesar el modulador Mach-Zehnder.

Portadora	Potencia(dBm)	Portadora	Potencia(dBm)
A	-7.53573	E	-6.45151
B	-11.8726	F	-10.7884
C	-11.2221	G	-10.1379
D	-15.7758	H	-14.6916

Tabla 2. Potencias de las portadoras generadas al atravesar el modulador Mach-Zehnder.

Al cambiar el voltaje aplicado se puede controlar la cantidad de luz que sale de las dos guías de onda del modulador, en la figura 6 podemos observar que la potencia ingresada en la salida se ve dividida en varios espectros después de haber pasado por medio del modulador MZ.

### SEÑAL GENERADA EN LA SALIDA DEL AMPLIFICADOR EDFA

Para poder potenciar la señal que fue repartida en las diferentes bandas al pasar por el modulador MZ, ingresamos la señal a través de un amplificador EDFA para que genere señales con mayor energía en la salida, las bandas generadas se pueden observar en la figura 7 al estar amplificadas y la potencia de estas en la tabla 3.

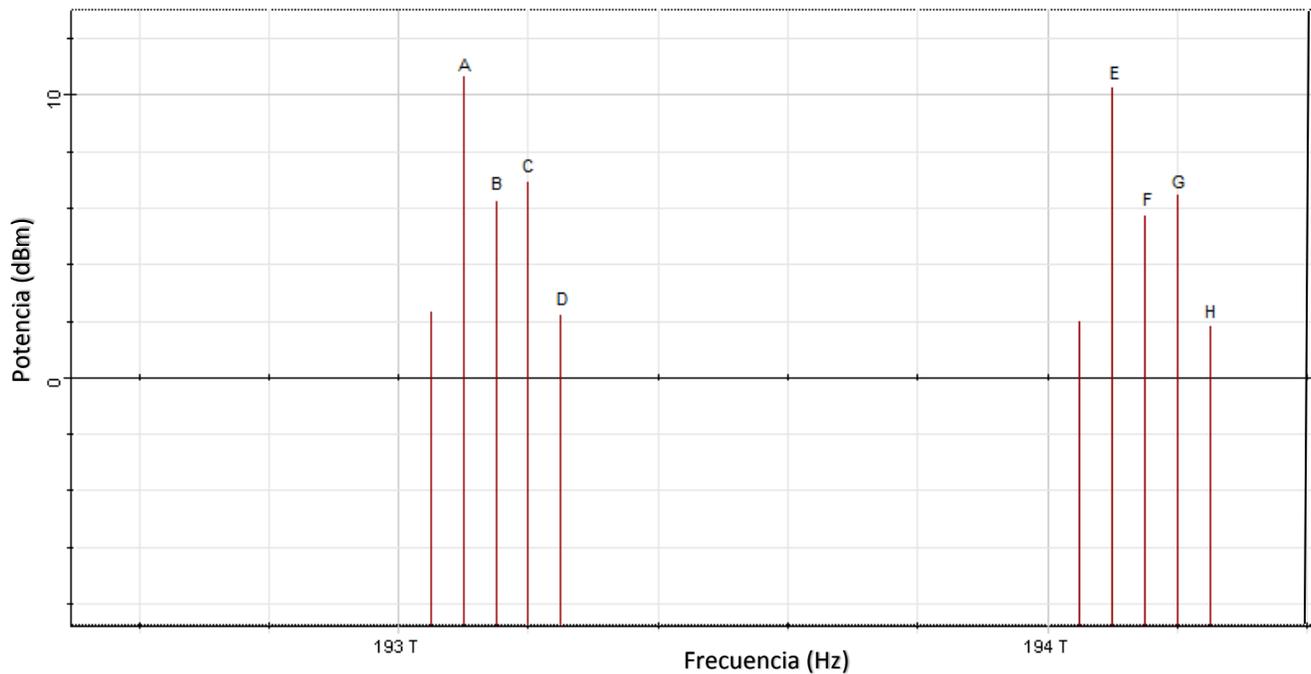


Fig. 7. Señal generada al ser potenciada a través del amplificador EDFA.

Portadora	Potencia(dBm)	Portadora	Potencia(dBm)
A	10.6118	E	10.2152
B	6.19351	F	5.68371
C	6.87324	G	6.42009
D	2.17177	H	1.77526

Tabla 3. Potencia de las portadoras generadas al atravesar el amplificador EDFA.

