

# **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIONES**

**PERFIL DEL TRABAJO PREVIO LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
MÁSTER EN REDES DE COMUNICACIONES**

**TEMA:**

**“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE FWM EN UNA RED  
UDWDM PON”**

**ANGEL JOSÉ ORDÓÑEZ MENDIETA**

Quito – 2015

## **DEDICATORIA**

A mis padres, que gracias a su apoyo y a su confianza lograron que este sueño se vuelva una realidad, un logro que lo hemos alcanzado todos como una familia. A mis tres queridos hermanos Santiago, David y Robert que siempre los he tenido presente durante este tiempo que he estado lejos de ellos, y a mi novia Victoria por siempre poder contar con su apoyo incondicional.

A mis amigos y compañeros los cuales brindándome su apoyo incondicional y su ayuda en momentos difíciles contribuyeron a que este sueño sea una realidad.

Y de forma especial agradecerle a mi director de tesis que gracias a su dedicación, paciencia y enseñanza permitieron un correcto desarrollo de la presente tesis alcanzando a satisfacción todos los objetivos. ¡Gracias a todos!

# INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	ii
CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
JUSTIFICACIÓN .....	2
ANTECEDENTES.....	4
OBJETIVO GENERAL.....	7
Objetivos Específicos: .....	7
CAPÍTULO 2 .....	8
2.    FUNDAMENTOS DE LAS COMUNICACIONES POR FIBRA ÓPTICA.....	8
2.1.    Fundamentos de fibras ópticas.....	8
2.1.1.    Descripción y características. ....	8
2.1.2.    Refracción y reflexión. ....	12
2.1.3.    Clasificación y tipos de fibras ópticas .....	16
2.2.    Parámetros de Transmisión.....	20
2.2.2.    Dispersión .....	22
2.2.3.    No Linealidades .....	26
CAPÍTULO 3 .....	38
3.    REDES WDM PON .....	38
3.1.1.    Métodos de multiplexación.....	38
3.1.1.2.    WDM (Wavelength Division Multiplexing) .....	40
3.1.2.    DWDM. ....	47

3.2.	Redes PON .....	64
3.2.1.	Historia y evolución. ....	64
3.2.2.	Estructura y funcionamiento de una red PON. ....	67
3.2.3.	Topologías PON. ....	69
3.3.	Redes DWDM PON y UDWDM PON.....	72
3.3.1.	Redes DWDM PON .....	72
3.3.2.	Redes UDWDM PON.....	73
CAPÍTULO 4.....		75
4.	DISEÑO Y SIMULACIÓN DE RED UDWDM-PON.....	75
4.1.	OptiSystem y MatLab.....	75
4.1.1.	OptiSystem .....	75
4.1.2.	MatLab.....	77
4.2.	Diseño de la Red: Características y dimensionamiento de la red UDWDM-PON. ....	79
4.2.1.	Transmisor Óptico.....	80
4.2.2.	Multiplexador Óptico .....	80
4.2.3.	Fibra Óptica.....	81
4.2.4.	Demultiplexador Óptico.....	81
4.2.5.	Receptor Óptico .....	81
4.3.	Simulación de la red y Recolección de resultados. ....	82
4.3.1.	Simulación Red UDWDM PON .....	82
4.3.2.	Recolección de Resultados.....	88
4.3.2.1.	Simulación de Red UDWDM-PON .....	88
4.4.	Análisis de Resultados.....	94

4.4.1.	Red UDWDM-PON .....	94
4.4.2.	Red DWDM-PON .....	95
4.5.	Caracterización de los efectos de FWM en la red UDWDM simulada en base a los resultados obtenidos.....	97
CAPÍTULO 5.....		101
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	101
5.1.	CONCLUSIONES .....	101
5.2.	RECOMENDACIONES.....	105
BIBLIOGRAFÍA .....		107

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo de investigación se enfoca en el diseño de una red UDWDM PON donde se estudiará y caracterizará el comportamiento de los efectos no lineales en la transmisión de datos particularmente el efecto FWM. El objetivo de este estudio es determinar los niveles de incidencia de los efectos no lineales en las redes UDWDM PON, esto a través del uso de simuladores matemáticos como MatLab y OptiSystem. El diseño de la red contempla transmisiones de datos a grandes distancias donde se implementarán escenarios que favorezcan la aparición de los efectos no lineales. La identificación de los efectos no lineales producidos en la red y primordialmente del efecto FWM permitirá interpretar sus características, sus efectos e influencia en la transmisión de señales digitales, y en el mismo ámbito determinar posibles soluciones y configuraciones que permitan la disminución de sus efectos en la transmisión de señales ópticas con una multiplexación UDWDM en una red óptica pasiva.

En primer lugar en el presente anteproyecto de tesis de Maestría en Redes de Comunicaciones se presenta la descripción e identificación de los contenidos a ser tratados e implementados, a continuación se describe la justificación para su desarrollo. En la tercera parte, se presenta el objetivo principal y los objetivos específicos, un índice tentativo y finalmente se plantea un cronograma de desarrollo de la investigación. Es importante señalar que la bibliografía de este documento está sólidamente sustentada.

## JUSTIFICACIÓN

Actualmente el mundo de las telecomunicaciones ha venido presentado un desarrollo exponencial en cuanto a sus limitaciones, principalmente en el área de las redes de comunicaciones, la creciente demanda de tráfico presenta una necesidad de contar con un mayor ancho de banda para cumplir con las nuevas demandas de transmisión. La implementación de redes con fibra óptica ha permitido hasta la actualidad cubrir con los requerimientos básicos en las transmisiones de datos, pero debido al incremento de comunicaciones y servicios, el ancho de banda que presentan estos sistemas ópticos ha sido saturado, y se ha requerido implementar nuevos y diversos métodos de transmisión y multiplexación de señales que permitan usar más eficientemente el espectro disponible. Entre estos mecanismos de multiplexación los más comúnmente utilizados son: TDM (multiplexación por división de tiempo), FDM (multiplexación por división de frecuencia), CDM (multiplexación por división en código), WDM (multiplexación por división de longitud de ondas). Una evolución que presenta este último método es la UDWDM (multiplexación por división de longitud de ondas ultra densa) que especialmente entre sus características tiene la presencia de longitudes de ondas separadas hasta de 10GHz (0.08nm) disminuyendo considerablemente la separación original de 100 GHz implementada por DWDM (multiplexación por división de longitud de ondas densa), con esto se logra incrementar considerablemente el aprovechamiento de la capacidad de las transmisiones ópticas sin necesidad de la implementación de nuevos medios de transmisión, reutilizando las corridas existentes de fibra óptica.

La presente investigación se basará en estos sistemas UDWDM y su aplicación en una red óptica pasiva, donde se estudiará los efectos no lineales que se presentan en las transmisiones, la identificación de estos y primordialmente los efectos FWM que presentan una gran importancia, debido a que su aparición en la transmisiones ópticas afectan a las señales digitales que son transmitidas, en el caso de Four Wave Mixing se presenta un fenómeno llamado el efecto óptico Kerr, que origina nuevos espectros a partir de las señales originales, estas ondas producidas interfieren con las señales decanales, esto a su vez causa un daño espectral además de aumentar la tasa de error binaria.

Este estudio por consiguiente plantea investigar detenidamente el comportamiento de los fenómenos no lineales, para lo cual se utilizará dos sofisticados simuladores matemáticos como son MatLab y OptiSystem, que gracias a sus características permiten una simulación avanzada de los sistemas ópticos y otorgan la capacidad de analizar detenidamente cada uno de los resultados obtenidos, esto posibilitará establecer parámetros y recomendaciones que permiten reducir su incidencia en la transmisión de datos cuando se emplea UDWDM en redes ópticas pasivas.

## ANTECEDENTES

Investigaciones recientes proponen a la utilización de redes UDWDM como una solución para satisfacer la creciente demanda de tráfico incluyendo futuros servicios de banda ancha, destacando entre sus principales características la posibilidad de entregar longitudes de onda espaciadas a pocos GHz permitiendo así incrementar el ancho de banda y las distancias de transmisión. Pero a su vez se explica que la fibra tiende a presentar efectos no lineales en este tipo de transmisiones, entre estos la Mezcla de Cuatro Ondas (FWM) que será analizada a fondo en la presente investigación, y la modulación de frase cruzada, que inciden directamente en el funcionamiento general de la red, debido a la corta separación que existe entre los canales de UDWDM PON. A partir de pruebas realizadas se ha determinado que FWM forma parte de los factores que más afectan el funcionamiento de este tipo de redes, donde las frecuencias que se generan por FWM se dividen en señales de canal que tienden a degradar la SNR (relación señal a ruido) e incrementan el valor de la tasa de error (BER) de todo el sistema, por tal razón se indica que moderar los efectos de FWM es fundamental para el correcto funcionamiento de una red UDWDM PON.

A pesar de la aparición de efectos no lineales en estas redes los estudios realizados apuntan a UDWDM PON como la tecnología que se encargará de cubrir la necesidad de ancho de banda para transmisiones de datos en un futuro no muy lejano, teniendo la posibilidad de asumir este desafío sin mayores inconvenientes, escalando por ejemplo rentablemente desde 100 Mbit/s a 10 Gbit/s. Además se considera la ventaja de poder alcanzar distancias de transmisión de hasta 100 km sin necesidad de la implementación de elementos amplificadores o extensores de alcance, como se requiere actualmente en

las redes GPON. Las cortas distancias entre las longitudes de onda permiten alcanzar una capacidad de transmisión de alrededor de 1000 longitudes en una sola fibra. En base a estos análisis se visualizan nuevos enfoques como en el caso de diseño de redes, por ejemplo en redundancia geográfica sin duplicar la infraestructura de fibra, o en el caso de nuevos modelos de negocio donde se puede realizar la compartición de fibra de forma óptima visualizando los futuros escenarios posibles.

En lo que respecta al uso de este tipo de multiplexación en redes PON, su aplicación se da con el fin de utilizar una red que permitirá cubrir las necesidades de las futuras transmisiones, actualmente las empresas de telecomunicaciones se encuentran implementando este tipo de redes para solucionar problemáticas de última milla, entre las principales ventajas que se destacan se tiene que las redes PON permiten llegar a usuarios que se encuentran alejados hasta 60 Km desde la central, donde aventaja considerablemente a la tecnologías DSL que solo pueden cubrir un rango de 5km. Además disminuyen el despliegue de fibra en el bucle local permitiendo implementar topologías tipo árbol – rama que tienen una mejor eficiencia que las tradicionales punto a punto, y permiten minimizar la densidad del equipamiento central lo que equivale a una reducción de consumo.

Enfocándonos en la parte más relevante de nuestra investigación, lo que respecta a la aparición de efectos no lineales y específicamente a los efectos producidos por FWM en la transmisión de datos en redes UDWDM PON, se han realizado múltiples estudios y pruebas para poder determinar los efectos e incidencia del FWM, en base a esto se ha podido determinar que entre los aspectos más relevantes tenemos que la potencia del FWM es directamente proporcional a la intensidad de la luz incidente, a la potencia del

canal y al número de canales, e inversamente proporcional a la dispersión de la fibra y a el área efectiva de la fibra. En base a estas características se estableció que una de las formas para minimizar los efectos del FWM es reducir la intensidad del haz de luz, esto se puede combinar con la implementación de fibras dispersivas que permiten incrementar la desadaptación de fases del proceso no lineal, pero a su vez para evitar los valores elevados de dispersión cromática que conllevarían otro tipo de degradaciones, se recomienda utilizar las fibras NZDZFs (nearly zero dispersion-shifted fibres) que tienen valores reducidos de dispersión lo que permite prevenir efectos dispersivos y no lineales.

## **OBJETIVO GENERAL**

Analizar a través de simulación los efectos de FWM en una red UDWDM PON utilizando MatLab y OptiSystem.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Estudiar el desarrollo que han tenido los sistemas de multiplexación en longitud de onda.
2. Estudiar y describir los efectos no lineales producidos en un medio de transmisión óptico.
3. Investigar y presentar los aspectos relevantes del sistema UDWDM, su funcionamiento y principales aplicaciones.
4. Diseñar y simular un sistema de comunicaciones ópticas UDWDM PON mediante OptiSystem.
5. Analizar los efectos no lineales en una red UDWDM PON mediante OptiSystem y Matlab.
6. Caracterizar el comportamiento de una red UDWDM PON al respecto de los efectos no lineales en transmisiones de datos particularmente el efecto FWM.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. FUNDAMENTOS DE LAS COMUNICACIONES POR FIBRA**

#### **ÓPTICA**

##### **2.1. Fundamentos de fibras ópticas**

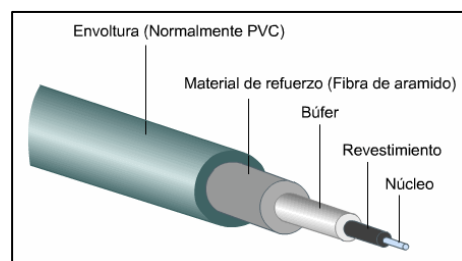
Ante la creciente demanda de tráfico en las transmisiones de datos, la implementación de sistemas de transmisión por fibra óptica permitieron solventar los nuevos requerimientos de las redes, estas transmisiones permiten utilizar la luz como portadora de la información, una característica que permitió incrementar de forma considerable las velocidades de transmisión y el ancho de banda en comparación a los sistemas precedentes. Pero a su vez, estos sistemas están expuestos a un gran número de fenómenos externos e internos que tienen diferentes efectos de influencia en la transmisión de la información, por este motivo es sumamente importante conocer a profundidad las características y funcionamiento de este tipo de redes.

##### **2.1.1. Descripción y características.**

Hace más de 50 años surgió la idea de implementar la luz como un medio para transportar datos, esto se visualizaba como un gran avance para las limitaciones de las redes de comunicaciones, una década después alrededor de los años 60 se realizó la primera demostración que incorporaba un láser que proporcionaba una luz con las características necesarias para realizar las primeras transmisiones de información. A partir de este punto los investigadores se enfocaron en desarrollar un medio de transmisión adecuado, que permitirá enclaustrar la señal de luz, para el año de 1966 se

estableció que la fibra óptica reunía las propiedades necesarias para este sistema. Con el pasar de los años se logró mejorar las características de la fibra óptica que un inicio tenía elevados valores de atenuación.

Más descriptivamente identificamos a la fibra óptica como una fina hebra de silicio o vidrio fundido que permite la conducción de la luz, para los casos de requerimientos bidireccionales (transmisión y recepción) se requerían dos filamentos para la comunicación en ambas direcciones. Cada filamento tiene un grosor de aproximadamente 0,1mm que se puede comparar con el grosor de un cabello humano. Comúnmente el cable de fibra óptica se encuentra compuesto por: núcleo, manto, recubrimiento, tensores y chaqueta (Figura 1). El núcleo se encuentra conformado por una región cilíndrica, en la cual se realiza la transmisión, en conjunto con el revestimiento o envoltura permiten que se produzca la transmisión de la señal de luz.



**Figura 1.** Componentes de la Fibra Óptica<sup>1</sup>

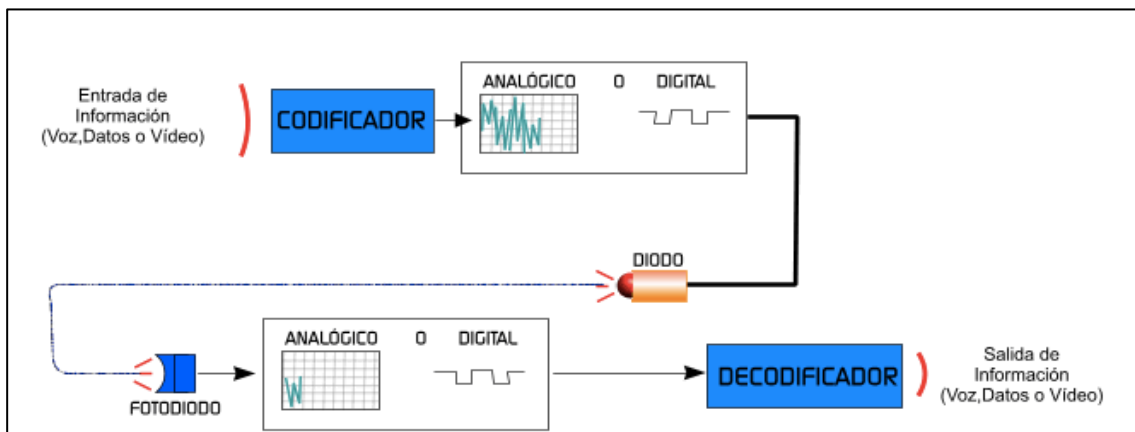
De forma general las comunicaciones ópticas utilizan los siguientes componentes para la transmisión de datos:

1. Fuente de Luz: Láser o LED.
2. Medio transmisor: Fibra óptica
3. Detector de luz: Fotodiodo

<sup>1</sup>Figura 1. *Componentes de la Fibra Óptica*. Recuperado el 28 de noviembre de 2014 de: <http://www.monografias.com/trabajos30/cableado/Image49.gif>

<sup>2</sup> Figura 2. *Transmisión por fibra óptica*. Recuperado el 28 de noviembre de 2014

Las comunicaciones por fibra óptica principalmente son usadas en redes LAN y para transmisiones de largo alcance. La transmisión de datos se origina cuando el detector genera una señal de luz, al ingresar al filamento de fibra óptica el rayo de luz empieza a refractarse en sus bordes y así continúa su desplazamiento hacia su destino. En la transmisión un pulso de luz equivale a 1 bit lógico y a su vez la ausencia de luz tiende a indicar un 0 bit lógico. El grado y nivel de refracción de la señal de luz en el interior de la fibra óptica depende principalmente de las propiedades de los dos medios que la componen, donde de forma general podemos indicar que para ángulos de incidencia superiores al valor crítico normal la luz será refractada de regreso, lo que permite que el rayo continúe dentro de la fibra y se propague hacia su destino (Figura 2).



**Figura 2.** Transmisión por fibra óptica<sup>2</sup>.

Podemos presentar como las principales características de la fibra óptica los siguientes parámetros:

a. Ancho de Banda: La fibra óptica tiene una capacidad de ancho de banda muy superior a la de los cables de pares (UTP<sup>3</sup>/STP<sup>4</sup>) y a la del cable coaxial. Actualmente se

<sup>2</sup> Figura 2. *Transmisión por fibra óptica*. Recuperado el 28 de noviembre de 2014 de: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/fibra.html>

<sup>3</sup> UTP (Unshielded Twisted Pair) en español Par trenzado no blindado.

puede alcanzar anchos de banda de 10 Gbps en transmisiones de hasta 10 Km. Se aspira que para el futuro se pueda optimizar el ancho de banda de las fibras permitiendo alcanzar hasta 100 Gbps.

b. Distancia: La composición y estructura de la fibra óptica permite tener un baja atenuación en las señales que son transmitidas lo que permite realizar transmisiones de hasta 20 km y mediante la implementación de repetidores alcanzar hasta 10 km de distancia.

c. Integridad de datos: La fibra óptica bajo condiciones normales presenta una transmisión de datos con un BER<sup>5</sup> inferior a  $10e^{-11}$ , lo que permite a los protocolos utilizados en la transmisión no utilizar procesos de corrección de errores, mejorando la velocidad de transmisión.

d. Duración: Los componentes de la fibra óptica le permiten soporte de altas temperaturas y resistencia a la corrosión, adicionalmente la protección de su envoltura contribuye a soportar los niveles de tensión en su instalación.

e. Seguridad: La fibra óptica presenta un alto nivel de seguridad, para poder acceder a la señal que es transmitida es necesario cortar la fibra lo que detendrá la transmisión y de esta forma se podrá identificar la intromisión, además la transmisión por fibra óptica no produce radiación electromagnética lo que permite evitar acciones de escucha por intrusos, y a su vez también es inmune a estos efectos electromagnéticos que pueden provenir de agentes externos, esto permite su uso en ambientes industriales. A continuación en la Figura 3 podemos observar las principales diferencias que existen entre la fibra óptica y otros medios de transmisión que han sido implementados para las comunicaciones de datos.

---

<sup>4</sup> STP (Shielded Twisted Pair) en español Par trenzado blindado.

<sup>5</sup> BER (Bit Error Rate) es el número de bits recibidos de forma incorrecta respecto al total de bits enviados durante un intervalo especificado de tiempo.

	Par Trenzado	Par Trenzado Blindado	Coaxial	Fibra Óptica
Tecnología ampliamente probada	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí
Ancho de banda	Medio	Medio	Alto	Muy Alto
Full Duplex	✓ Sí	✓ Sí	✓ Sí	Sí por pares
Distancias medias	100 m - 65 Mhz	100 m - 67 Mhz	500 m - (Ethernet)	2 km (Multi.) 100 km (Mono.)
Inmunidad Electromagnética	Limitada	Media	Media	Alta
Seguridad	Baja	Baja	Media	Alta
Coste	Bajo	Medio	Medio	Alto

*Figura 3.* Comparación de fibra óptica con otros medios<sup>6</sup>.

En las transmisiones ópticas la capacidad de la transmisión de los datos se encuentra defino por las características de la fibra óptica implementada, entre las principales tenemos:

- a. Diseño geométrico de la fibra óptica
- b. Propiedades de cada uno de los componentes y materiales utilizados para la fabricación de la fibra óptica.
- c. Ancho espectral de la fuente de luz implementada, donde la capacidad de transmisión de datos irá disminuyendo conforme se incremente su anchura.

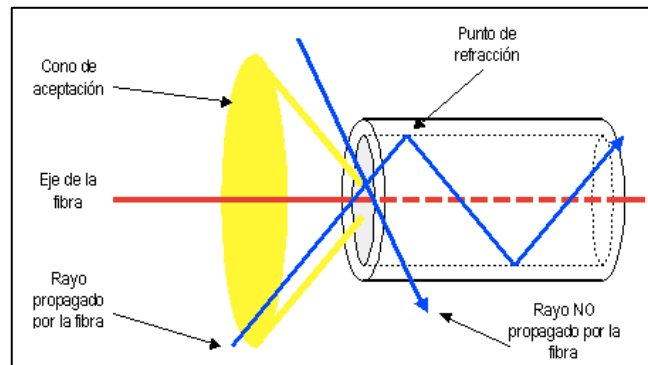
## 2.1.2. Refracción y reflexión.

### 2.1.2.1. Refracción

La refracción constituye la desviación que tiende a experimentar un rayo de luz al atravesar un medio, esta desviación dependerá del índice de refracción óptica y del ángulo de incidencia. En la fibra óptica el núcleo y el revestimiento poseen propiedades físicas distintas, lo que permite que existan dos índices de refracción,  $n_1$  para el núcleo

<sup>6</sup>Figura 3. *Comparación de fibra óptica con otros medios.* Recuperado el 28 de noviembre de 2014 de: <http://2.bp.blogspot.com/-PBybID89IwM/Tqtvkxxtu4fl/AAAAAAAAAV0/ym-qabnsv3o/s1600/13.png>

y  $n_2$  para el revestimiento. La refracción se produce cuando la luz se refleja completamente al no poder atravesar la superficie de ambos medios (Figura 4). El índice de refracción se expresa como una magnitud y no puede expresarse en unidades.



**Figura 4.** Refracción en fibra óptica<sup>7</sup>.

Para realizar el cálculo del índice de refracción de un medio se utiliza la siguiente fórmula:

$$n = \frac{V_o}{V}$$

Donde:

$n$  es el índice de refracción,

$V_o$  es la velocidad de la luz en el vacío,

$V$  es la velocidad de la luz en el medio.

El índice de refracción en el vacío tiene un valor de 1. A continuación en la Figura 5 podemos apreciar los diferentes materiales utilizados en la fabricación de la fibra óptica con sus índices de refracción y velocidades de transmisión.

---

<sup>7</sup>Figura 4. Refracción en fibra óptica. Recuperado el 5 de diciembre de 2014 de: <http://kathy.galeon.com/fotospag5/image005.gif>

Material	Índice refracción*	Velocidad m/s
Vacío	1	299.792.485
Aire	1,00029	299.705.543
Hielo	1,31	228.849.205
Agua (a 20° C)	1,333	224.844.349
Alcohol etílico	1,36	220.435.631
Cubierta FO (SiO <sub>2</sub> )	1,45	206.753.419
Núcleo FO (SiO <sub>2</sub> +GeO <sub>2</sub> )	1,47	203.940.465
Cuarzo (SiO <sub>2</sub> )	1,544	194.166.099
Diamante	2,417	124.034.943

**Figura 5.** Comparación de materiales utilizados en la elaboración de fibra óptica<sup>8</sup>.

## Ley de Snell

La ley de Snell llamada así en honor al matemático Willebrord Van Roijen Snell, la cual indica que cada rayo experimenta una refracción diferente, es implementada para calcular el ángulo de refracción de la luz, cuando el rayo de luz cambia a otro medio que tiene distinto índice de refracción (Figura 6). Esta ley se encuentra definida por la siguiente fórmula:

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta_2$$

Donde:

$n_1$  es el índice de refracción del medio 1,

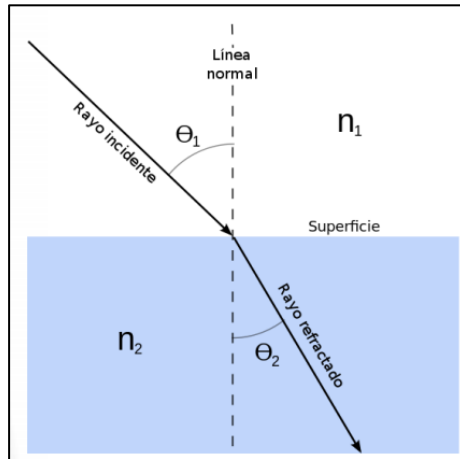
$\theta_1$  es el ángulo incidente,

$n_2$  es el índice de refracción del medio 2,

$\theta_2$  es el ángulo de refracción.

---

<sup>8</sup>Figura 5. Comparación de materiales utilizados en la elaboración de fibra óptica. Recuperado el 5 de diciembre de 2014 de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)



**Figura 6.** Ley de Snell<sup>9</sup>.

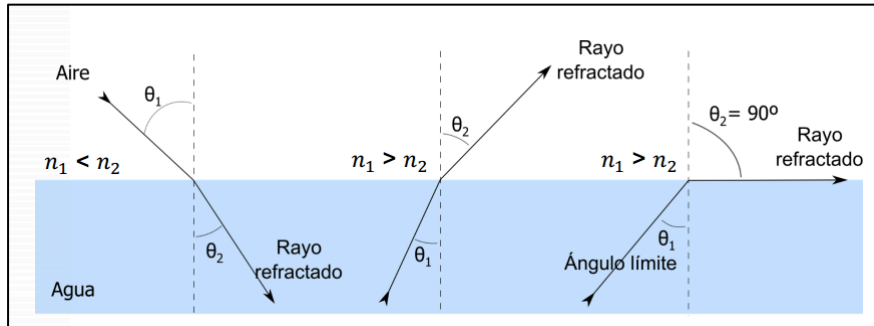
En base a esta ley se podemos indicar que si un rayo incide de forma diagonal sobre otro medio que tiene un índice de refracción superior, este rayo se desviará en dirección a la normal, si por otro lado el nuevo medio tiene un índice de refracción inferior el rayo se alejará de la normal, para el caso en el que los rayos incidan en la misma dirección de la normal su refracción o reflexión conservará la dirección original.

### 2.1.2.2. Reflexión

La reflexión de luz se produce cuando un rayo de luz incide en otro medio con diferente índice de refracción, lo que produce que el rayo incidente sea reflejado regresando al medio original con un ángulo similar al ángulo de incidencia. Esta propiedad es fundamental en las transmisiones ópticas debido a que permite encapsular el rayo de luz dentro de la fibra óptica permitiendo su propagación.

<sup>9</sup>Figura 6. *Ley de Snell*. Recuperado el 5 de diciembre de 2014 de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)

Para conseguir la reflexión total se parte de la Ley de Snell la cual nos permite conocer los límites hasta donde se produce la refracción y empieza la reflexión total. En base a los resultados que se pueden producir existen tres escenarios (Figura 7):



**Figura 7.** Reflexión y refracción de un rayo de luz en fibra óptica<sup>10</sup>.

1. Cuando el índice de refracción del medio 1 es inferior al índice de refracción del medio 2 ( $\theta_1 < \theta_2$ ), el ángulo de incidencia será mayor que el ángulo de refracción resultante ( $\theta_1 > \theta_2$ ).
2. Cuando el índice de refracción del medio 1 es mayor al índice de refracción del medio 2 ( $\theta_1 > \theta_2$ ), el ángulo de refracción resultante será mayor que el ángulo de incidencia ( $\theta_2 > \theta_1$ ).
3. Cuando el índice de refracción del medio 1 es mayor al índice de refracción del medio 2 ( $\theta_1 > \theta_2$ ), y el ángulo de refracción es superior a  $90^\circ$  ( $90^\circ$  es considerado el ángulo límite), se producirá a reflexión interna total del rayo de luz.

### 2.1.3. Clasificación y tipos de fibras ópticas

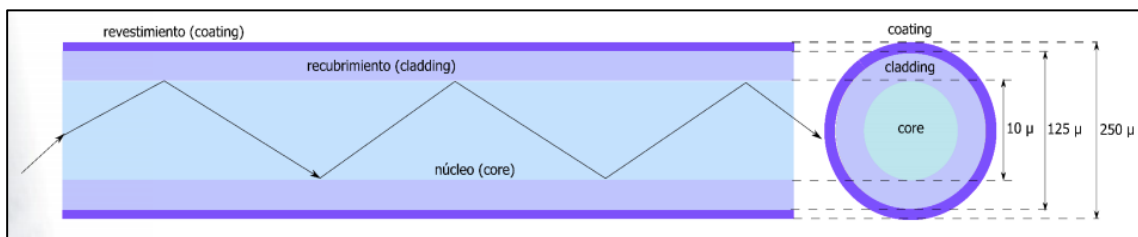
Existen diversas clasificaciones que se han establecido para los diferentes tipos de fibras existentes en el mercado, pero para el presente proyecto de investigación solo se

<sup>10</sup>Figura 7. Reflexión y refracción de un rayo de luz en fibra óptica. [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)

considerará la clasificación basada en el tipo de propagación, la cual divide a las fibras en dos clases: fibras monomodo y fibras multimodo.

### 2.2.1.1 Fibras Monomodo

La fibra monomodo permite la propagación de un solo modo o flujo de datos, esto contribuye a alcanzar grandes distancias que pueden llegar hasta los 100km con la ayuda de repetidores (Figura 8), además posee un mayor ancho de banda y una superior tasa de transmisión en relación a las fibras multimodo. Posee un núcleo de tamaño pequeño (inferior a  $10\ \mu\text{m}$ ) lo que en ocasiones dificulta el acoplamiento de la luz.



**Figura 8.** Fibra monomodo<sup>11</sup>.

Las fibras monomodo a su vez están conformadas por tres tipos de fibras que describiremos a continuación:

**1. Fibra monomodo o estándar:** también llamada SMF<sup>12</sup>, este tipo de fibra posee valores de atenuación de aproximadamente  $0,2\text{dB/Km}$

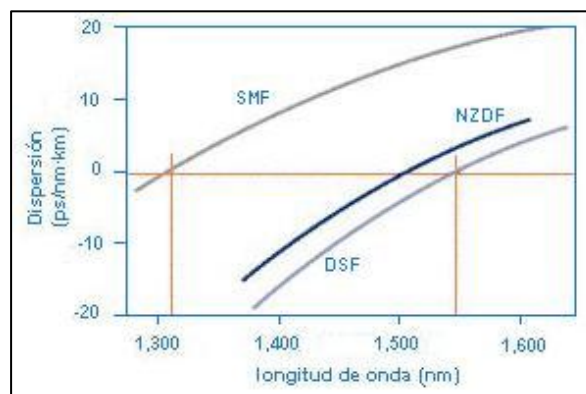
**2. Fibra DSF<sup>13</sup>:** estas fibras han sido fabricadas para poseer una dispersión cromática nula en la 3<sup>a</sup> ventana, con una atenuación de  $0,25\text{dB/Km}$ , su principal

<sup>11</sup>Figura 8. *Fibra monomodo*. Recuperado el 10 de diciembre de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)

<sup>12</sup>SMF (Standar Single Mode Fiber) es la fibra monomodo estándar.

problema es la aparición de los efectos no lineales, particularmente el fenómeno de mezclado de cuarta onda (FWM<sup>14</sup>) el mismo que será analizado en el presente proyecto de investigación, lo que imposibilita su aplicación en sistemas WDM.

**3. Fibra NZDSF<sup>15</sup>:** estas fibras surgen para solventar los problemas de las fibras DSF, poseen valores de dispersión cercanos a cero, esto les permite utilizar la dispersión cromática para reducir los fenómenos no lineales. En la Figura 9 podemos visualizar la comparación de los diferentes valores de dispersión cromática de las tres fibras.



**Figura 9.** Dispersión cromática de las fibras monomodo SMF DSF, NZDSF<sup>16</sup>.

### 2.2.1.2 Fibras Multimodo

Las fibras multimodo incorporan un núcleo de mayor diámetro lo que les permite realizar la transmisión de varios modos o flujos de datos de manera simultánea. El diámetro del núcleo oscila entre 50  $\mu\text{m}$  o 62.5  $\mu\text{m}$ , esto permite que el acoplamiento de la luz sea menos complicado. El uso de diferentes fuentes de luz es el que posibilita a la

<sup>13</sup> DSF (Dispersion Shifted Fiber) es fibra monomodo de dispersión desplazada

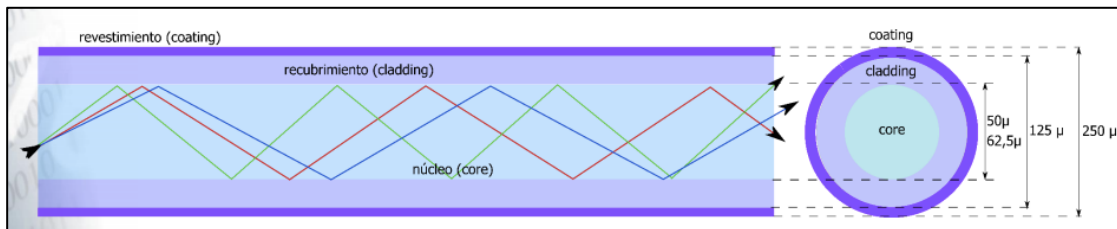
<sup>14</sup> FWM (Four-Wave Mixing) en español Mezcla de Cuatro Ondas, forma parte de los efectos no lineales producidos en las transmisiones ópticas.

<sup>15</sup> NZDSF (Non Zero Dispersion Shifted Fiber) es la fibra de dispersión no nula.

<sup>16</sup>Figura 9. *Dispersión cromática de las fibras monomodo SMF DSF, NZDSF*. Recuperado el 12 de diciembre de 2014

de:[http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/imagenes\\_tema2\\_1/image004.jpg](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/imagenes_tema2_1/image004.jpg)

fibra transportar datos codificados, es ideal para distancias cortas pero no es recomendable para distancias superiores a 10 Km, además posee un ancho de banda inferior al de las fibras monomodo.



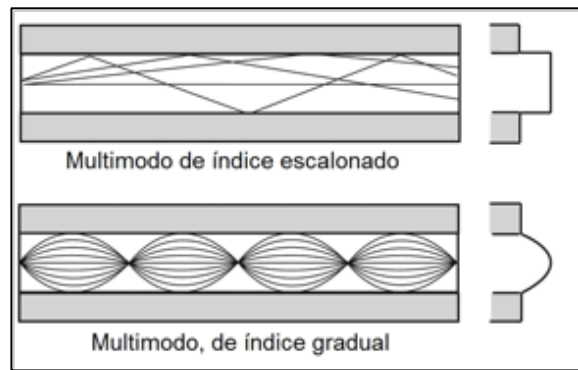
**Figura 10.** Fibra multimodo<sup>17</sup>.

En relación a los índices de refracción las fibras multimodo se subdividen dos tipos de fibras:

**1. Fibra óptica de índice escalonado:** Este tipo de fibra se caracteriza porque sus índices de refracción tanto del núcleo como del revestimiento son uniformes, donde el índice de refracción del núcleo presenta una mayor sensibilidad y presenta cambios bruscos al cambiar un una zona a otra.

**2. Fibra óptica de índice gradual:** Las propiedades de esta fibra permiten que el índice de refracción del núcleo varíe progresivamente partiendo del centro del núcleo hasta llegar al revestimiento. Entre sus ventajas destaca que posibilita la disminución de la dispersión modal al limitar la diferencia de caminos que utilizan los diversos modos que son propagados simultáneamente. En la Figura 11 podemos observar la diferencia de propagación de los modos en los dos tipos de fibra.

<sup>17</sup>Figura 10. *Comunicaciones por Fibra Óptica*. Recuperado el 14 de diciembre de 2014 de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)



**Figura 11.** Fibras multimodo de índice escalonado y gradual<sup>18</sup>.

## **2.2. Parámetros de Transmisión.**

Existen parámetros y consideraciones importantes que se deben tomar en cuenta al diseñar e implementar redes ópticas, estas varían de acuerdo al tipo de fibra a utilizarse, distancia, clase de datos a transmitirse, etc., a continuación describiremos dos fenómenos importantes que afectan la correcta transmisión de la información en un enlace de fibra.

### **2.2.2 Atenuación**

La atenuación que se presenta en la transmisión de datos en un enlace óptico tiende a describir la reducción de potencia de la señal óptica, que inversamente proporcional a la longitud de la fibra. Como en otros medios de transmisión la unidad utilizada para medir la atenuación es el decibel (dB).

---

<sup>18</sup> Figura 11. *Fibras multimodo de índice escalonado y gradual*. Recuperado el 14 de diciembre de 2014 de: [http://www.thefoa.org/ESP/Fibra\\_optica\\_files/image010.gif](http://www.thefoa.org/ESP/Fibra_optica_files/image010.gif)

Para realizar el cálculo de este valor en un enlace de fibra por unidad de longitud se debe obtener el cociente entre la potencia de entrada que existe en la fibra ( $P_i$ ) y la potencia en la salida ( $P_o$ ), como podemos observar en la formula a continuación:

$$\alpha_{dB}L = 10 \log_{10} \frac{P_i}{P_o}$$

*Donde:*

$\alpha_{dB}$  es la atenuación por unidad de longitud

$L$  es la longitud de la fibra

Existen diferentes fenómenos por los cuales se produce la aparición de la atenuación en diferentes niveles de incidencia, estos dependen principalmente la composición, estructura y fabricación de la fibra.

Estos tipos de atenuación se clasifican de diversas formas, para la presente investigación dividiremos las pérdidas en dos grupos: en primer lugar las pérdidas producidas por factores propios y en segundo lugar las pérdidas por factores externos.

### **2.2.1.1 Pérdidas por Factores Propios**

En las pérdidas por factores propios se ha identificado dos factores sobresalientes que se describen a continuación.

#### **2.2.1.1.1 Pérdidas por absorción**

Estas pérdidas se deben a las impurezas que existen en la fibra, como por ejemplo los iones metálicos, estas impurezas absorben el rayo de luz y lo transforman en calor, a

pesar de la pureza del vidrio con el que se fabrica las fibras este presenta un 0.0001 de impurezas.

#### **2.2.1.1.2 Pérdidas por dispersión**

Este tipo de pérdidas se caracteriza por producirse a partir de la reflexión en el material, esto se origina cuando en el proceso de fabricación se forman irregularidades submicroscópicas en el material que al interponerse en el camino del rayo de luz producen reflexión y dispersión. A continuación describimos las principales pérdidas de este tipo.

#### **2.2.1.2 Pérdidas por Factores Externos**

Las pérdidas por factores externos se originan principalmente por las deformaciones mecánicas en la fibra, donde existe pérdida de la luz debido a que no existe una reflexión completa del rayo de luz al interior de la fibra.

Una de las principales causas de este tipo de pérdidas es la aparición de curvas que sufre la fibra óptica en su instalación y manipulación, este tipo de curvaturas se pueden clasificar como macro curvaturas cuando tiene un radio igual o superior a 1 cm y micro curvaturas cuando el eje de la fibra se desplaza en valores de micras en distancias limitados milímetros.

#### **2.2.2. Dispersión**

El efecto que causa la dispersión en la fibra óptica es la deformación que sufre un pulso que se propaga en ella, donde las componentes de la señal viajan a diferentes velocidades y llegan a su destino en tiempos distintos. Este fenómeno provoca la reducción del ancho de banda disponible debido al ensanchamiento de los pulsos lo que provoca una menor tasa de transmisión, este ensanchamiento es proporcional al ancho espectral de la fuente óptica y la longitud hasta su destino.

A continuación se describe los tres principales tipos de dispersión en fibra óptica.

### 2.2.3.2 Dispersión Modal

Esta dispersión se origina debido a la diferencia de tiempos que existe en la propagación de los rayos de luz que tienden a dispersarse por diversas trayectorias, este fenómeno se presenta en las fibras multimodo, por tal motivo se puede evitar al implementar fibras monomodo. Entre más grande sea el núcleo de la fibra mayor será el nivel de dispersión que se presente en la transmisión. A continuación en la Figura 12 podemos observar el ensanchamiento que sufre un pulso debido a la dispersión modal en la fibra óptica.

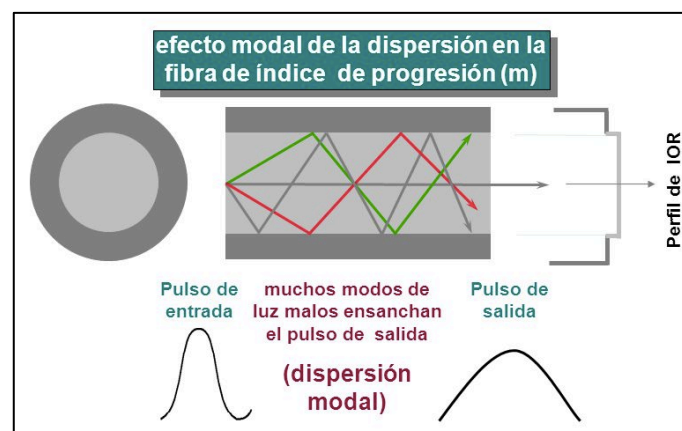
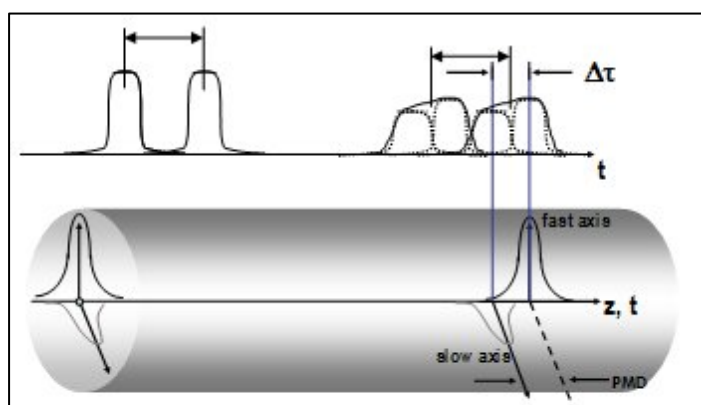


Figura 12. Efecto de la dispersión modal<sup>19</sup>.

<sup>19</sup>Figura 12. Efecto de la dispersión modal. Recuperado el 16 de diciembre de 2014 de: [http://images.slideplayer.es/3/1096391/slides/slide\\_36.jpg](http://images.slideplayer.es/3/1096391/slides/slide_36.jpg)

### 2.2.3.2 Dispersión por polarización del modo

El origen de este fenómeno se debe a que el núcleo de la fibra no es perfectamente circular lo que produce una dispersión que afecta a la señal a tal punto de dificultar su reconocimiento en su destino. En un escenario donde se implementa una fibra ideal monomodo los dos modos de polarizaciones viajan a la misma velocidad en dos ejes formando un ángulo recto entre los dos, pero dado a las imperfecciones de la fibra, cualquier asimetría o curvaturas, provoca que los modos viajen a diferente velocidad que produce una dispersión por polarización del modo PMD. El PMD se origina de un mínima diferencia que aparece en el índice de refracción de una pareja particular de estados que tienen una polarización ortogonal, esta propiedad toma el nombre de birrefringencia, que indica que la velocidad que obtendrá el rayo de luz se verá influenciado por la ruta que recorra la luz en la fibra óptica, como se puede visualizar a continuación en la Figura 13.



**Figura 13.** Dispersión producida por la polarización del modo<sup>20</sup>.

<sup>20</sup>Figura 13. *Dispersión producida por la polarización del modo*. Recuperado el 20 de diciembre de 2014 de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/img/soluciones/CD\\_PMD/CD\\_PMD\\_8.jpg](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/img/soluciones/CD_PMD/CD_PMD_8.jpg)

### 2.2.3.2 Dispersión cromática

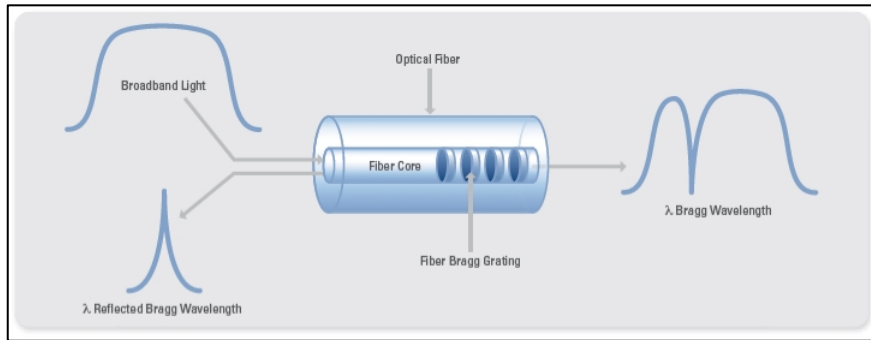
Este tipo de dispersión se produce por dos factores, los cuales se describen a continuación:

a. Dispersión por material: Este fenómeno se produce debido a que el índice de refracción del silicio depende de la frecuencia, lo que provoca que las componentes que tengan diferentes frecuencias tiendan a viajar en distintas velocidades.

b. Dispersión por guiado de onda: Esta dispersión parte de la distribución de la potencia de un modo que se distribuye entre el núcleo y el revestimiento, esta distribución depende directamente de la longitud de onda, por este motivo si la longitud de la onda llega a cambiar la distribución de la potencia también tiende a variar lo que provoca la aparición de la distorsión.

Para contrarrestar la dispersión cromática se puede implementar una de las siguientes soluciones:

1. Utilizar fibras que permitan compensar la dispersión, las fibras como DSF (Dispersion Shifted Fiber) y NZDF (Non Zero Dispersion Fiber) permiten disminuir o anular la dispersión que puede producirse en la tercera ventana.
2. Implementar un Grating de Bragg de fibra (FBG) chirpeado, que permite incorporar un retardo en base a la longitud de la onda lo que contribuirá a compensar los retardos que presentan las longitudes de onda (Figura 14).



**Figura 14.** Implementación de Bragg Grating para contrarrestar dispersión cromática<sup>21</sup>.

### 2.2.3. No Linealidades

Las comunicaciones ópticas que operan en niveles de potencia moderados (mW) con velocidades de transmisión menores a los 2,5 Gb/s, han sido consideradas como comunicaciones lineales, tanto para su diseño como para su implementación. Pero debido al masivo incremento de tráfico de datos en la red el ancho de banda se ha ido limitando, esto ha llevado a la necesidad de encontrar mecanismos que permitan el uso eficiente del ancho de banda disponible, uno de estos métodos es la multiplexación de las señales ópticas (WDM) que ha permitido mejorar la transmisión de la información por los enlaces ópticos e incrementar las velocidades de transmisión superando los 10 Gb/s, incorporando elevadas potencias de transmisión, sin embargo con estas nuevas características los sistemas ya no pueden ser considerados como lineales y la aparición de los efectos no lineales viene a influenciar directamente la transmisión de los datos a través de la fibra óptica.