Luego se envió la señal a través de un demultiplexor y se atenúo cada señal individualmente, se tuvo en cuenta la potencia de salida de las portadoras con las frecuencias centrales para atenuar las demás portadoras las cuales están espaciadas entre una y otra por 50 GHz, con la atenuación se buscaba lograr que cada conjunto de 4 portadoras quedarán con la misma potencia, posteriormente se multiplexarán las señales atenuadas para poder analizar el espectro de salida.

### SEÑAL EN LA SALIDA DEL ATENUADOR

Luego de atenuar cada señal individualmente se puede notar en la figura 8 que se logran generar 4 bandas laterales con diferencias de potencial menor a 4dBm en la salida, además en la tabla 4 se ven los respectivos valores de potencia de cada una de las portadoras.

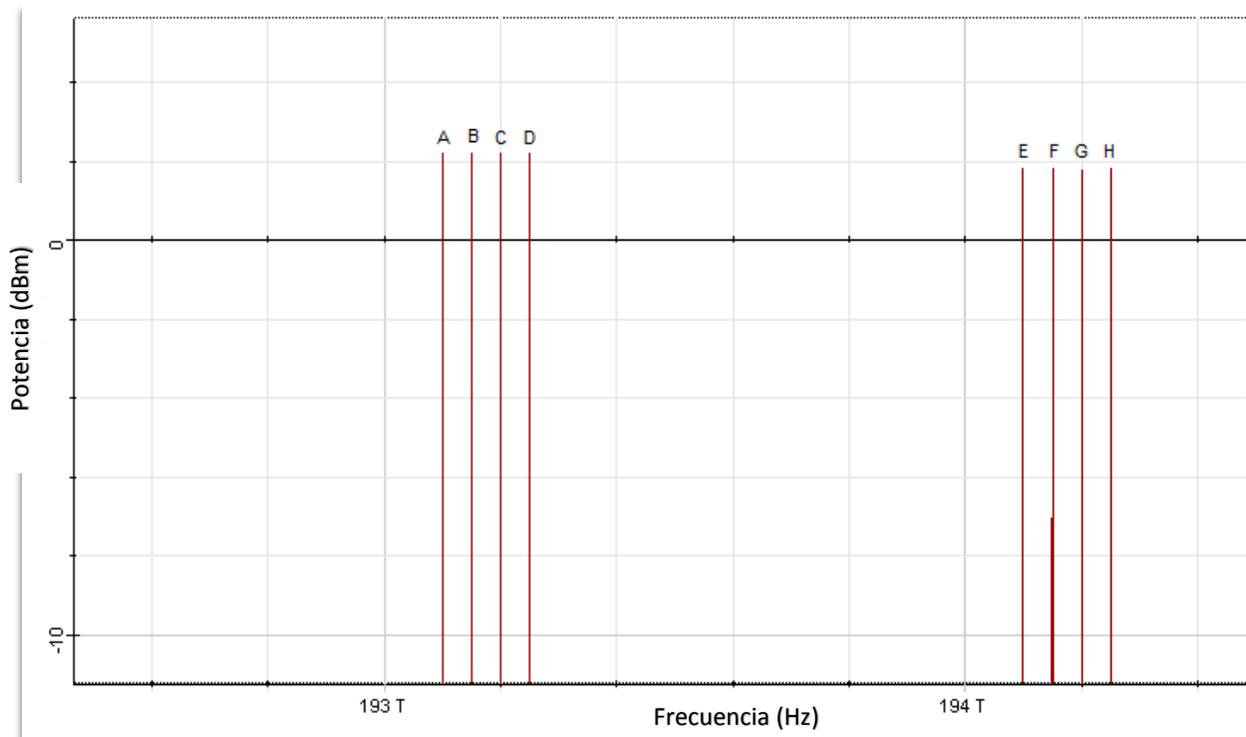


Fig. 8. Señal final generada a través del método Mach-Zehnder en operación dual luego de atenuar las portadoras.

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

Portadora	Potencia(dBm)	Portadora	Potencia(dBm)
A	2.17467	E	1.79417
B	2.17467	F	1.79417
C	2.17467	G	1.79417
D	2.17467	H	1.79417

**Tabla 4. Potencia de las portadoras generadas ser atenuadas.**

En este trabajo, se han mostrado los resultados en la generación de portadoras por medio de la técnica de generación con modulador Mach Zehnder en operación dual, con gran llanura espectral y haciendo uso de 2 LASERs.