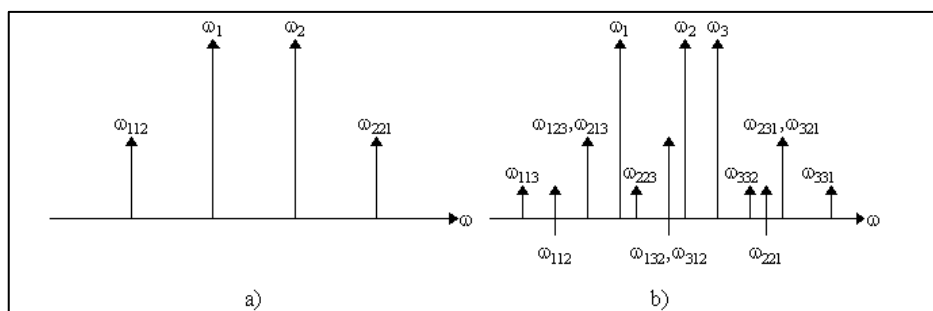
#### 2.2.3.2 Efectos no lineales tipo elástico

<sup>21</sup>Figura 14. Implementación de Bragg Grating para contrarrestar dispersión cromática. Recuperado el 21 de diciembre de 2014 de: [http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/diagram\\_20100726205948.jpg](http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/diagram_20100726205948.jpg)

Los efectos no lineales tipo elástico conforman a los fenómenos que se producen en la fibra óptica cuando no existe un intercambio de energía entre el rayo de luz y el medio de transmisión, su aparición se debe a las variaciones del índice de refracción que sufre el núcleo bajo la intensa radiación del rayo de luz. Dentro de este tipo de efectos no lineales podemos encontrar tres fenómenos que se deben considerar al momento de diseñar sistemas ópticos de transmisión, estos son el FWM (Mezcla de Cuarta Onda), el SPM (Auto Modulación de Fase) y el XPM (Modulación de Fase Cruzada).

### 2.2.3.2.1 FWM (Mezcla de Cuarta Onda)

La mezcla de Cuarta Onda tiene su origen en los sistemas de transmisión que implementan varias longitudes de onda de forma simultánea, un ejemplo son los sistemas DWDM, este fenómeno se produce cuando hay la combinación o mezcla de dos o más señales de transmisión ópticas que viajan por el mismo canal, esto a causa de que existe una dependencia del índice de refracción de la fibra con la potencia de la señal lo que provoca un medio no lineal de propagación con las condiciones necesarias para que se produzca la mezcla de las señales, como resultado se da la aparición de componentes nuevos que interfieren en la transmisión de la señal como se observa en la Figura 15.



**Figura 15.** Efectos FWM en la transmisión de varias señales (a) señales originales, (b) señales originales y señales nuevas producidas por FWM<sup>22</sup>.

<sup>22</sup>Figura 15. Efectos FWM en la transmisión de varias señales. Recuperado de 21 de diciembre de 2014 de: [http://www.npl.co.uk/upload/img/fwm\\_products.gif](http://www.npl.co.uk/upload/img/fwm_products.gif)

Para que en una transmisión óptica se produzca un efecto no lineal de este tipo se necesita cumplir con la condición de phase-matching, que indica que el efecto producido por FWM dependerá de la potencia de la señal, de la dispersión existente y del espaciamiento de los canales WDM. Las componentes que se generan por FWM en un sistema WDM aumentarán de forma exponencial a medida que se incrementan canales en el sistema, a continuación en la Tabla 1 podemos ver la cantidad de componentes generadas por el efecto FWM en relación al número de canales que utiliza un sistema de transmisiones ópticas WDM.

**Tabla 1.-** Número máximo de componentes FWM para sistemas WDM de diferentes tamaños<sup>23</sup>.

Número de señales	Número total posible de las componentes generadas por FWM
2	2
3	9
8	224
16	1920

Para realizar el cálculo del número máximo posible de las componentes que se puedan generar por efecto de FWM se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{N^2 * (N - 1)}{2}$$

Donde  $N$  es el número de señales que viajan simultáneamente por la fibra.

<sup>23</sup>Tabla 1. Número total posible de las componentes generadas por FWM. Recuperado de 21 de diciembre de 2014 de: <http://es.scribd.com/doc/223612308/Dialnet-EfectosNoLinealesYSuRelacionConLosParametrosDeTran-3914165>

Estos efectos producidos por las componentes generadas influyen considerablemente en la transmisión de la información causando principalmente un daño espectral, atenuación en la potencia de las señales y efectos de diafonía.

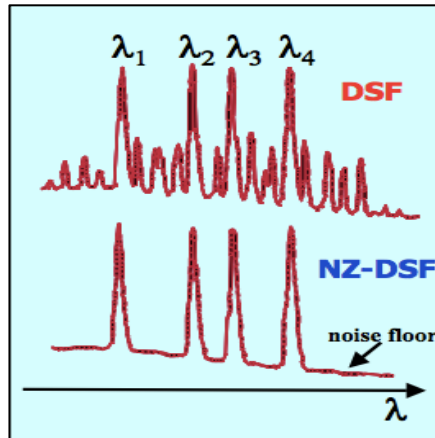
En la Tabla 2 a continuación podemos observar parámetros importantes relacionados con la incidencia de FWM que nos servirán como punto de partida para establecer las condiciones que permitan reducir o anular estos efectos en una transmisión óptica en una red DWDM.

**Tabla 2.-** Relación de la Potencia de FWM en relación a las características de las transmisiones ópticas<sup>24</sup>.

La Potencia de FWM es	
<i>Proporcional a</i>	<i>Inversamente Proporcional a</i>
Intensidad de Luz incidente	Dispersión de la fibra
Potencia por canal	Área efectiva de la fibra
Número de Canales	

Para reducir los efectos de FWM en los sistemas DWDM se puede utilizar fibras dispersivas que permitan incrementar la desadaptación de las fases, no obstante estos altos valores de dispersión cromática producen otro tipo de degradaciones en las señales, para evitar estos efectos se emplea fibras NZDSFs (Nearly Zero Dispersion Shifted Fibres), que incorporan valores reducidos de dispersión sin que estos lleguen a ser nulos lo que permiten prevenir la aparición de efectos no lineales y dispersivos como se puede apreciar en la Figura 15, las características de este tipo de fibras se encuentran en la Recomendación ITU G.655.

<sup>24</sup>SOTOMAYOR, Eduardo, "Minimización del FWM", Recuperado el 21 de diciembre de: <http://www.cursos.ucv.cl/eie46300/presentaciones/Minimizacion%20del%20FWM.pdf>



**Figura 16.** Comparación del Efecto FWM de una red WDM en una fibra común y en una fibra NZ-DSF<sup>25</sup>.

La presente investigación se enfoca en estudiar a través de la simulación de un sistema UDWDM los principales efectos producidos por FWM analizar sus diferentes niveles de incidencia en diversos escenarios permitiendo identificar cuáles son las mejores condiciones para que se pueda establecer una comunicación de datos.

### 2.2.3.2.2 Automodulación de fase (SPM)

El efecto SPM provoca el aumento del ancho espectral en los pulsos transmitidos en una fibra óptica, este efecto por sí solo no afecta el comportamiento del sistema de transmisión, pero su combinación con los efectos de dispersión cromática conducen a una degradación y atenuación de los pulsos. Al igual que los otros fenómenos no lineales parte de la dependencia que existe del índice de refracción del núcleo con la intensidad de los pulsos transmitidos en la fibra, este índice de refracción resultante puede ser calculado a través de la siguiente fórmula:

$$n(I, \omega) = n_0 + n_2 I$$

<sup>25</sup>Figura 16. Comparación del Efecto FWM de una red WDM en una fibra común y en una fibra NZ-DSF. Recuperado el 22 de diciembre de 2014  
de: <http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin51/enpdf/a03.pdf>

Donde:

$n_0$  es el índice de refracción a baja intensidad,

$n_2$  es el índice de refracción no lineal, para fibras de silicio tiene un valor de  $3 \times 10^{-20} \text{ Watts/m}^2$ ,

$I$  es la intensidad de pulsos transmitidos.

De acuerdo a estos comportamientos se puede identificar que los efectos no lineales son dependientes de la potencia de la señal transmitida, la cual tiene a disminuir por el efecto de la atenuación que sufre la señal en la fibra. Para poder calcular el ensanchamiento que sufre el espectro considerando la atenuación de la fibra utilizamos la siguiente fórmula.

$$\Delta\omega = \gamma L_{eff} \frac{dP(t)}{dt}$$

Donde:

$L_{eff}$  es la longitud efectiva,

$P(t)$  es la potencia del pulso,

$\gamma$  es el parámetro no lineal que se calcula a partir de:

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{A_{eff} c}$$

Donde:

$\omega_0$  es la frecuencia central del pulso

$A_{eff}$  es el área efectiva del modo,

$c$  es la velocidad de la luz en el vacío.

El parámetro de longitud efectiva es muy útil al momento de calcular la incidencia de los efectos no lineales, se realiza una aproximación de la longitud efectiva en un valor de 20km, en base a este valor podemos establecer un rango de consideración de los efectos no lineales en una fibra óptica, es decir por ejemplo si  $L$  (longitud del enlace) es mayor que  $L_{eff}$  los efectos no lineales estarán presentes solo en los primeros 20 km que

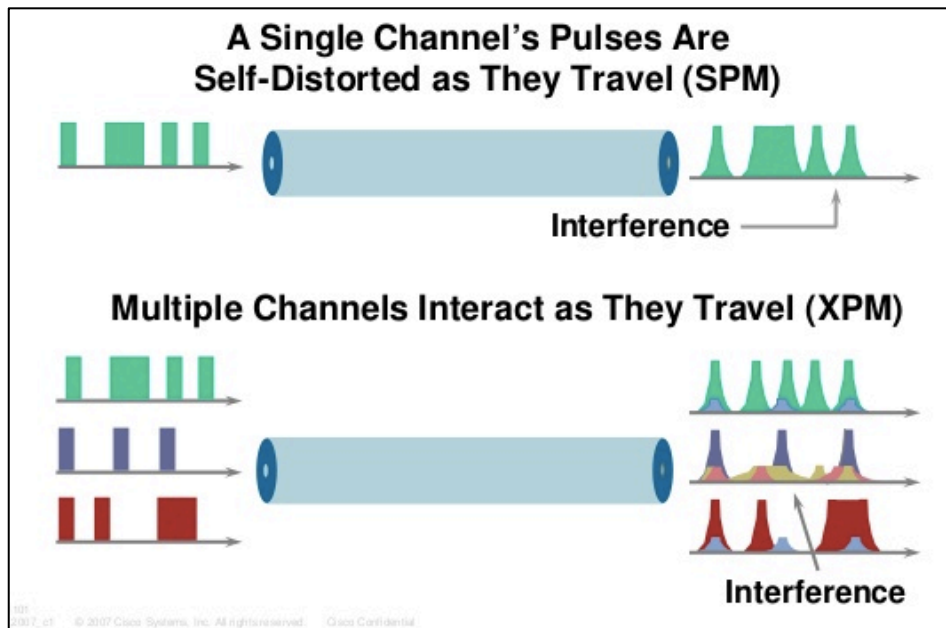
es cuando la potencia de la señal es más alta, por otro lado si  $L$  es menor que  $L_{eff}$  los efectos no lineales deben considerarse a lo largo de todo el enlace.

#### **2.2.3.2.3 Modulación de fase cruzada (XPM)**

La modulación de fase cruzada es muy similar al efecto SPM, se presenta en sistemas WDM donde se transmiten de forma simultánea dos o más canales ópticos, y su origen se debe a que el índice de refracción efectivo de una onda incidente depende su intensidad de modulación y de la intensidad de modulación de una onda vecina.

En los sistemas WDM la incidencia de los efectos XPM provoca que la variación de la potencia óptica de uno de los canales modifique la fase de los otros canales que se transmiten simultáneamente, este restringe la cantidad de canales para la transmisión de datos y su potencia óptica.

Una de las diferencias que existe en los efectos no lineales XPM y SPM se visualiza en la forma que se produce el ensanchamiento del pulso asimétrico, ya que a diferencia de SPM donde las oscilaciones se dan en ambos lados del pulso asimétrico en XPM solo se dan en un mismo lado.



**Figura 17.** Comparación de los efectos producidos en una señal en el caso de SPM y para tres señales en el caso de XPM<sup>26</sup>.

Una opción para reducir el efecto XPM en los sistemas WDM es incrementar el espaciado entre los canales transmitidos simultáneamente, esto permitirá que con la dispersión las constantes de propagación sean diferentes evitando que los canales incidan entre sí, impidiendo que el cambio de la potencia de una señal varíe la fase de una señal vecina. Otra alternativa para disminuir estos efectos es establecer canales que se encuentren en frecuencias muy distantes para que de esta forma no lleguen a afectarse mutuamente.

### 2.2.3.2 Efectos no lineales de tipo inelástico

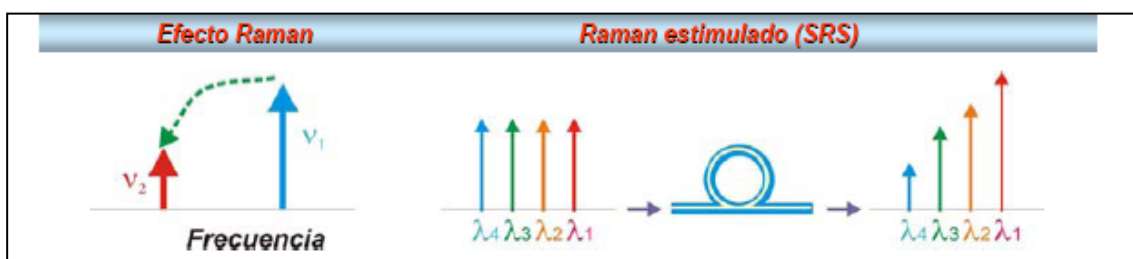
Los efectos no lineales de tipo inelástico conforman los fenómenos en los cuales en una transmisión por fibra óptica se produce un intercambio efectivo de energía entre el

<sup>26</sup>Figura 17. Comparación de los efectos producidos en una señal en el caso de SPM y para tres señales en el caso de XPM. Recuperado el 23 de diciembre de 2014 de: <http://image.slidesharecdn.com/991001dwdm-140116012750-phpapp01/95/dwdm-44-638.jpg?cb=1389857311>

material y campo electromagnético generado, esto se produce mediante las modificaciones que ocurren en la polarizabilidad del material que se encuentran asociadas a las vibraciones que sufren los átomos de la red de transmisión, el material tiende a evidenciar una inercia en su respuesta con respecto al tiempo, esto quiere decir, que existirán limitaciones en la respuesta en frecuencia frente a las variaciones repentinas en la intensidad de la luz. Al no existir un balance en las energías de los fotones, los fonones atraen una porcentage del campo electromagnético de la red, estos efectos llamados de difusión (Scattering) se encuentran comprendidos por efectos de difusión de Raman y difusión de Brillouin.

### 2.2.3.2.1 Difusión Raman estimulada (SRS)

La dispersión estimulada de Raman es un fenómeno en donde se produce una transferencia de energía desde los canales que tienen una mayor frecuencia a los canales que tiene un frecuencia inferior, como podemos observar en la Figura 17, el coeficiente de Raman ( $g_R$ ) constituye el factor principal que describe la dispersión estimulada de Raman. Se considera como valor crítico al límite de potencia del SRS que se establecerá cuando la potencia incidente y la dispersada adquieran el mismo valor.



**Figura 18.** Efecto de transferencia de energía de las señales con mayor frecuencia hacia los canales con menor frecuencia<sup>27</sup>.

<sup>27</sup>Figura 18. Efecto de transferencia de energía de las señales con mayor frecuencia hacia los canales con menor frecuencia. Recuperado el 28 de diciembre de 2014 de: [http://profesores.usfq.edu.ec/renej/Contenidos%20Comunicaciones%20Opticas/Exposiciones 2009/SBS.pdf](http://profesores.usfq.edu.ec/renej/Contenidos%20Comunicaciones%20Opticas/Exposiciones%202009/SBS.pdf).

Este efecto influye considerablemente a las comunicaciones por fibra óptica, sobre todo a transmisiones WDM donde se transmiten señales simultáneamente teniendo la aparición de diafonía. Por otro lado, también se puede utilizar favorablemente este fenómeno, al incorporarlo como un amplificador de las señales, donde en una fibra óptica se introduce paralelamente la señal que se desea amplificar y una señal que hará las acciones de bombeo o amplificación. Es conveniente establecer la frecuencia de la señal que actuará como amplificador en 13 THz garantizando así que está se encuentre arriba de las señales que se desea amplificar.

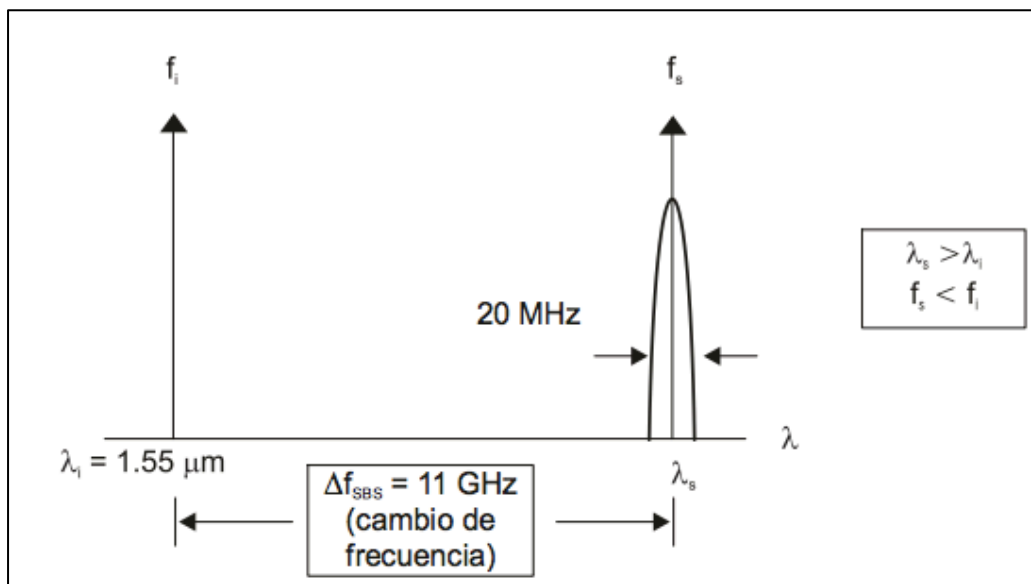
Las aplicaciones que se ha dado a los efectos de la difusión Raman espontánea en condiciones ópticas van desde la elaboración de láseres hasta amplificadores ópticos que llevan su nombre. Los láseres Raman incorporan un sintonía en frecuencia que puede llegar hasta 10 THz.

#### **2.2.3.2.2 Difusión Brillouin estimulada (SBS)**

La difusión Brillouin estimulada es muy similar a las SRS, de la misma forma se produce a partir de la interacción que existe entre los fotones y la vibraciones que se producen en la fibra, pero en este fenómeno las vibraciones provocan una variación regular del índice de refracción del medio, lo que provoca que este actúe como una red de difracción, reflejando los rayos de luz. Este efecto se debe a la aparición de la onda de Stokes, la cual se propaga en sentido inverso al sentido de la onda incidente y que además tiene una frecuencia inferior.

Debido a estas características se produce una alteración en la frecuencia de la Onda de Stokes la cual pasa a tener un valor aproximado de 11 GHz. En lo que respecta al valor de potencia límite el efecto de difusión Brillouin este restringe la potencia incidente de una señal que recorre por un sistema WDM, donde no depende del número de canales que exista en la transmisión.

Entre las principales consecuencias que se producen por la aparición del SBS se tiene la atenuación de la señal y el regreso hacia el transmisor de una porción de la potencia transmitida, por tal motivo se suele recurrir a realizar un apantallado para evitar esta retroalimentación. Para evitar la aparición de este fenómeno los sistemas WDM realizan un espaciado de sus canales mayor a 20 MHz. Como se puede observar en la Figura 19 se presenta un ejemplo del efecto que tiene el SBS en una señal a una longitud de onda  $\lambda = 1550 \text{ nm}$ .



**Figura 19.** Señal de longitud de onda  $\lambda=1550\text{nm}$  y onda producida por efecto del SBS<sup>28</sup>.

<sup>28</sup>Figura 19. Señal de longitud de onda  $\lambda=1550\text{nm}$  y onda producida por efecto del SBS. Recuperado el 28 de diciembre de 2014 de: <http://dialnet.unirioja.es/download/articulo/3914165.pdf>

Para sistemas con altas velocidades de transmisión que incorporan moduladores externos y fuentes láser de onda continua es vital tener el control del SBS. Donde la ganancia que experimenta SBS tiende a reducirse proporcionalmente con la velocidad de transmisión.

## **CAPÍTULO 3**

### **3. REDES WDM PON**

#### **3.1 Multiplexación en redes ópticas**

La multiplexación en los sistemas de comunicaciones ópticos tiene el mismo fin que en el resto de sistemas, el cual es realizar la combinación de dos o más canales en un solo medio facilitando su transporte y permitiendo compartir la fibra óptica con más canales de forma simultánea lo que contribuye al uso óptimo del ancho de banda disponible.

La multiplexación de señales además permite reducir en gran medida los costes al momento de realizar enlaces, sobre todo los que cubren grandes distancias, permitiendo maximizar el uso de los enlaces ya existentes, este procedimiento lo lleva a cabo el multiplexor, para unir los canales en el inicio de la transmisión y el demultiplexor para separar los canales en el destino.

##### **3.1.1. Métodos de multiplexación**

Existen diferentes tipos de multiplexación que utilizan las características de la señal de luz para poder realizar las combinaciones con otras señales y poder así realizar su transmisión, entre los principales métodos utilizados en fibra óptica tenemos: TDM (Multiplexación por División de Tiempo) y WDM (Multiplexación por División de Onda).

### 3.2.3.1 TDM (Time Division Multiplexing)

Este método de multiplexación permite mejorar la tasa de transmisión de los datos, su funcionamiento consiste en intercalar conforme transcurre el tiempo datos de diferentes canales, permitiendo así establecer una cadena de datos con una mayor velocidad de transmisión, como podemos observar en la Figura 20.

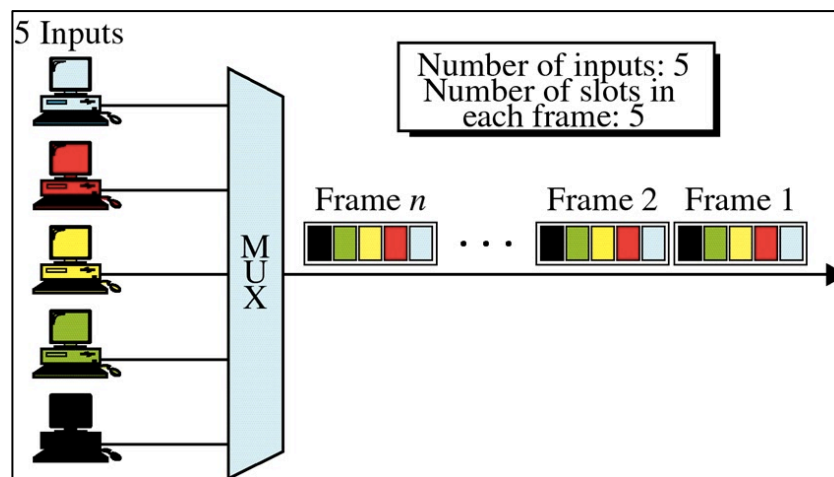


Figura 20. Multiplexación TDM y transmisión de 5 canales de datos<sup>29</sup>.

En la multiplexación por TDM las señales, previo a su combinación, son muestreadas en base a una secuencia de control lógica que comprueba el teorema de Nyquist para su transmisión. En lo que corresponde a los sistemas ópticos estos circuitos deben tener la capacidad de trabajar a muy altas tasas de transmisión, donde este método es llamado también OTDM (Optical Time Division Multiplexing).

Este método de multiplexación a pesar de tener una gran ventaja como mejorar las velocidades de transmisión presenta graves inconvenientes que se deben considerar, entre los principales tenemos la dispersión cromática y la PMD (Polarization Mode

<sup>29</sup>Figura 20. Multiplexación TDM y transmisión de 5 canales de datos. Recuperado el 30 de diciembre de 2014 de: <http://www.campusnikalo.com/2013/02/multiplexing-types-with-advantages.html>

Dispersión) que restringen la capacidad de incremento de la tasa binaria de esta técnica. Además la PMD provocará limitaciones en las distancias de transmisión de la señal. Sin embargo su uso es una alternativa viable para enlaces de cortas y medianas distancias que utilicen fibras del tipo SMF y DSF.

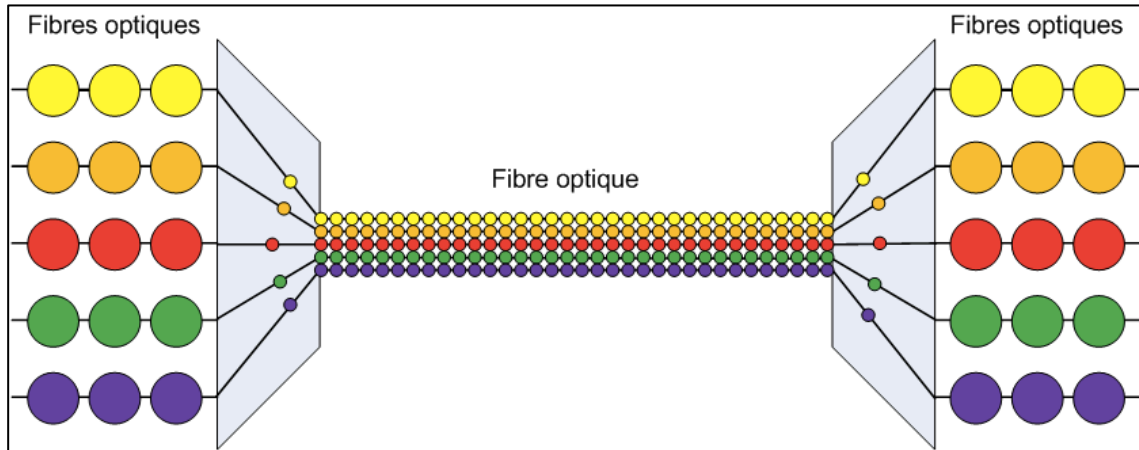
### **3.1.1.2. WDM (Wavelength Division Multiplexing)**

El uso del método de multiplexación WDM en sistemas ópticos permite la combinación de 2 o más señales en una misma fibra óptica, donde cada señal será transmitida con la misma tasa binaria y con una longitud de onda diferente, esto garantiza que las señales no interfieran unas con otras, permitiendo que la capacidad del enlace se pueda multiplicar en base al número de canales multiplexados.

El avance de esta técnica ha permitido optimizar en gran cantidad el uso del ancho de banda disponible en los enlaces ópticos. En sus inicios (1985) solo se podía realizar la multiplexación de dos señales, con el pasar de los años se ha llegado a diseñar sistemas que permitan la multiplexación de 160 señales y alcanzar una capacidad teórica de 25,6 Tb/s, a través de un único par de fibra.

Como se indicó previamente el proceso que se realiza en la multiplexación WDM tiene el objetivo de combinar mediante el uso de un multiplexor diversos haces de luz obteniendo un solo haz de luz para su transmisión que en su destino a través de un multiplexor se descompondrá en cada una de los haces originales. Los procesos de multiplexación y demultiplexación se realizan a través de un prisma, que permite

combinar las señales de luz y a su vez realizar el proceso de forma inversa como se puede observar en la Figura 21.



*Figura 21.* Multiplexación de varias señales a través de WDM<sup>30</sup>.

### 3.1.2.3.1 Componentes de un red WDM

La implementación de una red WDM requiere la integración de varios componentes, a continuación se describen los principales:

#### Transmisión WDM

La sección de transmisión se conforma de los siguientes componentes:

- Transpondedor de transmisión,
- Multiplexor óptico,
- Amplificador óptico,
- Compensadores de dispersión y
- Interfaces ópticos.

<sup>30</sup>Figura 21. Multiplexación de varias señales a través de WDM. Recuperado el 30 de diciembre de 2014 de: [http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission\\_sur\\_fibre\\_optique/multiplexage.html](http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/multiplexage.html)

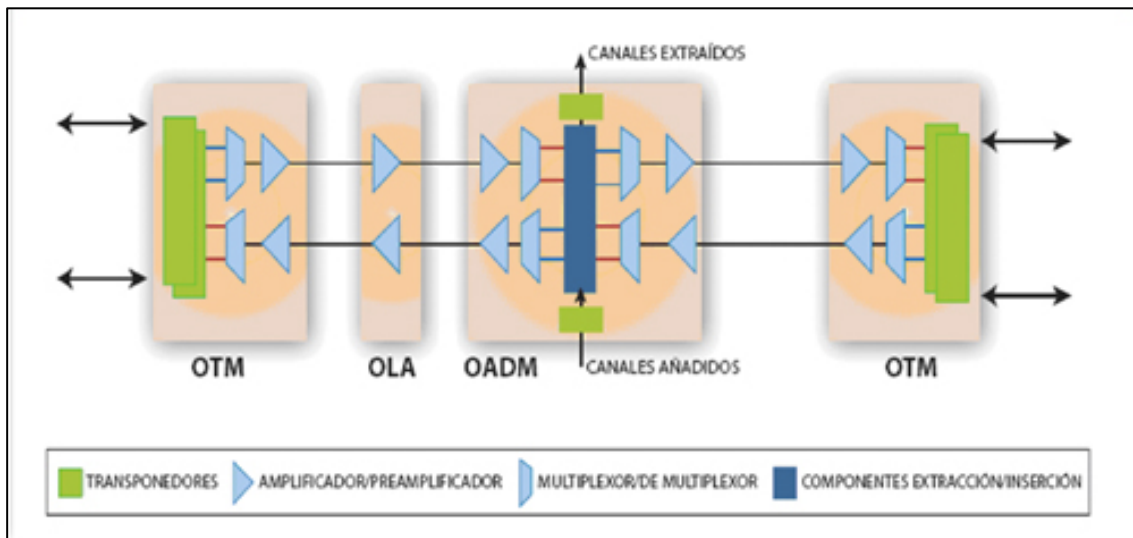
El proceso de transmisión en una red WDM inicia cuando el transpondedor procede a transformar de cada una de las señales ópticas de entrada la longitud de onda de la segunda ventana a la longitud de onda de la banda C. Posterior a esto el multiplexor realiza la combinación de las diversas señales que constan de una longitud de onda diferente en una solo señal óptica, luego esta señal pasa a un amplificador potencia que permite amplificarla y así realizar su transmisión por la fibra óptica. La función de los componentes de dispersión es evitar el ensanchamiento espectral de los canales ópticos para prevenir que se produzca un solapamiento entre estos.

### **Recepción WDM**

La sección de recepción se conforma de los siguientes componentes:

- Preamplificador óptico,
- Multiplexor óptico y
- Transpondedores de recepción.

Al llegar a su destino la señal única de luz pasa primeramente por un preamplificador óptico que filtra y amplifica la señal de luz, luego procede a atravesar el multiplexador que en esta caso cumplirá la función de demultiplexar la señal de luz en las diversas señales que las componen, finalmente cada señal pasa por un transpondedor de recepción que transforma la longitud de onda de la banda C a una señal con una longitud de onda de segunda ventana, en el esquema de la Figura 22 podemos visualizar los componentes de transmisión y recepción de un sistema WDM. Es importante describir que la función del transpondedor tanto de transmisión como de recepción es adaptar la señal original para su uso en la red y realizando también este proceso de forma inversa.



**Figura 22.** Componentes de transmisión y recepción de un sistema WDM<sup>31</sup>.

### 3.1.2.3.2 Ventajas y desventajas de la multiplexación WDM

A continuación se describen algunas de las ventajas y desventajas más relevantes del uso de sistemas WDM.

#### Ventajas

- La transparencia que existe en el formato y la velocidad de transmisión al realizar el diseño de las redes WDM es una de sus principales ventajas.
- Es un sistema de multiplexación óptimo para redes de gran complejidad en comparación a TDM, la inserción y extracción de los canales se facilita con el uso de dispositivos ópticos como por ejemplo el AODM (Optical Add-Drop Multiplexer).
- En comparación a la multiplexación TDM, WDM presenta tasas de transmisión binaria menores, por lo cual se amplía la distancia de transmisión que en TDM es limitada por la dispersión cromática. Esta distancia mejora aún más al tener la posibilidad de utilizar EDFAs (Erbium Doped Fibre Amplifier).

<sup>31</sup>Figura 22. Componentes de transmisión y recepción de un sistema WDM. Recuperado el 3 de enero de 2015 de: <http://www.mailxmail.com/curso-redes-estandares-3/dwdm>

- Existe un mejor uso del ancho de banda disponible. El sistema WDM tiene una mayor escalabilidad, donde se mejora la capacidad de transmisión al aumentar modularmente con la incorporación de nuevas longitudes de onda.

### **Desventajas**

- En las redes WDM existe un aumento considerable de los efectos no lineales y de las diafonías, debido a la cantidad de señales enviadas simultáneamente y a la potencia utilizada.

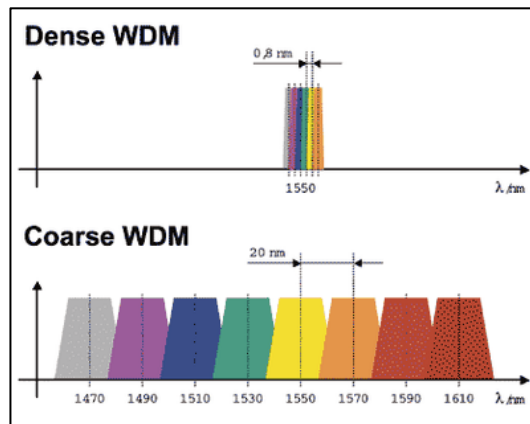
- Las elevadas tasas de transmisión de este tipo de redes también contribuyen a una elevación de la dispersión en los enlaces.

- El coste del sistema aumenta, debido a la necesidad de contar con un láser y un receptor por cada una de las longitudes de onda que se combinen en la transmisión.

- Una desventaja considerable es que debido a la aparición de los efectos no lineales, principalmente del efecto FWM (Four Wave Mixing) estos sistemas no son eficaces para enlaces que utilicen fibras tipo DSF.

### **3.1.2.3.3 Tipos de Sistemas WDM**

Los sistemas de multiplexación WDM de acuerdo al tipo de diseño y configuración de la red se subdividen en dos tipos: DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) y CDWM (Coarse Wavelength Division Multiplexing), en la Figura 23 podemos visualizar los dos tipos de multiplexación donde se diferencia el espacio entre frecuencias que utiliza cada sistema.



**Figura 23.** Espaciamiento de frecuencias en DWDM y CWDM<sup>32</sup>.

### a. DWDM

También llamado DWDM de larga y ultra larga distancia, se caracteriza por utilizar un número de longitudes de onda que puede llegar hasta 160 y en áreas metropolitanas de hasta 40 longitudes, además incorpora un espaciamiento que va de 50 a 100 GHz y que en áreas metropolitanas alcanza valores de 100 a 200 GHz. En lo que corresponde a la capacidad de canales puede soportar hasta los 40 Gbps, reduciéndose en áreas metropolitanas a los 10 Gbps. Su principal ventaja es las altas distancias que puede abarcar, donde los sistemas de ultra larga distancia pueden recorrer hasta los 1600 Km y los sistemas DWDM de menor distancia considerados metropolitanos alcanzan los 300 Km.

A pesar de estas características la limitación del ancho de banda y el gran incremento en el tráfico de las comunicaciones han llevado a realizar investigaciones de laboratorio que han logrado alcanzar transmisiones de 1022 canales utilizando una única fibra, este nuevo sistema ha sido nombrado como UDWDM (Ultra Dense Division Multiplexing),

<sup>32</sup>Figura 23. Espaciamiento de frecuencias en DWDM y CWDM. Recuperado el 3 de enero de 2014 de: <http://www.integrator.solidex.com.pl/integrator/archiwum/archiwum-wydania-online/wydania-2004/nr-1-2-2004-63/rozwiązanie-cwdm-firmy-microsens>

el cual implementa una separación de canales de solo 10 GHz lo que permite incrementar exponencialmente la capacidad del ancho de banda disponible. Más adelante se describirá detalladamente el funcionamiento y configuración de este tipo de redes.

#### **b. CWDM**

La multiplexación CWDM a diferencia de DWDM utiliza un menor número de longitudes de onda llegando hasta las 18 longitudes, además otra gran diferencia se visualiza en el espaciamiento de frecuencias que puede extenderse hasta los 2.500 GHz. En relación a su capacidad puede soportar canales de hasta 2.5 Gbps. Este tipo de sistemas tiene una limitación de 80 km en las distancias que puede cubrir.

Los sistemas CDWM tienen la capacidad de mediante el uso de una fibra de dos hilos soportar diferentes topologías de red y velocidades de transmisión, esto le permite un incremento exponencial de la capacidad del ancho de banda. Dadas las características de este sistema requiere componentes más simples que los sistemas DWDM, lo que contribuye a reducir el consumo energético, reducir los costes en general, otorgar anchos de banda más elevados, tener un control, instalación y configuración más simple. Estas características hacen que este tipo de multiplexación sea ideal para áreas metropolitanas. A continuación en la Tabla 3 podemos observar las principales diferencias que existen entre los sistemas CWDM y DWDM.

**Tabla 3.-** Comparación de características de sistemas CDWM y DWDM.

PARÁMETRO	CDWM	DWM
<b>Nº canales /fibra</b>	4-18	40-160
<b>Espaciado entre canales</b>	20 nm (2500 GHz)	1.6-0.4 nm (200-50 GHz)
<b>Capacidad de cada canal</b>	2.5 Gbps	10-40 Gbps
<b>Capacidad total fibra</b>	20-40 Gbps	100 - >1000 Gbps
<b>Tipo de emisor láser</b>	Uncooled DFB	Cooled DFB
<b>Distancia</b>	< 80 km	300 – 1600 (km)
<b>Coste</b>	Bajo	Medio-Alto
<b>Amplificación óptica</b>	No	EDFA

### 3.1.2. DWDM

La multiplexación DWDM es un método que permite la transmisión de señales de luz utilizando como medio de transporte una fibra óptica, se caracteriza por utilizar la banda C (1550 nm) para sus transmisiones, combina diferentes señales de luz cada una con una longitud de onda independiente que provienen de diversas fuentes.

Los orígenes de esta técnica de multiplexación se remontan a los años noventa, donde los primeros sistemas DWDM tenían una capacidad de 16 a 40 canales incorporando un espaciado de 100 GHz a 200 GHz, con la evolución de estos sistemas actualmente se puede realizar la combinación de hasta 160 canales y utilizando un espaciado mínimo de los 25 o 50 GHz. Y su evolución continua, ya se ha empezado con el uso de los sistemas llamados NG-DWDM (Next Generation DWDM), estos sistemas tienen una capacidad de hasta 640 canales que además pueden ser reconfigurables, esto lo realizan con la incorporación de fundamentos MPLS y ASON (Automatically Switched Optical

Network), otra de sus destacadas características es la opción de incorporar ingeniería de tráfico.

El sistema DWDM utiliza como medio de transmisión la fibra óptica monomodo esto debido a que este tipo de fibra es la que permite tener una mayor capacidad en el ancho de banda, además presenta una baja atenuación, resistencia a interferencias electromagnéticas, instalación más sencilla, entre sus características más relevantes. En relación a esto la fibra monomodo que permite el mejor funcionamiento de los sistemas que implementan una multiplexación DWDM es la fibra NZDSF y la SMF, la última se ha implementado en mayor cantidad por presentar un coste más reducido.

### **Parámetros de Transmisión**

A continuación se describen los principales parámetros que son considerables al momento de realizar una transmisión mediante multiplexación DWDM:

#### **a. Espaciamientos del canal**

Establecen la separación en frecuencia que existe entre los canales que son multiplexados, conforme se reduce esta separación se incrementará la diafonía así como la aparición de efectos no lineales, donde se destaca la aparición del efecto FWM. Se han realizado transmisiones con separaciones que van desde los 200 GHz hasta llegar a los 12.5 GHz. En la actualidad estos espaciamientos son estandarizados por la UIT.

### **b. Dirección de la señal**

Existen dos formas de dirección en una transmisión de un sistema DWDM: la unidireccional y la bidireccional. La unidireccional permite la transmisión de todas las longitudes de onda en un solo sentido lo que permite tener un mejor ancho de banda para la transmisión, pero a su vez presenta la necesidad de incorporar otra fibra para que la comunicación se realice en los dos sentidos. En lo que corresponde a la bidireccional, el canal procede a dividirse en dos bandas, una para cada sentido dentro de la misma fibra, esto lógicamente disminuye la capacidad del ancho de banda para las transmisiones.

### **c. Ancho de banda de la señal**

La gran capacidad en el ancho de banda que presenta DWDM es una de sus principales características, la misma que ha sido presentada previamente, en este aspecto los sistemas DWDM básicos implementan láseres con una velocidad de 10 Gbps multiplexando hasta 240 canales. Sistemas más modernos soportan velocidades de hasta 40 Gbps permitiendo una capacidad de 300 canales, en base a esto y de forma teórica se podría realizar una transmisión con 12 Tbps de ancho de banda a través de una sola fibra óptica.

### **d. Potencia de la señal**

La potencia de la señal en los sistemas DWDM presenta las mismas consideraciones que en cualquier otro sistema de transmisión, esto quiere decir, que la potencia

decrecerá conforme se prolongue la distancia de transmisión. La potencia de entrada será resultado de la potencia emitida por el láser transmisor, en lo que corresponde a la potencia de salida, esta será la suma de los diferentes factores a los cuales se vea expuesto el canal de transmisión, como por ejemplo: atenuación, amplificación, dispersión, aparición de efectos no lineales, entre otros.

#### **e. Codificación**

La codificación de las señales en un sistema DWDM consiste en la transformación de las señales eléctricas en señales ópticas, que posteriormente serán multiplexadas y transmitidas a través de la fibra óptica y su decodificación corresponderá al mismo procedimiento de forma inversa. Entre los tipos de codificación más utilizados están: RZ (Retorno a Cero) y el NRZ (Sin Retorno a Cero).

#### **f. Tasa de Bit Errado (BER)**

La tasa de bits errados permite establecer un porcentaje de bits que han tenido errores en comparación a los bits totales en una transmisión de datos a través de un enlace. En los sistemas DWDM comúnmente el valor del BER está en  $10^{15}$ , indicando que de  $10^{15}$  bits transmitidos ha existido 1 bit errado.

#### **g. Ruido**

El ruido se origina al realizarse la incorporación de mecanismos de amplificación a los cuales se someten las señales transmitidas. En lo que corresponde a transmisiones

ópticas el OSNR (Optical Signal To Noise Ratio) permite establecer una relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido.

### 3.1.2.3 Funcionamiento de un sistema DWDM

A continuación se describe las principales funciones que se llevan a cabo en un sistema DWDM para realizar una transmisión de datos, de forma general en la Figura 24 se puede visualizar el funcionamiento de estos sistemas.

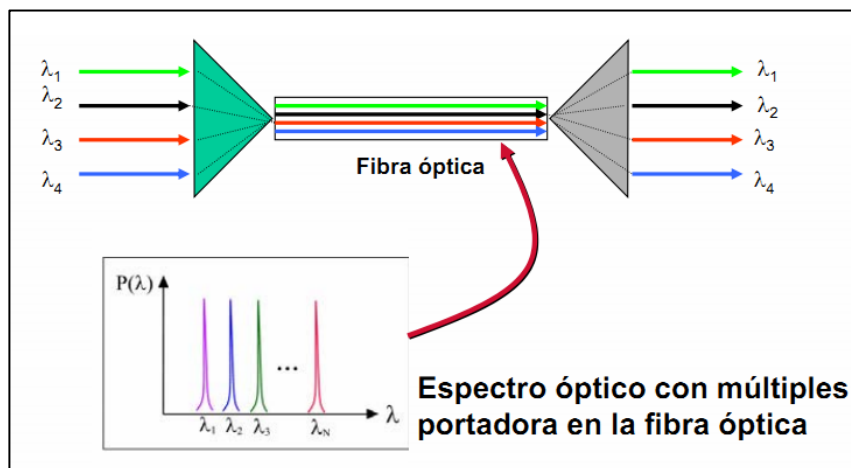


Figura 24. Multiplexación de canales en un sistema DWDM<sup>33</sup>.

**a. Generación de la señal:** Se utiliza una fuente que provea una luz estable con anchos de banda predefinidos, para poder realizar la transmisión de la información digital, este proceso se realiza a través de un láser en estado sólido.

**b. Combinación de señales:** Para realizar la combinación de múltiples canales los sistemas DWDM utilizan multiplexores, este proceso de agrupación de los canales que ingresan generan un porcentaje de pérdidas, el mismo que es independiente al número

<sup>33</sup>Figura 24. Multiplexación de canales en un sistema DWDM. Recuperado el 4 de enero de 2015 de: <http://gilettelecom4life.blogspot.com/2013/06/disenno-wdm.html>

total de los canales, para contrarrestar este efecto se implementan amplificadores ópticos que cumplen la función de amplificar las longitudes de onda de las señales ópticas.

**c. Transmisión de señales:** En la transmisión de información mediante los canales multiplexados utilizando DWDM a través de la fibra óptica se presentan diversos fenómenos que afectan y alteran la integridad de los datos transmitidos, se puede identificar entre otros efectos la aparición del Crosstalk y la degradación de la señal óptica, se puede reducir su grado de incidencia mediante la manipulación de algunas variables de la transmisión y multiplexación como los niveles de potencia del láser, el espaciamiento de la señal.

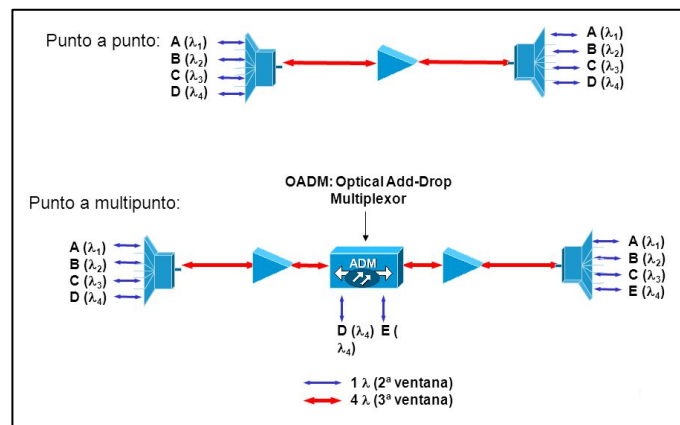
**d. Separación de las señales transmitidas:** Cuando las señales ópticas llegan a su destino se procede a la separación de los canales multiplexados, mediante la implementación de un demultiplexador, finalmente cada señal separada pasará a través de un transpondedor que acondicionará la señal transformando la longitud de onda que se encuentra en la banda C a una longitud de onda de segunda ventana.

### **3.1.2.3 Topologías y esquemas DWDM.**

Los sistemas DWDM debido a sus características presentan grandes ventajas en la implementación de redes que comprenden grandes extensiones, las configuraciones y topologías que actualmente son utilizadas para el diseño de este tipo de redes se describe a continuación:

### 3.1.2.3.1 Tipo Punto a Punto

La topología punto a punto es utilizada para realizar transmisiones de larga distancia, pudiendo abarcar cientos de kilómetros, su diseño se basa en la comunicación de solo dos puntos que harán las veces de transmisor y receptor, en los sistemas DWDM en esta topología se puede realizar la implementación de los OADM<sup>34</sup>, los cuales permiten extraer o introducir longitudes de onda de manera transparente, en este caso la topología pasaría a ser del tipo punto a multipunto, como se puede visualizar en la Figura 25. Las velocidades de transmisión que se pueden alcanzar son muy elevadas y pueden ir desde los 10 Gbps a los 40 Gbps.