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

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

---

- La simulación mostró que cambiando los valores de potencial aplicados en el modulador Mach-Zehnder se puede controlar la potencia de las portadoras en la salida. Este resultado se desprende del efecto Pockels que describe la dependencia del índice de refracción de la guía de onda de Niobato de Litio a un campo eléctrico externo, que en consecuencia, con cierta amplitud en el puerto RF se puede inducir cambios de fase en la portadora óptica o en definitiva, la amplitud del tono RF modifica el índice de modulación de la señal de luz.
- Con los valores de potencia ingresados en el modulador MZ, los cuales fueron elegidos para trabajar en la simulación de este trabajo se logró como resultado que en la salida, la diferencia de potencia entre el conjunto de portadoras ópticas no fuera mayor a 4 dBm, además se probó que un modulador Mach-Zehnder puede generar un OCG con muy buena llanura espectral y así se puede lograr disminuir la utilización de dispositivos emisión en el generador. Sin embargo, está limitado en la cantidad de portadoras (Entre 5 y 7) que puede generar con poca diferencia de potencia.
- Un trabajo que puede desprenderse de esta investigación es realizar la optimización de los parámetros del modulador Mach Zehnder que permitan obtener más portadoras ópticas. Este trabajo resulta de sumo interés para la disminución de costos y complejidad en la siguiente generación de redes de comunicaciones ópticas.

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

## REFERENCIAS

---

- Arjit Saha. (2011). *Optoelectronics and Optical Communication*. Laxmi Publications.
- Bitaul, D. (2011). Timing characterization of 100 GHz passively mode-locked discrete mode laser diodes. *The Optical Society*.
- E.A.Avrutin, J. a. (Agosto de 2000). *Monolithic and multi-GigaHertz mode-locked semiconductor lasers: Constructions, experiments, models and applications*. Recuperado el 2015 de Junio de 01, de Optoelectron: <http://www.intenseco.com/downloads/papers/139.pdf>
- García. (2008). *Situación actual y principales retos en la evolución de la red de transporte*. Recuperado el 25 de Abril de 2015, de <http://garciaargos.com/descargas/apuntes/posgrado/Primer-Semestre/SRC/1%20-%20Sistemas%20y%20redes%20de%20fibra%20optica/Telefonica1.pdf>
- Guevara, J. S. (junio de 2010). Recuperado el 10 de abril de 2015, de [http://www.tecnologia.technology/wp-content/uploads/2010/06/Definicion\\_caracteristicas\\_PON\\_APON\\_BPON\\_GEPON\\_GPON\\_EPON.pdf](http://www.tecnologia.technology/wp-content/uploads/2010/06/Definicion_caracteristicas_PON_APON_BPON_GEPON_GPON_EPON.pdf)
- IBM Rebooks. (1998). *Understanding Optical Communications*. IBM Corporatio.
- Littmarck, F. (8 de Abril de 2014). *Optimizing Mach-Zehnder Modulator*. Recuperado el 2015 de mayo de 20, de *Optimizing Mach-Zehnder Modulator Designs with COMSOL Software*
- Roebuck, K. (2011). *Terahertz Radiation: High-impact Emerging Technology - What You Need to Know*. Tebbo.
- shinada, s. (2004). Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation. *Electronics Express*, 218-220.
- shinada, s. (s.f.). *Optical frequency comb generator using optical fiber loops with single-sideband modulation*. Recuperado el 12 de abril de 2015, de [http://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/10/1\\_2171.pdf](http://optiwave.com/wp-content/uploads/2014/10/1_2171.pdf)
- Tejedor, M. (2012). *publicado en Conectrónica nº 154, GM2 Publicaciones Técnicas*. Recuperado el 10 de abril de 2015, de <http://www.ramonmillan.com/tutoriales/ngpon.php>

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

Zetie, K. P. (enero de 2000). *Physics Departamnet, Westminter School*. Recuperado el 2 de abril de 2015, de [https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie\\_et\\_al\\_mach\\_zehnder00.pdf](https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/fall06/cos576/papers/zetie_et_al_mach_zehnder00.pdf)

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: \_\_\_\_\_