**Figura 25.** Topologías de redes de tipo punto a punto y punto a multipunto<sup>35</sup>.

Para los enlaces metropolitanos este tipo de enlace normalmente no requiere la implementación de amplificadores, y en lo que corresponde a distancias ultra largas se puede llegar a implementar hasta diez amplificadores a lo largo de su recorrido. La confiabilidad de la señal transmitida y la efectividad de los procesos de restauración de

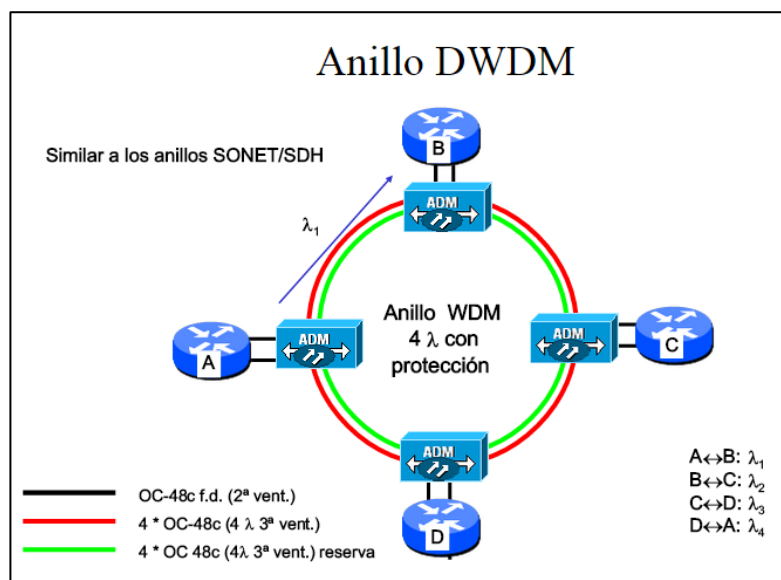
<sup>34</sup> OADM (Optical Add Drop Multiplexer), dispositivo óptico de redes wdm utilizado para insertar y extraer canales.

<sup>35</sup>Figura 25. Topologías de redes de tipo punto a punto y punto a multipunto. Recuperado el 4 de enero de 2015 de: [http://images.slideplayer.es/1/106621/slides/slide\\_69.jpg](http://images.slideplayer.es/1/106621/slides/slide_69.jpg)

la señal que se integran a lo largo de su enlace y su alcance son las principales ventajas de esta topología.

### 3.1.2.3.2 Tipo Anillo

Las topologías de tipo anillo son utilizadas para enlaces y sistemas que abarcan pocos kilómetros de extensión, por tal motivo son comúnmente implementados en redes metropolitanas. Se caracterizan entre otros aspectos por la limitación que tiene la fibra a incorporar solo 4 canales de longitudes de onda. En este tipo de enlaces también se puede implementar dispositivos OADM como se puede observar en la Figura 26, que permiten tener accesos a los dispositivos que se encuentran en la red como los servidores, routers y switches, pero a su vez el sistema experimenta un mayor número de pérdidas en base a la cantidad de OADM que se utiliza en esta arquitectura, cuando se tiene valores altos de pérdidas se debe recurrir al uso de amplificadores.



**Figura 26.** Topología de una red DWDM tipo anillo<sup>36</sup>.

<sup>36</sup>Figura 26. Topología de una red DWDM tipo anillo. Recuperado el 6 de enero de 2015 de: <http://slideplayer.es/slide/106621/>

Una de las principales ventajas de la topología anillo es que presenta un nivel de redundancia  $n+1$ , esto quiere decir que para la transmisión existe dos vías de conexión disponibles que permiten llegar a cualquier punto de la red, este es un parámetro muy importante para garantizar la comunicación para el caso que se produzca la falla de una de la líneas de conexión.

### 3.1.2.3.3 Tipo Malla

La topología tipo malla se caracteriza por ser un conjunto de redes y enlaces ya existentes, como por ejemplo una red punto a punto interconectada a través de la implementación de un dispositivo AODM con una red tipo anillo (Figura 27). En estas topologías robustas los sistemas que permiten la restauración y protección de los canales son implementados en rutas que sean compartidas lo que permite utilizar una menor cantidad de pares de fibra manteniendo el mismo tráfico.

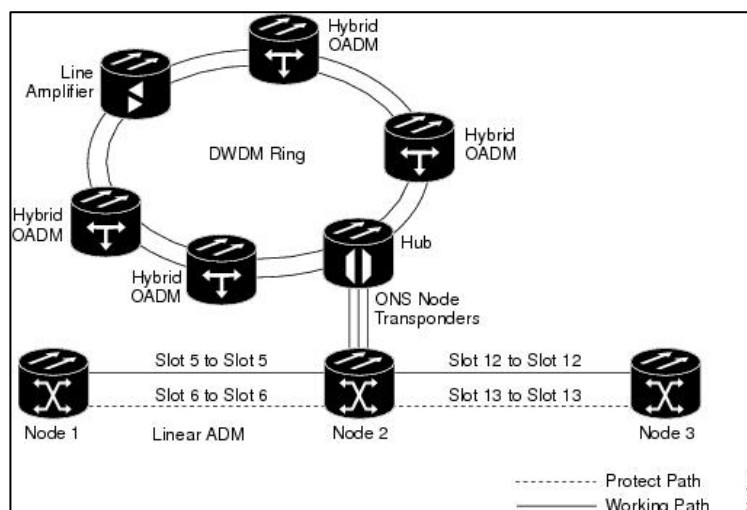


Figura 27. Topología de una red DWDM tipo malla<sup>37</sup>.

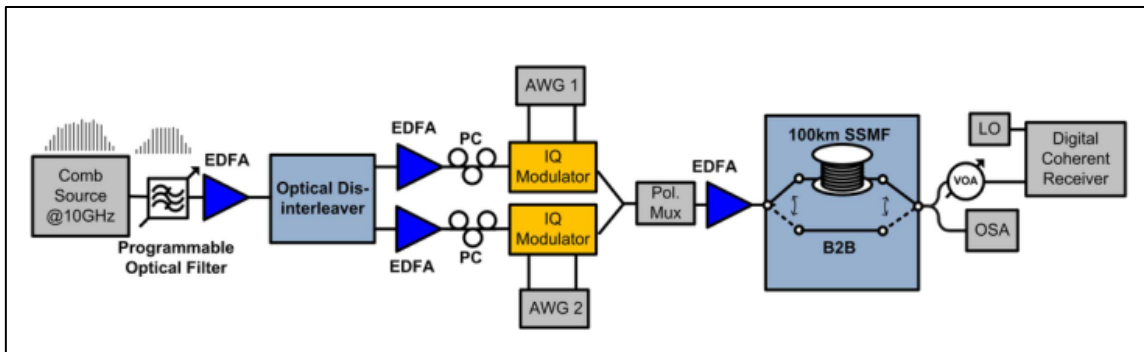
<sup>37</sup>Figura 27. Topología de una red DWDM tipo malla. Recuperado el 6 de enero de 2015 de: [http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r5\\_0/planning/guide/r50engpl/r50dwdm.html](http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r5_0/planning/guide/r50engpl/r50dwdm.html)

Este tipo de topología permite tener sistemas con elevados niveles de redundancia permitiendo garantizar las conexiones hacia diversos puntos de la red. Entre sus principales ventajas tenemos la flexibilidad y la eficiencia que incorpora, son consideradas las topologías de las redes del futuro por la complejidad, funcionalidades y arquitecturas que presentan.

### **3.1.2.3 UDWDM**

La constante necesidad de mejorar la capacidad del ancho de banda en los enlaces de comunicaciones ópticas han llevado a los investigadores a diseñar una nueva técnica de multiplexación llamada UDWDM (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing) que es una evolución de los sistemas DWDM ya descritos, se caracteriza principalmente por reducir el espaciamiento que existen entre los canales multiplexados a tan solo 10GHz lo que permite incrementar considerablemente la capacidad de canales que pueden ser multiplexados en una fibra óptica llegando hasta los 1022.

Particularmente para los sistemas de multiplexación WDM, DWDM y UDWDM se utilizan las bandas C y L, lo que quiere decir que las longitudes de onda se encontrarán desde los 1530 nm y los 1625 nm, esto permite que se pueden implementar amplificadores EDFA, que son amplificadores de fibra dopada que permiten amplificar las longitudes de onda que se encuentran en este rango. La alta sensibilidad y presión de los dispositivos que conforman una red UDWDM eleva considerablemente los costos de implementación en comparación a las redes que actualmente son utilizadas, a continuación en la Figura 28 podemos observar una configuración experimental realizada para una red PON con una multiplexación UDWDM.



**Figura 28.** Configuración experimental de una red LR UDWDM PON<sup>38</sup>.

La principal característica de los sistemas UDWDM como se mencionó anteriormente es el reducido espaciamiento que incorpora entre las longitudes de onda multiplexadas, pero esto a su vez presenta mayores retos para los diseñadores de redes que tienen que considerar la aparición de efectos no lineales, como el FWM. También es importante considerar que este sistema tiene una tasa de transmisión más lenta que el sistema DWDM convencional, lo que permite evitar problemas de dispersión que se presentan en las transmisiones a altas velocidades. Adicionalmente esta característica elimina la necesidad de utilizar diversas etapas de TDM.

### 3.1.2.3.1 Estructura de un sistema UDWDM

Un sistema UDWDM está estructurado de la siguiente forma:

- a. Fuentes Ópticas:** Su función es transformar la señal eléctrica en una señal luminosa con una determinada longitud de onda, el dispositivo encargado de esta tarea es el láser. La selección del láser para los sistemas UDWDM se debe basar en el nivel de

<sup>38</sup>Figura 28. Configuración experimental de una red LR UDWDM PON. Recuperado el 8 de enero de 2015 de: [http://www.researchgate.net/profile/Prince\\_Anandarajah/publications](http://www.researchgate.net/profile/Prince_Anandarajah/publications)

seccionamiento que se realizará, además deberá garantizar la estabilidad de las longitudes de onda en la transmisión.

**b. Multiplexadores y Demultiplexadores:** Los multiplexadores UDWDM deben realizar la función de combinar las señales de luz que provienen de cada una de las fuentes ópticas para proceder a su transmisión a través de la fibra óptica. En lo que corresponde a los demultiplexadores, se encargarán de realizar la separación de las diversas señales en su destino, esta tarea la desarrollan basándose en la longitud de onda de cada señal.

Actualmente existen tres tipos de multiplexores implementados en redes WDM: Los prismas, los filtros de interferencia y los de rejilla de difracción. Para que este tipo de multiplexores puedan ser implementados en sistemas UDWDM deben contar entre otras características con bajos niveles de diafonía, mínimas pérdidas por inserción, alta confiabilidad.

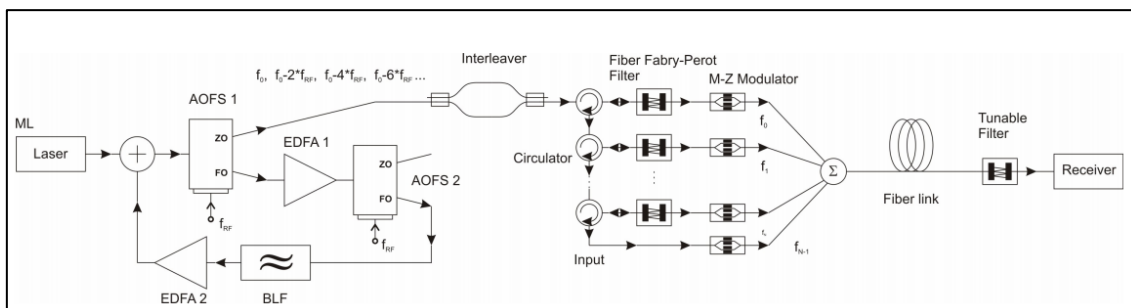
**c. Medio de Transmisión:** La fibra óptica utilizada para la transmisión de datos en sistemas UDWDM debe cumplir con requerimientos especiales, principalmente presentar la menor atenuación posible en las longitudes de onda implementadas. El uso de fibras multimodo queda descartado, dado que la multiplexación en este tipo de fibras se realiza con la variación del ángulo de ingreso conservando la misma longitud de onda. Por otro lado las fibras monomodo permiten realizar el ingreso de las señales con un mismo ángulo siendo separadas por la diferencia entre sus longitudes de onda.

Un modelo de fibra óptica que puede ser implementado es la fibra monomodo G.655 o también llamada NZDS, sus características se encuentran definidas en la recomendación ITU-T G.655, este tipo de fibras presentan bajos niveles de dispersión en longitudes de onda entre 1530nm y 1565 nm.

**d. Fotodetectores:** Como se describió en los sistemas DWDM su función es realizar la transformación de la señal luminosa demultiplexada en una señal eléctrica una vez que ha llegado a su destino. Cada uno de los fotodetectores usados en el sistema debe implementar un filtro óptico sintonizable para descartar las señales no deseables.

**e. Amplificadores:** Los amplificadores son implementados a determinadas distancias a lo largo de toda la transmisión, su función es reconstruir las señales, para este tipo de transmisiones se implementan como se indicó anteriormente los amplificadores EDFA. Este tipo de amplificadores suele estar compuesto por un etalón Fabry-Perot que a través de una cavidad resonante formada por dos o más espejos permite seleccionar la longitud de onda.

En la Figura 29 podemos identificar algunos de los principales elementos que conforman una red UDWDM.



**Figura 29.** Sistema de transmisión UDWDM con separaciones de 3,125 GHz<sup>39</sup>.

<sup>39</sup>Figura 29. Sistema de transmisión UDWDM con separaciones de 3,125 GHz. Recuperado el 8 de enero de 2015 de: <http://www.ise.pw.edu.pl/~rrom/SPIE/SPIE8010-OFA2011-Bialowieza/SPIE801007.pdf>

### 3.1.2.3.2 Tipos de Láser

La dispersión es un parámetro muy importante al momento de seleccionar un tipo de láser para una transmisión. El máximo nivel aceptable de dispersión es de aproximadamente 2 dB. A continuación se describen los principales modelos de láser utilizados actualmente.

**Fabry-Perot:** Es el diodo láser más común y el más económico en el mercado, utilizados principalmente para comunicaciones monomodo. Es un láser de tipo oscilador conformado por dos espejos que se encuentran separados por un medio amplificador. Una de sus características es que posee un ancho de línea de 1 o 4 nm.

**VSCELS:** Su comercialización es reciente, se caracterizan por su cavidad vertical y su emisión superficial, la cavidad posee una longitud menor (1 a 2  $\mu\text{m}$ ) a la de un láser con emisión lateral (500 a 1000  $\mu\text{m}$ ). Hasta el momento se han desarrollado VSCELS que emiten longitudes de onda menores a 1  $\mu\text{m}$ .

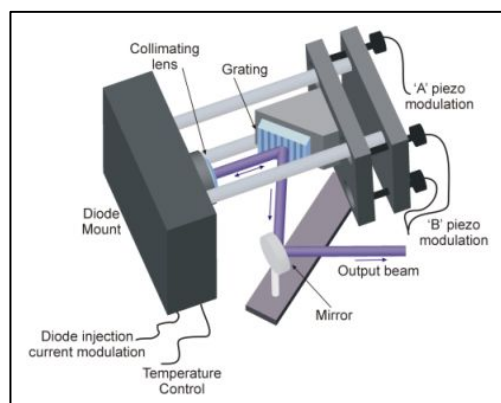
**Standard DFB y Screened DFB:** Son láseres con un diseño similar. El Láser Standard posee un ancho de línea de 0,1 nm. Presenta una limitación de transmisión hasta 50 km. En lo que corresponde a Screened DFB posee anchos de línea entre 0,001 a 0,05 nm, sus características le permiten tener mayores alcances que el láser Standard DFB.

### 3.1.2.3.3 Láser ECDL (External Cavity Diode Láser)

Las nuevas características que incorpora el láser tipo ECDL, como el avance en anti reflexión y empaquetado de datos, ha permitido que sea considerado como un emisor viable para las transmisiones UDWDM.

El Láser ECDL mediante el uso de espejos y de enrejados externos permite obtener anchos de línea de gran estreches y una estabilidad de alta frecuencia. Esto quiere decir que debido a la separación longitudinal que existe en la región activa del enrejado se puede obtener estas características que son las que dan superioridad a este tipo de láser sobre otros al momento de su implementación en los sistemas de transmisión más modernos.

De forma general un láser tipo ECDL está compuesto por un diodo AR cubierto, comúnmente un Fabry-Perot, y por un enrejado (Figura 30), estos componentes junto con la incorporación de una etapa semiconductor del láser en el interior de una cavidad externa permiten dar una estabilidad ante la temperatura y mejorar la longitud de onda.



**Figura 30.** Componentes de Láser ECDL<sup>40</sup>.

<sup>40</sup>Figura 30. *Componentes de Láser ECDL*. Recuperado el 8 de enero de 2015 de: <http://laser.cheng.cam.ac.uk/wiki/index.php/Image:ECDL3D.jpg>

Una de las principales características del láser ECDL es la capacidad de poder seleccionar una o más longitudes de onda, presentando tolerancias inferiores a 0,1 nm para longitudes de onda centrales y para ancho de banda, de esta forma se elimina el requerimiento de realizar ajustes de temperatura que son necesarios en otros tipos de láser.

Orientándonos a los sistemas UDWDM, es viable la implementación de este tipo de láser, ya que entre sus capacidades más sobresalientes permite obtener un ancho de línea espectral muy estrecho, un parámetro fundamental para estos sistemas que necesitan que cada canal se encuentre separado por espacios muy angostos.

### **Ventajas y Desventajas de Sistemas UDWDM**

A continuación se describen las principales ventajas y desventajas que se han podido identificar en base al diseño e implementación de los sistemas UDWDM en comparación a los sistemas de transmisión convencionales.

#### **Ventajas**

La capacidad de poder transmitir hasta 1022 canales simultáneamente a través de una fibra óptica es una de las principales ventajas que presenta este método de multiplexación, el poder mejorar la capacidad del ancho de banda disponible en las redes contribuirá a que el creciente tráfico de datos no llegue a saturar las redes disponibles, además de permitir el desarrollo de nuevas aplicaciones.

Al implementar una menor velocidad de la tasa de transmisión de datos contribuye a minimizar los dispositivos que se requieren para realizar la transmisión, como por ejemplo la implementación de varias etapas de TDM que se utiliza en otros sistemas, además esto permite reducir la aparición de problemas de dispersión en comparación a sistemas de mayor velocidad de transmisión.

### **Desventajas**

El estrecho espaciamiento que existe entre los canales de un sistema UDWDM, presenta grandes retos, esto debido a la aparición de efectos no lineales que tienden a distorsionar la información recibida en el destino. Además al realizar una transmisión a menor velocidad se requiere de un mayor número de canales para realizar para la transmisión de la misma cantidad de datos.

Otro aspecto importante es el coste final de la implementación de un sistema UDWDM, esto debido que a diferencia de otros sistemas requiere de dispositivos más complejos y en mayor cantidad como varios transmisores y receptores, a diferencia del sistema DWDM convencional.

En la Tabla 4 podemos observar las principales diferencias y similitudes que tienen los diferentes tipos de sistemas que en la actualidad se encuentran en uso.

**Tabla 4.-** Comparación de las principales características de los sistemas de multiplexación WDM.

PARÁMETRO	CWDM	DWDM (MAN/WAN)	DWDM (Largo Alcance)	UDWDM
Espectro	O, E, S, C, L	C, L	C, L, S	C, L
Canales Por Fibra	4 a 16	32 a 80	80 a 160	hasta 1024
Espaciado entre Canales	2500GHz	100 GHz	50 GHz	hasta 10 GHz
Capacidad por Canal	2.5 Gbits/s	10 Gbits/s	10 a 40 Gbits/s	Hasta 40 Gbits/s
Capacidad de la Fibra	20 a 40 Gbits/s	100 a 1000 Gbits/s	menor a 1 Tbit/s	mayor a 1 Tbit/s
Tipo de Láser	Uncooled DFB	Cooled DFB	Cooled DFB	ECDL
Filtros Disponibles	TFF	TFF, AWG, FBG	TFF, AWG, FBG	FBG
Distancia	hasta 80 km	cientos de km	miles de km	miles de km
Amplificación Óptica	No dispone	EDFA	EDFA, Raman	EDFA
Coste	bajo	medio	alto	alto

## 3.2. Redes PON

### 3.2.1. Historia y Evolución

Las Redes PON (Passive Optical Network) surgen a partir de la creciente demanda de mayores anchos de banda y velocidades de transmisión, permitiendo realizar el reemplazo de los elementos activos existentes en una red por elementos pasivos, reduciendo así los costos de mantenimiento e implementación de las redes. Este tipo de redes se enfoca en prestar servicio de redes FTTH (Fiber To The Home) que se basa en el uso de cables de fibra óptica y sistemas de distribución ópticos para la distribución de servicios avanzados hasta los hogares de los usuarios.

A partir del año 1995 se empezó la investigación de una red que permita ofrecer servicios integrados a los usuarios, permitiéndoles acceder a un gran ancho de banda, pero sin tener los costes que implican una conexión punto a punto. Para unificar las diversas especificaciones de este tipo de redes se fundó la FSAN (Full Service Access Network). Para cumplir con estos objetivos las Redes PON se basaron en el

funcionamiento de las redes CATV recicladas que incorporan un canal de retorno para ofrecer los servicios de banda ancha. La configuración básica de un sistema CATV está compuesta por nodos que se encuentran unidos con la cabecera mediante fibra óptica, de donde surgen de forma compartida los tendidos de cable coaxial que implementando divisores eléctricos llegan hasta los usuarios. En lo que corresponde a las Redes PON se sustituye los tendidos coaxiales y los splitters por fibra óptica (monomodo) y divisores ópticos, permitiendo mejorar el ancho de banda disponible para cada usuario.

Posteriormente en el año 1997 las especificaciones realizadas para las Redes PON fueron entregadas a la ITU. Siete años después la ITU-T autorizó las siguientes especificaciones para el diseño, implementación y gestión de las Redes PON:

1. **G.938.1**, descripción general de las Redes PON,
2. **G983.2**, descripción de la capa de gestión y mantenimiento,
3. **G.983.3**, descripción de la calidad de servicio BPON (BPON será descrita más adelante),
4. **G.983.4**, descripción de la asignación de ancho de banda dinámico,
5. **G983.5**, descripción de los mecanismos de protección,
6. **G.983.6**, descripción de la capa de control de red OTN (Optical Transport Network),
7. **G983.7**, descripción de la capa de gestión de red del ancho de banda dinámico,
8. **G983.8**, descripción del soporte del protocolo IP, Video, VLAN y VC (Virtual Circuit).

Años después en 2001, el Instituto de los Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) estructuró un equipo de estudio con el nombre de EFM (Ethernet First Mile), que debía investigar como descontextualizar la tecnología Ethernet para el área empresarial y residencial. Finalizado el proyecto se estableció una nueva especificación para las Redes PON, que llevaría el nombre de EPON (Ethernet PON), a diferencia de las versiones anteriores estas redes ya no realizan el transporte de redes ATM, efectúan el tráfico directo de Ethernet nativo.

El desarrollo de las redes PON ha permitido reducir los principales problemas que se presentaban en la última milla, esto ha contribuido al mejoramiento e implementación de nuevos servicios de telecomunicaciones para los usuarios. A continuación se describe las principales características de este tipo de redes:

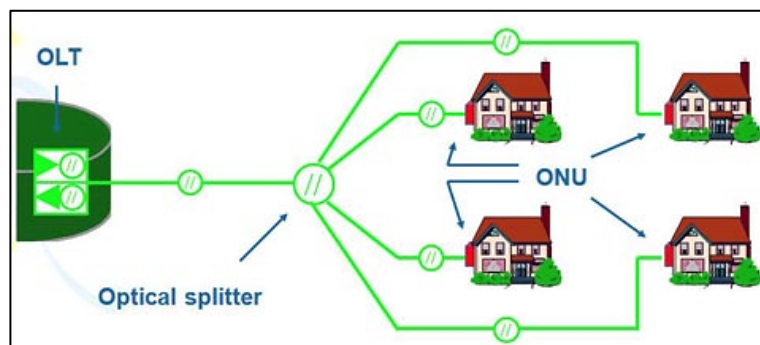
- El diseño de las redes PON permite a la central cubrir una cobertura límite de 60 km hasta los usuarios, mejorando considerablemente la cobertura permitida por los sistemas DSL que tienen un límite de 5 km.
- Las redes PON al incorporar fibra óptica hasta cada usuario, permiten tener acceso a una mejor capacidad de ancho de banda en comparación a los sistemas tradicionales de cobre.
- El diseño de este tipo de redes facilitan el despliegue de la fibra en un bucle local al permitir diseñar distribuciones de tipo árbol – rama, adicionalmente se reduce la cantidad de dispositivos necesarios para su manejo y supervisión en la central.
- Las redes PON presentan una inmunidad a los ruidos electromagnéticos y no permiten la propagación de descargas eléctricas que pueden producir por

ejemplo a través de un rayo, esto disminuye los costes de mantenimiento de la red.

- Una característica importante de las Redes PON es la capacidad de superponer longitudes de onda en las transmisiones que realiza.

### 3.2.2. Estructura y funcionamiento de una red PON

El funcionamiento general de una red óptica pasiva se basa en una tecnología punto-multipunto, el tráfico se transporta desde la OLT (Optical Line Terminal) que se puede encontrar en una Central o en un Nodo Óptico hacia la Unidad Óptica del Usuario y viceversa. La Unidad Óptica del Usuario u ONU (Optical Line Terminal) completa la configuración del esquema FTTH, en la Figura 31 se visualiza una estructura general de una red PON.



**Figura 31.** Estructura de una Red PON<sup>41</sup>.

En el diseño de las redes PON se implementan diversos tipos de topologías, como las de anillo, las de árbol, las de árbol – rama, y las de bus óptico lineal, cada una de las

<sup>41</sup>Figura 31. Estructura de una Red PON. Recuperado el 9 de enero de 2015 de: <http://www.instaladoresdetelecomhoy.com/imagenes/2013/02/Analizador-y-emulador-para-redes-GPON.jpg>

divisiones en estas topologías se realiza a través de la conexión consecutiva de divisores ópticos 1xN.

Independientemente de la topología que implemente una red PON la transmisión se realizará mediante una red monomodo, donde para el canal ascendente el tráfico será transportado de forma punto-multipunto, desde el Nodo Óptico hacia todas las unidades ONU, en lo que corresponde al enlace descendente la transmisión será punto a punto, y se realizará de forma individual desde cada unidad ONU hacia el Nodo Óptico. Para garantizar que las transmisiones tanto ascendente como descendente no se afecten entre sí, las redes ópticas implementan una multiplexación WDM que les permite trabajar con diferentes longitudes de onda.

Las configuraciones regulares de las redes PON incorporan un transmisión con dos longitudes de onda, una longitud de onda de 1290 nm para la transmisión en el enlace descendente, y una longitud de onda de 1310 nm para el enlace ascendente, el objetivo de utilizar portadoras en la segunda ventana es minimizar los costes de los enlaces ópticos. Los filtros utilizados para realizar la separación de las longitudes de onda se encuentran ubicados en los transceivers ópticos.

Una parte importante en el diseño de una red óptica pasiva, es la dependencia de potencia de transmisión que tienen las diversas arquitecturas, esta potencia dependerá de la distancia que exista entre el OLT y cada una de las ONUs, pudiendo llegar a extenderse hasta los 60 km, entre menor sea esta distancia más reducida será la potencia necesaria para la transmisión.

### **3.2.3. Topologías PON**

Con el desarrollo de las nuevas tecnologías y en base a la investigaciones realizadas sobre las redes ópticas pasivas se han desarrollado tecnologías que han permitido satisfacer las demandas de los usuario hasta la actualidad, y a su vez las futuras combinaciones de tecnologías PON y métodos de multiplexación como DWDM y UDWDM que visualizan una nueva generación de redes, con nuevas características que permitirán satisfacer las futuras demandas de tráfico y el desarrollo de nuevas aplicaciones. A continuación se describen las principales tecnologías que han sido desarrolladas a partir de la red original PON.

#### **a. APON**

APON (Redes Ópticas ATM) es el primer estándar definido para las redes PON, se encuentra descrito en la revisión del estándar ITU\_T G.983. Sus configuración se basó en las especificaciones presentadas por el comité FSAN, y se caracterizaban principalmente por utilizar el ATM de protocolo de señalización de la capa 2. Este tipo de red era usado en arquitecturas como FTTH, FTTCab y FTTB/C.

#### **b. BPON**

BPON (Broadband PON) surge de la evolución de APON, su principal objetivo era mejorar el ancho de banda, esto le permitió agregar nuevos servicios como la asignación de video, Ethernet, VPL esto a partir de implementar un nuevo sistema de multiplexación WDM.

Originalmente el estándar que define a BPON (G.983.1) planteaba una red simétrica, es decir, la misma velocidad de transmisión de datos (155 Mbps) tanto en el enlace ascendente como en el enlace descendente. Posteriormente se realizó una actualización a la norma para alcanzar mayores velocidades de transmisión estableciéndose un sistema de velocidades de transmisión asimétricos, dando prioridad al enlace descendente.

### **c. GPON**

GPON (Gigabit Capable PON) es otro tipo de tecnología PON que al igual que sus antecesoras se enfoca en mejorar el ancho de banda y además alcanzar una mejor eficiencia en el transporte de datos IP. Esta tecnología se encuentra descrita por la ITU-T en las siguientes recomendaciones: G.984.1, G.984.2, G.984.3 y G.984.4. Una de sus características es el aumento en las velocidades de transmisión de datos pudiendo llegar hasta los 2.488 Gbps con arquitecturas asimétricas.

Una ventaja de las tecnologías GPON, es la capacidad de ofrecer a los proveedores de seguir brindando los servicios clásicos si realizar cambios en los dispositivos para realizar la compatibilidad con esta nueva tecnología. Esto se logra a través de un sistema de encapsulamiento que incorpora GPON el cual permite una compatibilidad con todo tipo de servicios.

#### **d. EPON**

EPON (Ethernet PON), este tipo de redes PON se caracteriza principalmente por realizar el transporte a través de Ethernet y no mediante celdas ATM, lo que mejora considerablemente la eficiencia del sistema. EPON se basa en el estándar IEEE 802.3, el sistema trabaja con velocidades de Gigabit que dependerán del número de ONUs existentes en la red.

Una ventaja de los sistemas EPON es la incorporación de calidad de servicio (QoS) tanto para el enlace ascendente como para el descendente, además la administración de estas redes se facilita en comparación a los otros tipos de redes PON debido al uso del protocolo SNMP.

#### **e. GEAPON**

GEAPON (Gigabit Ethernet PON), esta tecnología ha sido desarrollada para integrar las redes PON y las Gigabit Ethernet, esto permite reducir los costes de instalar las redes de fibra óptica hasta el usuario al incorporar interfaces Ethernet. Esta combinación permite ofrecer de manera óptima servicios combinados de datos, voz y video. Además su control se facilita por la incorporación de elementos pasivos en la arquitectura de la red. En lo que respecta al ancho de banda, se garantiza su estabilidad para las diversas aplicaciones al permitir un número máximo de 32 abonados por cada trayectoria de fibra óptica.

### 3.3. Redes DWDM PON y UDWDM PON

#### 3.3.1. Redes DWDM PON

La descripción de las redes PON y el funcionamiento de la multiplexación DWDM ya fueron descritos de forma detallada en secciones anteriores del presente proyecto. La implementación de la multiplexación DWDM en una red PON ha sido desarrollada para ofrecer servicios superiores al de una red GPON, es decir, se busca obtener grandes alcances en la transmisión de fibra óptica. Esta combinación ha permitido acceder a una gran flexibilidad de la red, pero a su vez a presentado una capacidad adicional limitada, esto debido a que cada una de las longitudes de onda es direccionada de forma individual hacia el panel de conexión de fibras y en su destino se encuentra en sistemas ópticos separados, en la Figura 32 podemos observar la estructura de una red DWDM PON.

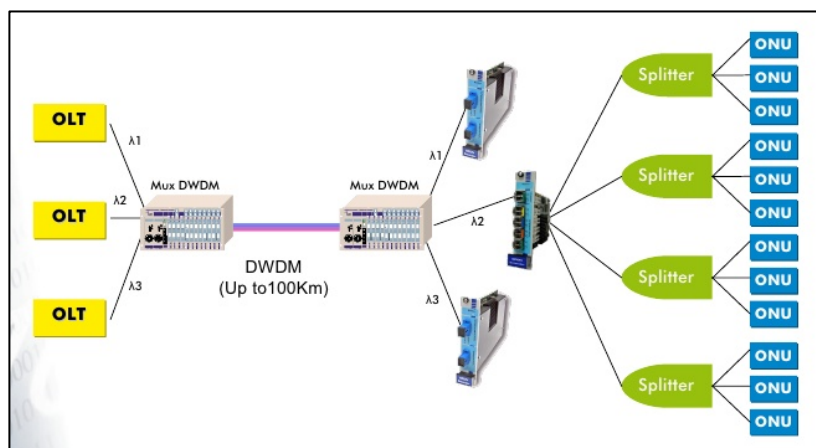


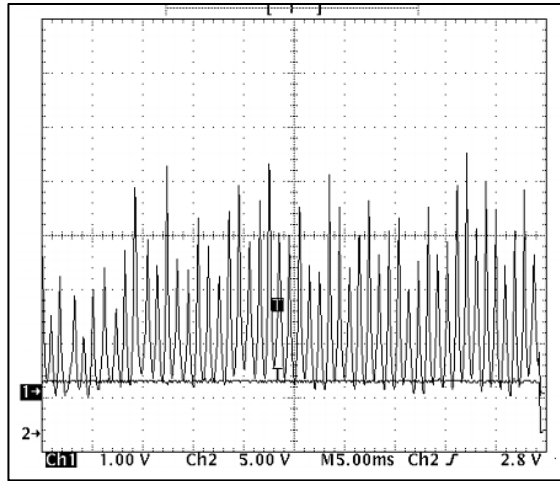
Figura 32. Distribución de una red UDWDM PON<sup>42</sup>.

<sup>42</sup>Figura 32. Distribución de una red UDWDM PON. Recuperado el 9 de enero de 2015 de: <http://image.slidesharecdn.com/gponextenderen-100208085038-phpapp02/95/gponextender-eng-10-728.jpg?cb=1265703326>

La gran flexibilidad que proporciona este tipo de red también involucra un coste de inversión mayor que puede llegar a duplicar el valor de inversión de una red GPON, esto debido a la necesidad de centrales de mayor tamaño, incorporación de repartidores ópticos, un aumento en la complejidad operativa, entre los principales factores. En las pruebas desarrolladas y aplicaciones realizadas se ha podido identificar que el uso de fibra de rejilla de Bragg (FBG) es la mejor opción para alcanzar mayores distancias de transmisión mientras se compensa la dispersión cromática, que es uno de los efectos influye en el tráfico de los enlaces de redes DWDM PON.

### **3.3.2. Redes UDWDM PON**

En lo que corresponde a una red UDWDM PON su estructura y diseño es similar al de una red DWDM PON ya descrita, la diferencia más relevante se realiza en la etapa de multiplexación donde se reduce el espaciado entre las longitudes de onda que en DWDM se encuentra en 100 GHz, y que para el presente proyecto se utilizará un espaciado de 10 GHz lo que permitirá aumentar considerablemente la capacidad del ancho de banda de la fibra óptica y a su vez de toda la red. En La Figura 33 podemos observar un ejemplo de un experimento donde se obtuvo el espectro de un red simulada en el cual se utilizó 60 canales con una separación de 2,5 GHz.



**Figura 33.** Espectro de una red UDWDM de 60 canales con una separación de 2,5GHz<sup>43</sup>.

Es importante considerar que la transmisión de datos en una red UDWDM PON se verá afectada por fenómenos no lineales que influirán principalmente en las longitudes de onda que viajan por el sistema óptico, y que aumentarán de forma progresiva mientras se extiende el enlace de transmisión, uno de los efectos que tiene mayor incidencia como ya se ha indicado en secciones anteriores es el efecto FWM, que dificulta el reconocimiento de las señales en su destino.

<sup>43</sup>Figura 33. Espectro de una red UDWDM de 60 canales con una separación de 2,5GHz. Recuperado el 9 de enero de 2015 de:URL: <http://photonics.pl/PLP/index.php/letters/article/viewFile/1-11/11>

## CAPÍTULO 4

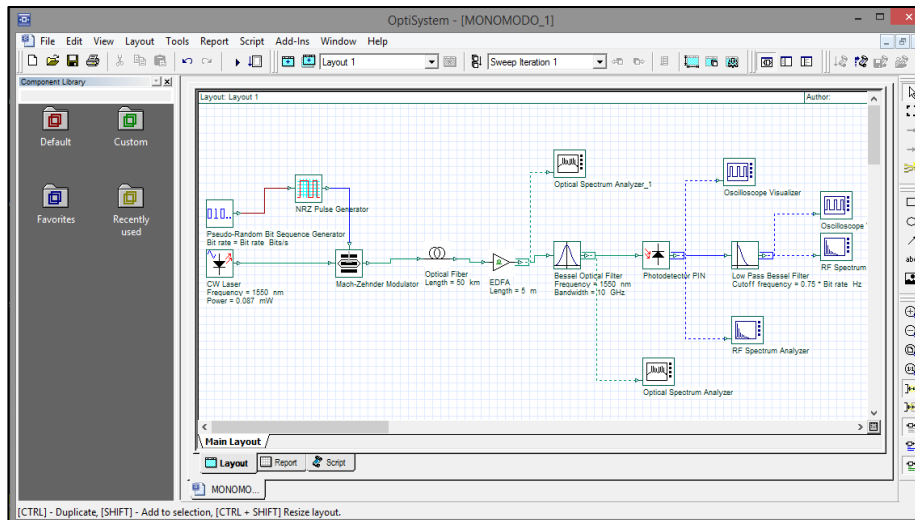
### 4. DISEÑO Y SIMULACIÓN DE RED UDWDM-PON

#### 4.1. OptiSystem y MatLab

##### 4.1.1. OptiSystem

OptiSystem es un programa de simulación que permite realizar diseños de redes de fibra óptica posibilitando configurar sus características esenciales, así como realizar diversos tipos de pruebas. Permite diseñar y crear diferentes tipos de arquitecturas con la implementación de diversos dispositivos disponibles en la librería, donde incluye una amplia biblioteca de componentes activos y pasivos que incorporan parámetros reales que son dependientes de la longitud de onda.

OptiSystem se presenta como una herramienta que contribuye al mejor diseño de enlaces de transmisiones ópticas, los resultados obtenidos tienen un gran porcentaje de aproximación a los resultados reales, esto permite realizar pruebas, análisis de calidad, detección de errores, experimentar con nuevas configuraciones a nuevas distancias, nuevas distribuciones e implementación de nuevos dispositivos. En la Figura 34 podemos observar el interfaz gráfico del software OptiSystem sus herramientas y su hoja de edición.



**Figura 34.** Interfaz gráfico del simulador OptiSystem.

Para el presente proyecto el software nos permitirá realizar el diseño y la simulación de una red PON, con la ayuda de las herramientas disponibles se realizará la configuración necesaria para que el sistema diseñado utilice una multiplexación UDWDM con una separación de canales de 10 GHz.

Las herramientas de análisis que incorpora el simulador nos permite visualizar los diversos tipos de diagramas, el Q-factor (factor de calidad), niveles de la señal, estados de polarización en puntos específicos, diagramas de constelación, BER, figura de ruido, generación de informes, entre sus principales herramientas. OptiSystem incluye aproximadamente unos 300 componentes personalizados con funciones avanzadas de visualización.

OptiSystem proporciona la capacidad de realizar un esquema virtual de cualquier tipo de enlace óptico en la capa física, además efectuar análisis de una gran número de redes de diferentes niveles de complejidad. Entre las principales aplicaciones de simulación y diseño de OptiSystem tenemos:

- Diseño de nueva generación de redes ópticas
- Diseño de arquitecturas y redes existentes
- Implementación de redes SONET/SDH de redes anillo.
- Implementación de nuevos dispositivos ópticos como amplificadores, receptores, transmisores, etc.
- Proyección de mapa de dispersión.
- Sistemas ópticos en el espacio libre (FSO).

Entre los softwares para simulación de redes ópticas existentes se seleccionó a OptiSystem sobre otros como OptiSim<sup>44</sup> por su precisión en la simulación de enlaces ópticos y su baja complejidad de manejo, destacando también la presencia de mayores parámetros de configuración para sistemas WDM. Además presenta otras grandes ventajas a la hora de trabajar con sistemas y enlaces ópticos, entre las principales tenemos:

- Permite evaluar la sensibilidad de los parámetros, para mantener las especificaciones de tolerancia de diseño.
- Presenta un acceso a las series de datos de caracterización del sistema.
- Realizar un barrido automático de los parámetros y de optimización.
- Permite estimar el BER.

#### **4.1.2. MatLab**

MatLab es un software matemático desarrollado para realizar cálculos técnicos avanzados, incorporara una interfaz gráfica de fácil uso y una compatibilidad con otros

---

<sup>44</sup> Synopsys, Inc. *OptSim*. Recuperado el 9 de enero de 2015 de:  
URL: <http://optics.synopsys.com/rsoft/rsoft-system-network-optsim.html>

programas matemáticos que le permiten ampliar sus funciones. Entre sus principales funcionalidades tenemos:

- Análisis matemático y desarrollo de cálculos matriciales.
- Análisis y procesamiento de señales.
- Elaboración de gráficas y diseño de aplicaciones con interfaz gráfica de usuario.
- Modelado y simulación de cálculos matemáticos.

Adicionalmente MatLab dispone de herramientas complementarias para el desarrollo de sus funciones, entre estas tenemos Simulink que es una plataforma incorporada en el software donde a través de un entorno de diagrama de bloques permite realizar simulación multidominio y diseños basados en modelos, otra herramienta integrada es GUIDE, que es un editor de interfaces de usuario que permite realizar un control más sencillo de las aplicaciones que han sido desarrolladas en MatLab sin la necesidad de escribir o modificar comandos. En la Figura 35 podemos observar un ejemplo de la simulación del comportamiento de señales digitales mediante MatLab donde se definen sus parámetros principales y visualizar las características fundamentales de su resultado.

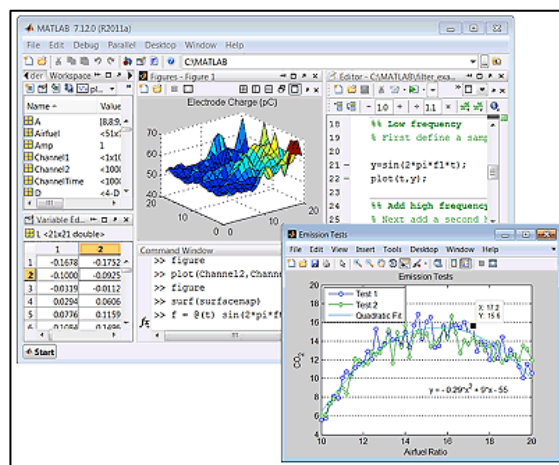


Figura 35. Simulación de señales mediante MatLab<sup>45</sup>.

<sup>45</sup>Figura 35. Simulación de señales mediante MatLab. Recuperado el 10 de enero de 2015 de: <http://www.multon.com.mx/micrositios/matlab/imagenes/matlab/img1.png>

MatLab es ampliamente utilizado en el ámbito de la investigación particularmente en las áreas de matemáticas e ingeniería, donde destacan el análisis y el desarrollo de nuevo productos tecnológicos. Una de las principales ventajas que presenta MatLab es la implementación de comandos de áreas que son llamados toolboxes, que ayudan a comprender y a aplicar los fundamentos matemáticos, se conforman de comandos de M que se extienden en todo el programa y son específicos para cada área, como por ejemplo los toolboxes para Procesamiento Digital de Señales.

Para el presente proyecto este software matemático será utilizado para realizar el análisis y procesamiento de señales digitales, estas señales serán extraídas del programa OptiSystem que permitirá realizar la simulación de una red UDWDM PON, estas señales serán capturadas en diferentes puntos de la red diseñada con el fin de identificar la aparición de efectos no lineales como el FWM, las señales serán analizadas detenidamente y procesadas para poder definir los mecanismos o factores necesarios para reducir su influencia en la transmisión de las señales a lo largo de la red hasta su destino.

#### **4.2. Diseño de la Red: Características y dimensionamiento de la red UDWDM PON**

Para la presente investigación se ha diseñado una red UDWDM que realizará la multiplexación de 16 canales con separaciones de 10 GHz y desarrollará su transmisión simultánea a través de una fibra monomodo de 20 Km.

#### **4.2.1. Transmisor Óptico**

El sistema óptico requiere de la transmisión simultánea y coordinada de 16 señales a través de un transmisor óptico, los parámetros establecidos para los transmisores a ser implementados son los siguientes:

- a. Frecuencia:** 190.1 THz
- b. Número de canales:** 16
- c. Espaciamiento de la frecuencia:** 10 GHz
- d. Modulación:** NRZ (Non Return to Zero)
- e. Bit Rate:** 10 Gbps
- f. Potencia de Transmisión:** 1dBm

Estos parámetros se consideran a partir del funcionamiento de redes DWDM, donde se realiza la implementación la tercera ventana para realizar las transmisiones (190.1 THz), un Bit Rate común en transmisiones de este tipo. Teniendo como característica principal la separación de 10 GHz dado que se requiere que la separación sea inferior a los 50GHz para que el sistema pueda ser considerado UDWDM, el resto de parámetros se los establece a partir de las transmisiones en enlaces ópticos existentes.

#### **4.2.2. Multiplexador Óptico**

Se implementará un multiplexador WDM que permite combinar simultáneamente las señales mediante una separación preestablecida que será de 10 GHz para proceder a su transmisión a través de una fibra monomodo.

El multiplexor debe garantizar la combinación de las 16 señales con la separación y frecuencias definidas para que las pruebas y resultados de la investigación se puedan analizar correctamente. De acuerdo a su funcionamiento el multiplexor tendrá 16 entradas y una sola salida que transportará toda la información de todas las señales.

### 4.2.3. Fibra Óptica

La red UDWDM PON recorrerá una extensión de 20 km con una tasa de transmisión de 10Gbps, se utilizará una fibra monomodo con los parámetros que de acuerdo a la investigación previa y a lo expuesto en capítulos anteriores sean óptimos para la transmisión de señales en este tipo de sistemas, entre las principales características que la fibra deberá cumplir tenemos:

- a. **Tipo:** Monomodo
- b. **Longitud:** 20 km
- c. **Atenuación:** 0.35 dB/km
- d. **PMD:** 0.2 ps/km
- e. **Coefficiente no lineal:**  $3 \times 10^{-20} m^2/W$

### 4.2.4. Demultiplexador Óptico

En el destino de la transmisión se utilizará un demultiplexador WDM que permitirá separar cada una de las 16 señales multiplexadas que llegan a través de la fibra óptica. El demultiplexor debe garantizar la extracción de las 16 señales en base de la separación y de frecuencia de transmisión.

### 4.2.5. Receptor Óptico

Finalmente se utilizará un receptor óptico para cada una de las señales multiplexadas el cual consiste en un dispositivo de foto detector y una etapa de amplificación electrónica con filtrado. En la salida de cada uno de los receptores ópticos se aplicará un analizador BER que contribuirá a determinar la calidad del sistema UDWDM PON.

### 4.3. Simulación de la red y Recolección de resultados

#### 4.3.1. Simulación Red UDWDM PON

Con el pre diseño de la red requerida se procedió a realizar su configuración utilizando el software OptiSystem, su composición se realizó de forma progresiva partiendo de los elementos de transmisión, luego su medio de enlace para finalmente concluir con su recepción, a continuación se describe su desarrollo.

##### a. Configuración General

Previo a iniciar con la simulación de la red, se configuró el software OptiSystem para que los diseños realizados funcionen con una velocidad de transmisión de datos de 10 Gbps, además de otros parámetros fundamentales, esto se realizó a través de la opción “Layout Parameters” en la ventana principal del software como se puede observar en la Figura 36.

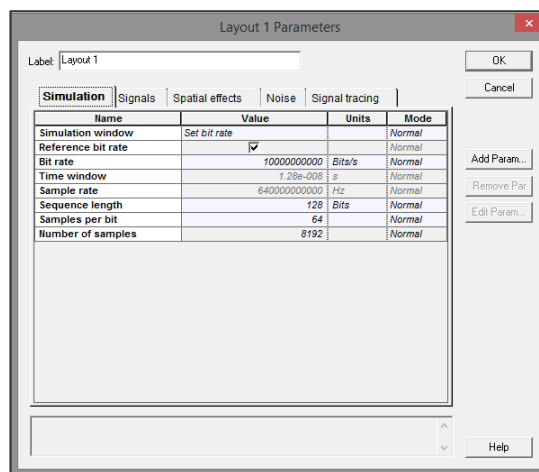


Figura 36. Configuración de “Layout Parameters”.

## b. Transmisor

Se implementó un Transmisor óptico llamado “WDM Transmitter” que se encuentra en la librería del software (Default/Transmitters Library/ Optical Transmitters/), una vez agregado en el Main Layout (Pantalla de Diseño), se procedió a realizar las configuraciones necesarias para el funcionamiento de la red de acuerdo a su diseño (Figura 37).

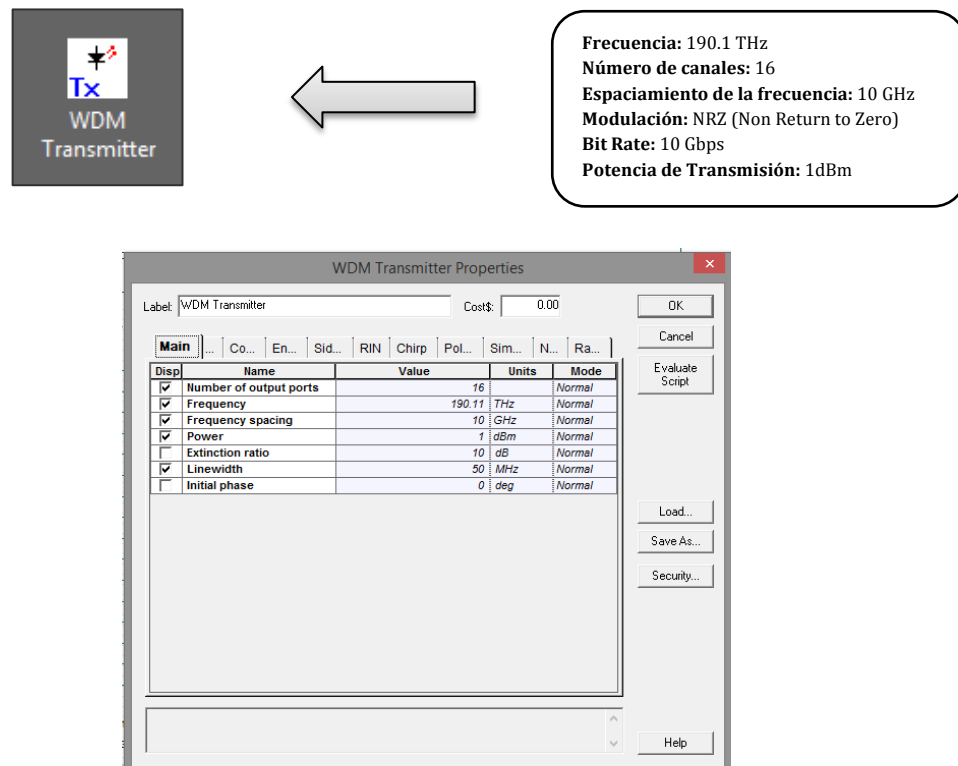
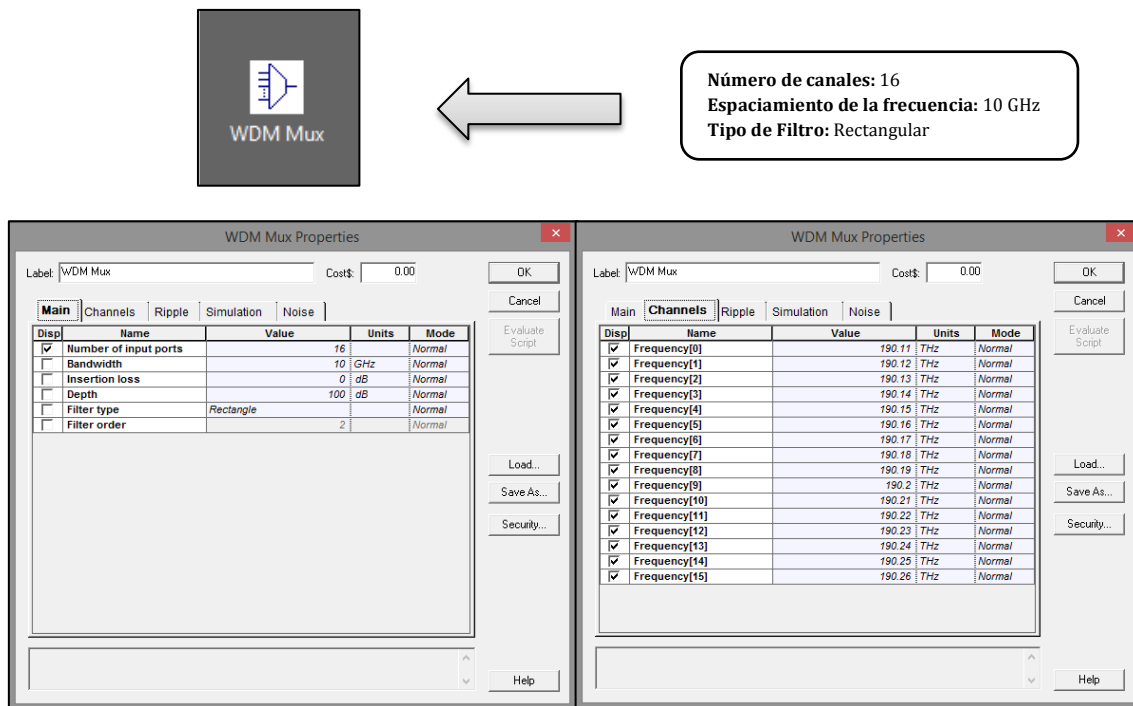


Figura 37. Configuración del Transmisor WDM.

## b. Multiplexor

Para la combinación de las 16 señales generadas por el transmisor óptico se utilizó un multiplexador WDM “WDM Mux” (Default/WDM Multiplexers Library/Multiplexers/), el cual acoplará las señales para su transmisión sobre una sola

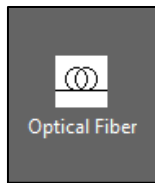
fibra óptica mediante portadoras ópticas de diferente longitud de onda con una separación de 10 Ghz (Figura 38).



**Figura 38.** Configuración del Multiplexor WDM.

### c. Medio de transmisión

Se implementó una fibra óptica monomodo “Optical Fiber” (Default/Optical Fibers Library/) como medio de transmisión que servirá para transportar la información a una distancia de 20 km, este dispositivo constituye un elemento fundamental en la presente investigación debido a que en sus características se configura el índice de refracción no lineal, un parámetro que normaliza la aparición de los efectos no lineales en los sistemas no lineales, esta característica contribuyó a determinar sus niveles de incidencia (Figura 39).



**Tipo:** Monomodo  
**Longitud:** 20km  
**Atenuación:** 0.35dB/km  
**PMD:** 0.2 ps/km  
**Coefficiente no lineal:**  $3 \times 10^{-20} m^2/W$

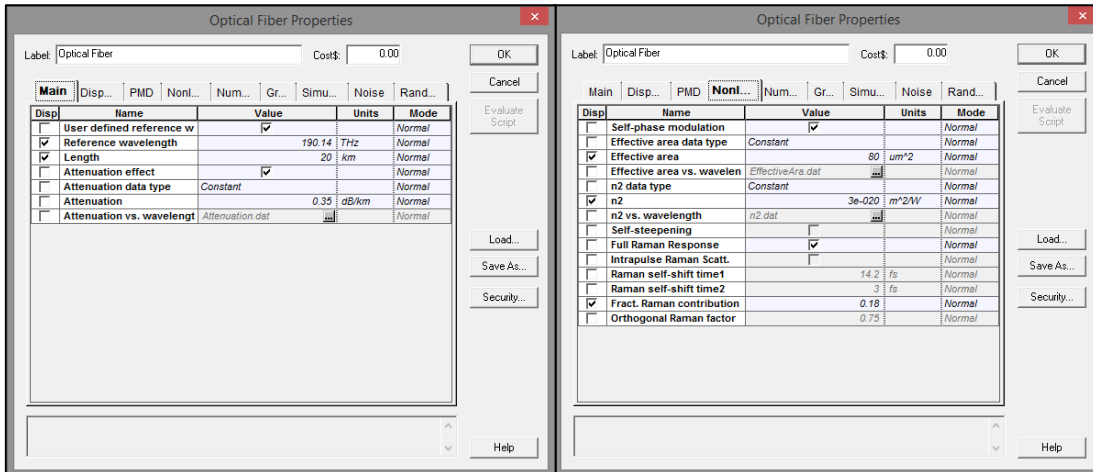


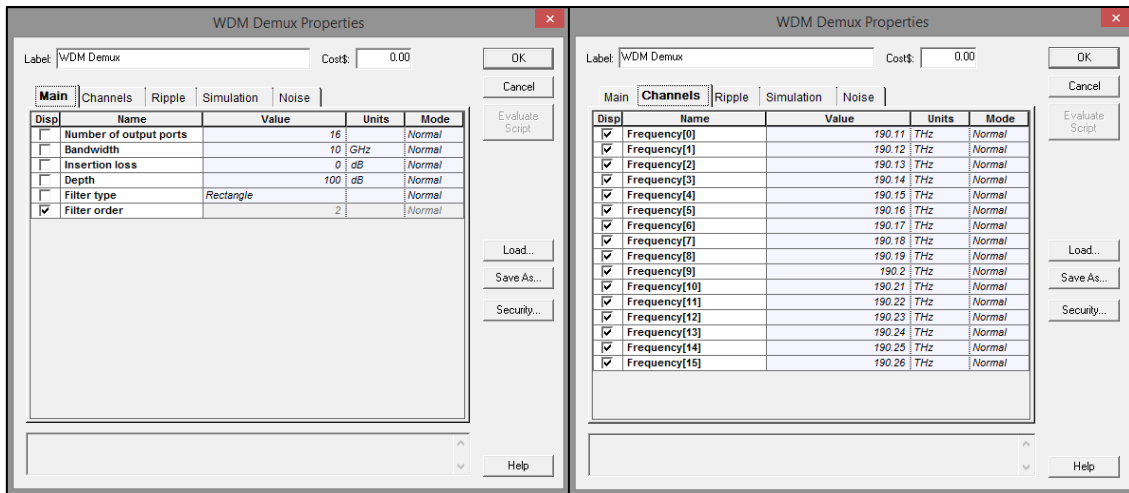
Figura 39. Configuración del transmisor WDM.

#### d. Demultiplexor

En la sección de recepción se utilizó un demultiplexor WDM “Demux WDM” (Default/Receivers Library/Optical Receivers/), que realizó la tarea de separar las señales multiplexadas que llegan a través de la fibra óptica (Figura 40).



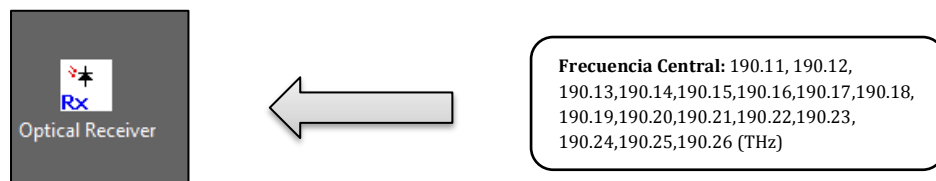
**Número de canales:** 16  
**Espaciamiento de la frecuencia:** 10 GHz  
**Tipo de Filtro:** Rectangular



**Figura 40.** Configuración del Demultiplexor WDM.

### e. Receptor

En la sección final del sistema se utilizaron 16 receptores ópticos “Optical Receiver” (Default/WDM Multiplexers Library/Demultiplexers/) uno para cada una de las señales que salen del demultiplexor, cada dispositivo realizó la función de convertir la señal óptica en eléctrica, funcionando como transductores óptico-eléctrico. Para verificar el funcionamiento y los resultados en la recepción de cada una de las señales se implementó un analizador de BER (Figura 41).



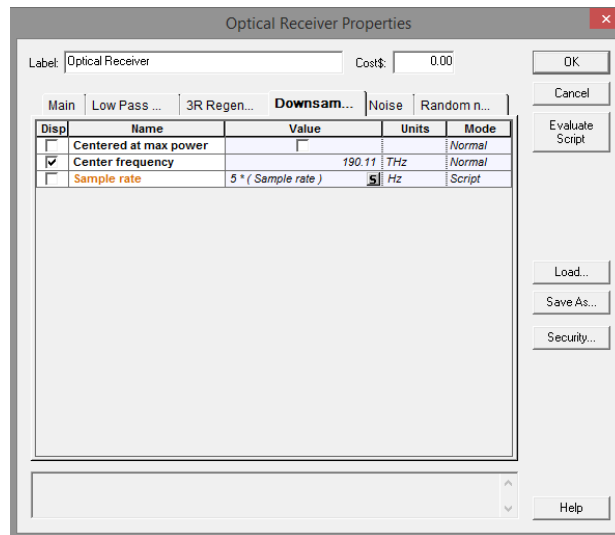


Figura 41. Configuración del transmisor WDM.

Una vez configurado el sistema se procedió a realizar diversos tipos de pruebas para identificar los factores que inciden en la transmisión de datos a través de canales con una separación de 10 GHz. En la Figura 42 se puede visualizar el diseño final de la red UDWDM.

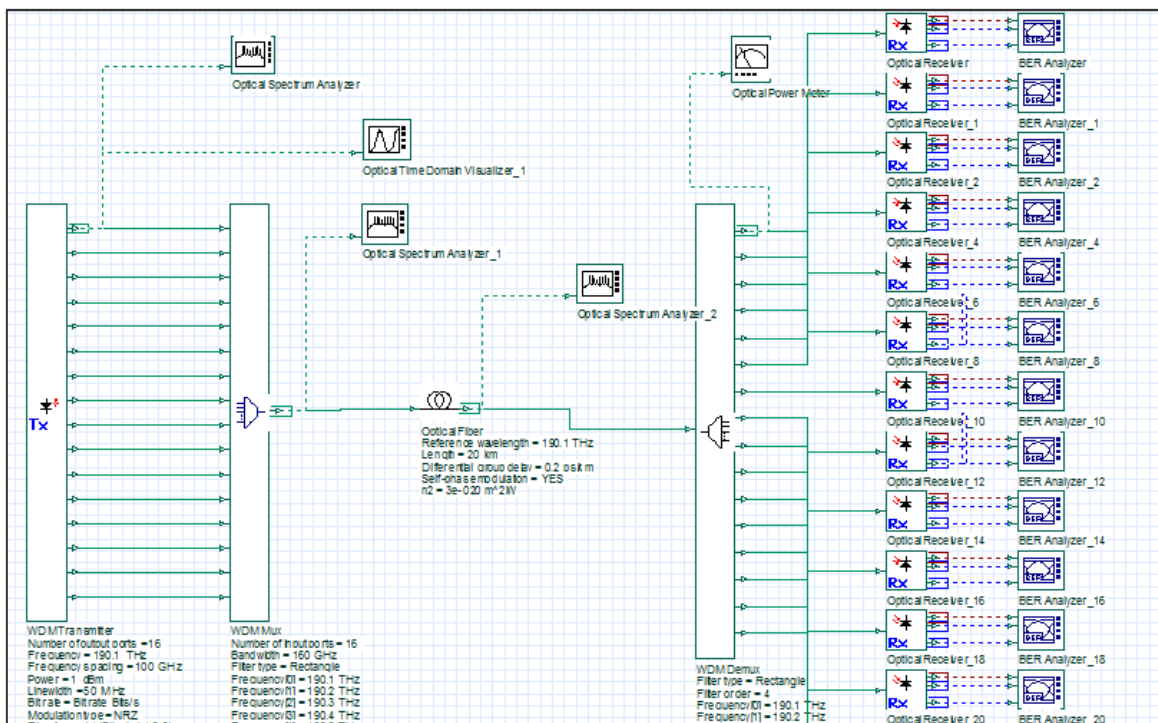


Figura 42. Red UDWDM PON simulada en OptiSystem.

### **4.3.2. Recolección de Resultados**

Con la simulación de la red UDWDM PON se procedió a recolectar sus datos e información de la calidad de la transmisión, posterior a esta simulación se configura la red para que funcione como un sistema DWDM PON solo realizando la variación de la separación de las señales multiplexadas que paso de ser 10 GHz a 100 GHz esto permitió visualizar como el espaciamiento de las señales influye en la calidad del sistema, y el nivel de incidencia de los efectos no lineales en los dos sistemas.

#### **4.3.2.1. Simulación de Red UDWDM PON**

##### **4.3.2.1.1 Incidencia de efectos no lineales**

Para verificar el nivel de incidencia de los efectos no lineales que existe en una red UDWDM PON, se procedió a simular dos escenarios, en el primero se consideró una transmisión con un coeficiente de refracción no lineal de cero, y para el segundo se modificó el coeficiente otorgándole un valor de  $3 \times 10^{-20} m^2/W$  común en las fibras monomodo. Se recolecto los valores del analizador de BER variando la potencia de recepción de forma degenerativa para los dos escenarios, en la Tabla 5 se pueden observar los resultados obtenidos.

**Tabla 5.** Valores de BER en una red UDWDM a partir de su potencia de recepción y su índice de refracción no lineal.

UDWDM (n2=0)		UDWDM (n2= $3 \times 10^{-20} m^2/W$ )	
POrx (dBm)	BER	POrx (dBm)	BER
-10	5.72e-10	-10	2.78e-8
-11	6.34e-10	-11	2.93e-8
-12	7.48e-10	-12	3.21e-8
-13	9.70e-10	-13	3.73e-8
-14	1.46e-9	-14	4.77e-8
-15	2.70e-9	-15	7.03e-8
-16	6.63e-9	-16	1.27e-7
-17	2.33e-8	-17	2.98e-7
-18	1.21e-7	-18	9.57e-7
-19	9.06e-7	-19	4.19e-6
-20	8.48e-6	-20	2.35e-5
-21	8.13e-5	-21	1.48e-4
-22	6.42e-4	-22	8.70e-4
-23	3.64e-3	-23	4.14e-3
-24	1.41e-2	-24	1.47e-2
-25	1	-25	1
-26	1	-26	1

#### 4.3.2.1.2 Identificación del efecto FWM

La identificación del factor no lineal es una de los objetivos de esta investigación, para esto en el diseño de la red UDWDM PON se diseñó dos tipos de transmisión, el primero se realizó la transmisión de datos sin considerar ningún parámetro que pueda contribuir a la reducción de la incidencia no lineal, a esta configuración se le dio de sistema estándar, destacando por ejemplo es uso de filtro tipo Bessel de Orden 2 tanto en el multiplexor como el demultiplexor, parámetros de un tipo de fibra óptica monomodo singular, y una elevada potencia de transmisión que de acuerdo a la información es proporcional a nivel de incidencia de los factores no lineales en la transmisión. Se utilizó un analizador óptico de espectro a la salida del multiplexor y de la fibra óptica

para poder comparar los efectos en las señales multiplexadas, se obtuvieron los siguientes resultados:

a. Espectro Óptico a la salida del Multiplexor (Sistema Estándar):

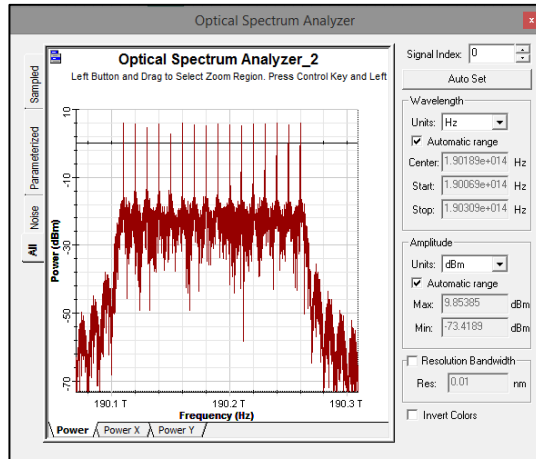


Figura 43. Analizador del espectro óptico a la salida del multiplexor en la simulación del sistema estándar.

b. Espectro Óptico a la salida de la Fibra Óptica (Sistema Estándar):

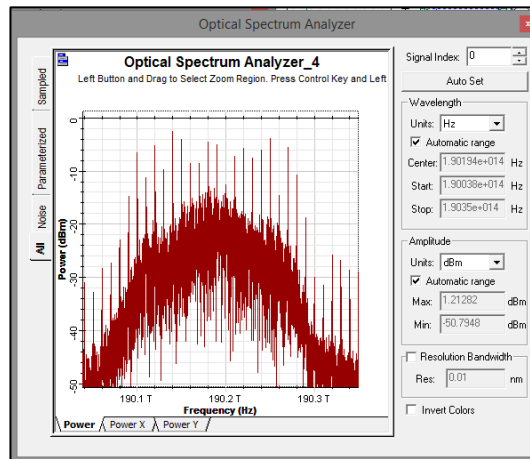


Figura 44. Analizador del espectro óptico a la salida de la fibra óptica en la simulación del sistema estándar.

Para el segundo modelo de transmisión se optimizó la configuración de los dispositivos que integran el sistema, se procedió a disminuir la potencia de transmisión, además se modificó los parámetros de la fibra para que funcione como una fibra monomodo

NZDSF y se cambió el tipo filtro en el multiplexor y demultiplexor por un filtro rectangular que de acuerdo a sus características tiene un mejor funcionamiento en los sistemas de guías de onda, estos parámetros fueron determinados en base a la investigación que indica que estos factores inciden directamente en el crecimiento de los efectos no lineales, a este sistema se le dio el nombre de sistema optimizado. Se obtuvieron los siguientes resultados:

c. Espectro Óptico a la salida del Multiplexor (Sistema Optimizado):

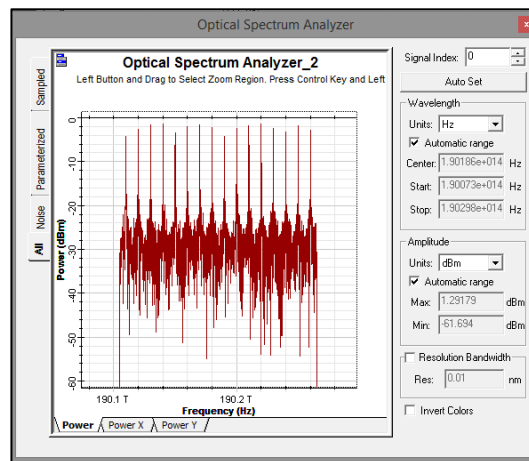


Figura 45. Analizador del espectro óptico a la salida del multiplexor en la simulación del sistema optimizado.

d. Espectro Óptico a la salida de la Fibra Óptica (Sistema Optimizado):

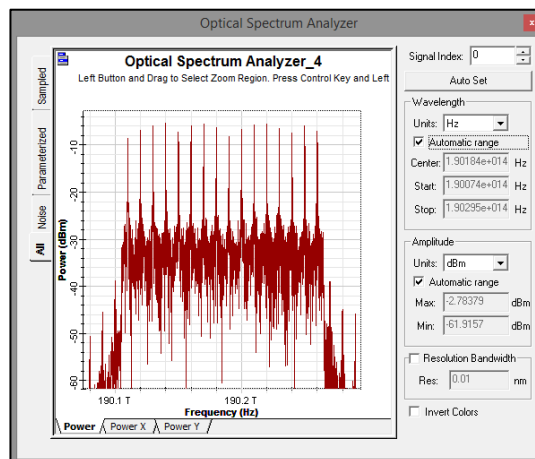


Figura 46. Analizador del espectro óptico a la salida de la fibra óptica en la simulación del sistema optimizado.

A partir de los modelos de simulación se procedió a extraer el espectro óptico resultante en una de las salidas del multiplexor para analizar de forma individual cada una de las señales recibidas, se alcanzaron los siguientes resultados:

e. Espectro Óptico de una de las salidas del Demultiplexor (Sistema Estándar):

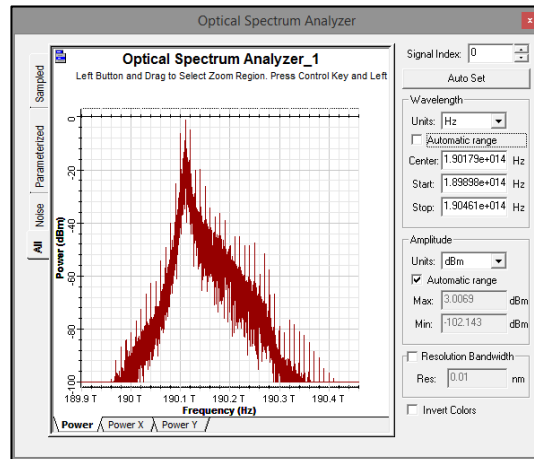


Figura 47. Analizador del espectro óptico en una de las salidas del multiplexor en la simulación del sistema estándar.

f. Espectro Óptico de una de las salidas del Demultiplexor (Sistema Optimizado):

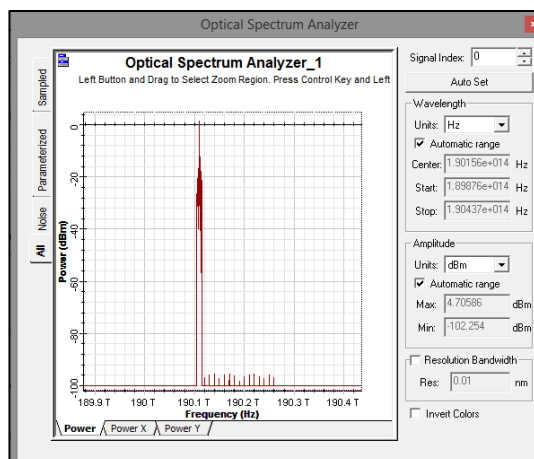


Figura 48. Analizador del espectro óptico en una de las salidas del multiplexor en la simulación del sistema optimizado.

#### 4.1.1.2 Simulación de Red DWDM PON

##### 4.3.2.2.1 Incidencia de efectos no lineales

La simulación de la Red DWDM PON se desarrollo para poder realizar una comparación más efectiva de la incidencia de los factores no lineales al disminuir el espaciamiento entre las señales multiplexadas, de esta forma estos datos permiten identificar la diferencia de la calidad del enlace en un sistema UDWDM PON con separaciones de 10 GHz y un sistema DWDM con separaciones de 100 GHz, en la red simulada se procedió únicamente a variar estos parámetros para una comparación más eficaz de los resultados, obteniéndose los siguientes datos:

**Tabla 6.** Valores de BER en una red UDWDM a partir de su potencia de recepción y su índice de refracción no lineal.

DWDM ( $n_2=0$ )		DWDM ( $n_2=3 \times 10^{-20} m^2/W$ )	
PORx (dBm)	BER	PORx (dBm)	BER
-10	2.83e-77	-10	3.25e-70
-11	1.14e-72	-11	2.72e-66
-12	9.69e-77	-12	3.21e-61
-13	1.49e-59	-13	5.23e-55
-14	2.21e-51	-14	7.56e-48
-15	1.08e-42	-15	3.89e-40
-16	3.91e-34	-16	2.09e-32
-17	2.54e-26	-17	3.15e-25
-18	1.07e-19	-18	4.86e-19
-19	1.95e-14	-19	4.66e-14
-20	1.75e-10	-20	2.88e-10
-21	1.28e-7	-21	1.67e-7
-22	1.34e-5	-22	1.54e-5
-23	3.34e-4	-23	3.57e-4
-24	3.04e-3	-24	3.13e-3
-25	1	-25	1
-26	1	-26	1

## **4.4. Análisis de Resultados**

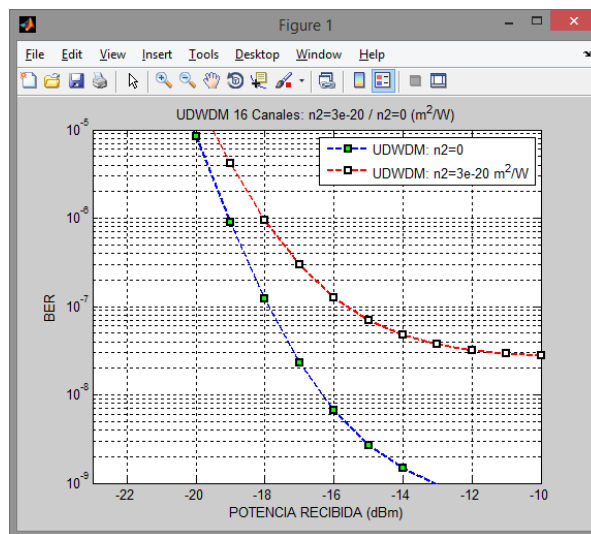
### **4.4.1. Red UDWDM PON**

Para proceder a analizar los datos obtenidos en la simulación se utilizó el software MatLab permitiendo graficar y comparar los puntos de los dos sistemas, el uno con incidencia de efectos no lineales y el segundo con un coeficiente de refracción no lineal cero.

Como podemos observar en la Figura 49 y en base a los datos expuestos en la Tabla 5, los valores del BER del sistema con coeficiente de refracción no lineal nulo tienen una mejor respuesta al presentarse bajas potencias de recepción, obteniendo valores óptimos para la transmisión incluso a potencias reducidas, por otro lado, los valores obtenidos en el sistema con coeficiente de refracción no lineal presentan un respuesta de BER que en la potencia de recepción inicial de 10 dBm ya se encuentra al límite para poder reconocer los datos transmitidos en el sistema. Es importante identificar que en ambos casos la disminución del BER se da aceleradamente, esto se debe a la reducida separación de las señales multiplexadas (10 GHz) y transportadas a través de la fibra óptica (20 km).

Existen dos parámetros importantes que se deben considerar a partir de los resultados y las pruebas realizadas en el simulador, para mejorar el BER en la recepción y disminuir la incidencia de efectos no lineales se puede realizar una transmisión con una baja potencia, como se ha indicado en la investigación la incidencia de los factores no lineales es proporcional a la potencia de transmisión, al llegar a su destino y previo a su demultiplexación a la señal multiplexada se le puede aplicar un amplificador óptico,

estas dos variables pueden mejorar considerablemente el BER de las señales en la recepción. Por otro lado también se puede considerar reducir la velocidad de transmisión lo que presenta una elevada contribución al sistema debido a que las señales que se encuentran separadas por estrechas frecuencias como en la simulación realizada, no incidan entre sí al transportarse a través de la fibra óptica.

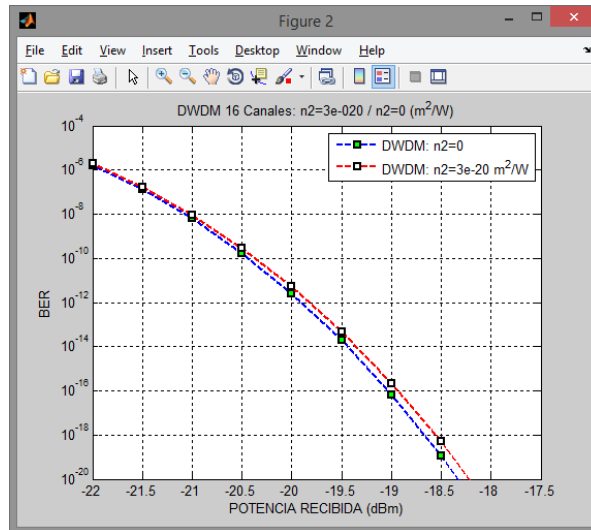


**Figura 49.** Gráfica de los porcentajes de BER en la recepción vs Potencia Recibida en el sistema UDWDM-PON.

#### 4.4.2. Red DWDM PON

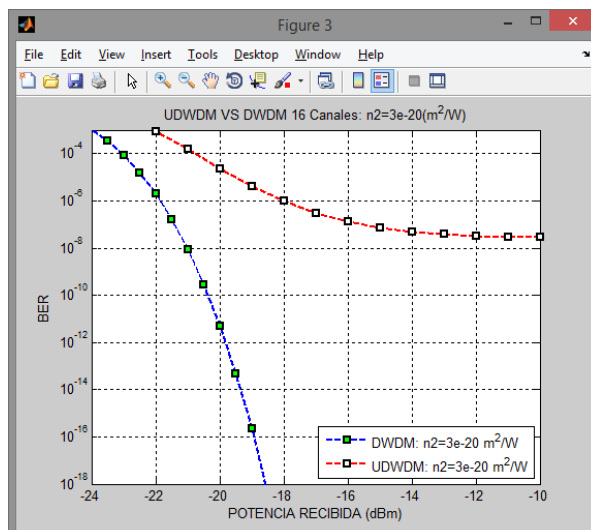
En base a los datos obtenidos en la simulación del sistema DWDM (Tabla 6), donde se consideró de forma similar a UDWDM, una transmisión que considera el índice de refracción no lineal versus otra transmisión donde se establece un índice de refracción cero, estableciendo como única diferencia la separación entre las señales multiplexadas pasando de 10 GHz a 100 GHz. La gráfica desarrollada que se puede visualizar en la Figura 50, permite determinar los excelentes valores de BER que se tiene en la recepción, estos valores son óptimos para realizar una transmisión. Se puede observar además que la incidencia de los efectos no lineales provocan una mínima alteración en

los datos transmitidos, donde el sistema con el índice de refracción no lineal también presenta valores óptimos de BER muy similares al sistema con un índice de refracción no lineal nulo. Otro parámetro importante es la menor degradación que sufre el BER al disminuir progresivamente los niveles de potencia en la recepción.



**Figura 50.** Gráfica de los porcentajes de BER en la recepción vs Potencia Recibida en el sistema DWDM-PON.

Al realizar la comparación de los datos obtenidos en los sistemas UDWDM y DWDM que aplican el índice de refracción no lineal, en la Figura 51 se encuentran graficados estos datos donde se puede identificar la gran diferencia que existe en los valores del BER en los dos sistemas, esta desigualdad que existe en los sistemas nos permite reconocer el alto grado degenerativo que provoca la aparición de los efectos no lineales en los sistemas UDWDM.



**Figura 51.** Gráfica comparativa de los valores de BER obtenidos en la simulación de los sistemas DWDM-PON y UDWDM PON.

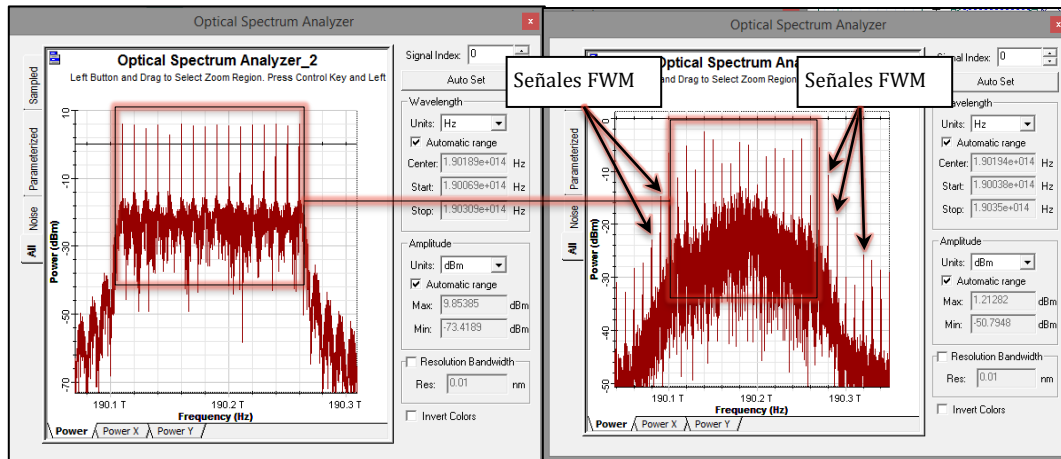
A partir de estos resultados se puede deducir que la incidencia de los factores no lineales en una transmisión por fibra óptica es inversamente proporcional a la separación que existe entre las señales multiplexadas.

#### 4.5. Caracterización de los efectos de FWM en la red UDWDM simulada en base a los resultados obtenidos

Con la ayuda de las simulaciones y herramientas del software OptiSystem, se ha obtenido las gráficas del espectro óptico de las señales en el sistema UDWDM PON, esto nos ha permitido determinar la aparición de los efectos FWM a lo largo de la transmisión.

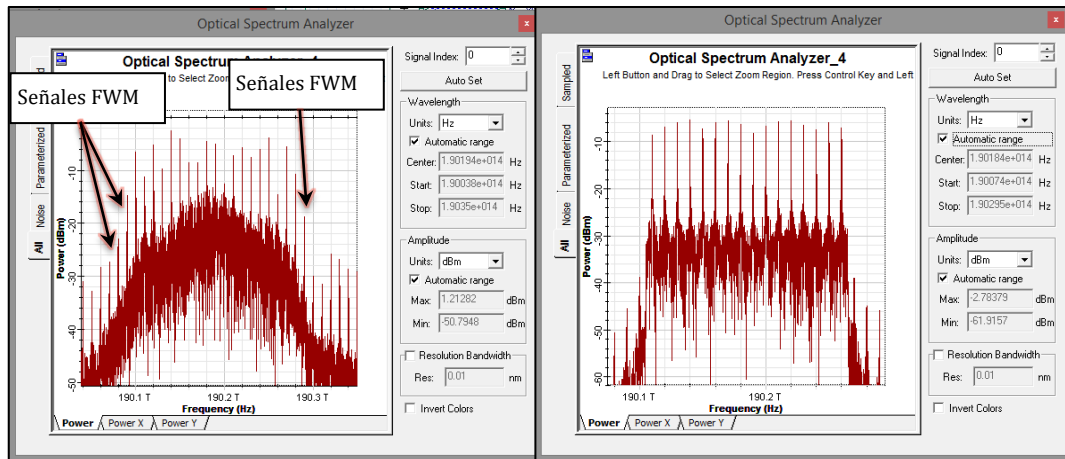
En la transmisión de la red estándar, se visualizó la aparición de las señales FWM en la salida de la fibra óptica, como se puede observar las señales se ven gravemente afectadas debido a los factores no lineales, primeramente degradando considerablemente cada una de las señales multiplexadas, y además generando señales

paralelas por el efecto FWM las cuales en ocasiones superan los valores de potencia de las señales originales, lo que provoca graves errores en la recepción e identificación de los datos.



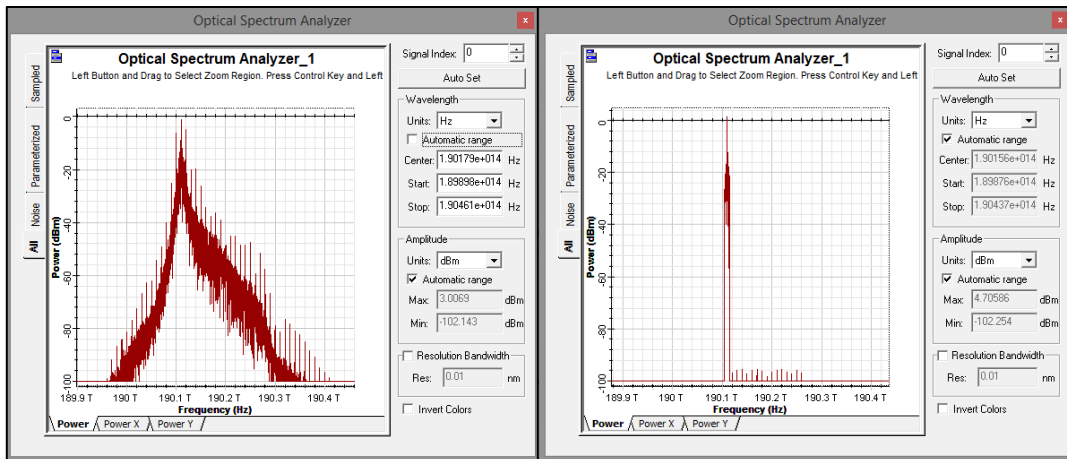
**Figura 52.** Comparación de espectros ópticos en una red UDWDM estándar. Izq. Espectro Óptico a la salida del multiplexor, Der. Espectro óptico a la salida de la fibra óptica.

Para mejorar la respuesta del sistema a los efectos no lineales, se procedió a realizar la optimización del sistema, alcanzando resultados muy favorables, como se puede observar en el espectro óptico de la Figura 53 (derecha) no existen señales de FWM con potencias considerables que puedan llegar a distorsionar la transmisión de la información, a diferencia del espectro óptico del sistema estándar (izquierda). Las pruebas y la investigación previa permitieron identificar los parámetros que contribuirían a mejorar la transmisión de la señal, entre los que destacan, disminuir la potencia de transmisión, modificar los parámetros de la fibra para que funcione como una fibra monomodo NZDS y cambiar los filtros tanto en el multiplexor y demultiplexor por un filtro rectangular que de acuerdo a sus características tiene un mejor funcionamiento en los sistemas de guías de onda.



**Figura 53.** Comparación de espectros ópticos en la salida de la fibra óptica de una red UDWDM-PON. Izq. Sistema estándar, Der. Sistema Optimizado.

A continuación en la Figura 54 se puede visualizar la diferencia que existe en los espectros ópticos en una de las salidas del multiplexor, en la primera imagen (izquierda) se puede observar el espectro óptico de una de las señales del sistema estándar, se puede reconocer con facilidad las señales FWM que han sido generadas debido a la aparición de efectos no lineales a lo largo del enlace, estas señales presentan potencias de recepción muy similares a la de la señal original, lo cual provoca errores al momento de la recepción de los datos, dificultando el reconocimiento de la información original. En la siguiente imagen (derecha) podemos visualizar el espectro óptico de la misma señal en el sistema optimizado, la aparición de señales FWM es nula y se ha mejorado la potencia de recepción al utilizar una etapa de amplificación previo a su demultiplexación, esto permite un funcionamiento óptimo de la red UDWDM PON y se ha podido verificar que la optimización de los parámetros descritos contribuyen a una mejor calidad en las transmisiones de este tipo de redes.



**Figura 54.** Comparación de espectros ópticos en una de las salidas del demultiplexor de una red UDWDM-PON. Izq. Sistema estándar, Der. Sistema Optimizado.

## CAPÍTULO 5

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

En lo que corresponde al objetivo 1 **“Estudiar el desarrollo que han tenido los sistemas de multiplexación en longitud de onda”**, una vez finalizado el presente proyecto de investigación se puede concluir que el gran avance presentado por los sistemas WDM ha contribuido a solucionar los grandes problemas de crecimiento de tráfico que actualmente atraviesan las redes de comunicaciones ópticas, principalmente permitiendo optimizar el ancho de banda disponible de las redes que actualmente se encuentran desplegadas alrededor del mundo, además el desarrollo y la evolución de este tipo de redes como por ejemplo DWDM y UDWDM permiten la reutilización de los actuales tendidos de fibra óptica para la creciente y futuras demandas de transmisión de datos así como la incorporación de nuevos servicios.

Concerniente al segundo objetivo **“Estudiar y describir los efectos no lineales producidos en un medio de transmisión óptico”**, se logró definir los principales factores que influyen en la aparición de los efectos no lineales en un enlace óptico, concluyendo que entre los parámetros que inciden en la degradación y deterioro de las señales transmitidas por la acción de los efectos no lineales destaca que estos tienden a ser proporcionales a la reducción del espaciamiento de las señales multiplexadas y al aumento tanto de la potencia de transmisión como de la tasa de transmisión de datos,

conocimientos que contribuyeron al correcto diseño, simulación y optimización de la red UDWDM PON.

El tercer objetivo **“Investigar y presentar los aspectos relevantes del sistema UDWDM, su funcionamiento y principales aplicaciones”** se realizó de forma satisfactoria. El desarrollo de este objetivo nos lleva a la conclusión de que la información adquirida sobre el funcionamiento de los sistemas UDWDM es de gran relevancia e importancia, por esta razón se realizó un análisis completo previo a la redacción de estos conocimientos en el presente documento, información que a su vez contribuyó a la realización de los demás objetivos, aportando a un correcto diseño y simulación de la red UDWDM. Con respecto a la aplicación de esta tecnología se concluye que es necesaria la optimización de las redes ópticas existentes donde se puede alcanzar una considerable ampliación de la capacidad del ancho de banda, mejorando la calidad de los servicios como video en tiempo real, telemedicina, videoconferencias, etc. y además otorgar la capacidad de desarrollar nuevos servicios y aplicaciones.

Con los conocimientos adquiridos y el uso del simulador OptiSystem se alcanzó el cuarto objetivo **“Diseñar y simular un sistema de comunicaciones ópticas UDWDM PON mediante OptiSystem”**. Se concluye que la consideración de cada uno de los parámetros que definen a una red UDWDM PON contribuyó a la correcta recolección de la información a partir de la simulación de la red, estableciendo nuevas configuraciones del sistema que permiten disminuir la incidencia de los factores no lineales en la transmisión de datos.

El objetivo “**Analizar los efectos no lineales en una red UDWDM PON mediante OptiSystem y Matlab**”, se cumplió a satisfacción en la sección “Análisis de Resultados”, a partir del estudio de estos resultados se concluye que al identificar y verificar cuales son los factores que influyen en la aparición de los efectos no lineales en una red UDWDM PON se consiguió establecer y definir las mejoras necesarias del sistema para poder disminuir la incidencia de estos factores y realizar una transmisión de datos de calidad, entre estos mecanismos de optimización implementados se destaca la reducción de la potencia de transmisión, debido a la proporcionalidad que existe con el aumento de la incidencia de los efectos no lineales en la transmisión teniendo la posibilidad de implementar amplificadores EDFA para mejorar la distancia de los enlaces, la implementación de filtros rectangulares en el demultiplexor caracterizados por tener un mejor funcionamiento en los sistemas de guías de onda mejorando considerablemente el espectro de las señales resultantes, además la configuración de los parámetros de la fibra óptica con características NZDZF que contribuye a prevenir efectos dispersivos y reducir efectos no lineales, factores que en conjunto permiten alcanzar una gran mejora en la calidad de las señales transmitidas en el sistema.

La simulación de la red UDWDM PON y el análisis de los resultados permitió alcanzar el último objetivo: “**Caracterizar el comportamiento de una red UDWDM PON al respecto de los efectos no lineales en transmisiones de datos particularmente el efecto FWM**”, a partir de la caracterización se concluye que el comportamiento de los efectos no lineales es dependiente de la potencia de transmisión, determinándose que para mejorar el sistema y reducir los efectos identificados se debe utilizar una baja potencia de transmisión. En lo que respecta el espaciamiento de las señales su incidencia de los efectos no lineales es inversamente proporcional al incremento de la

separación de las señales multiplexadas, es decir, mientras mayor sea la separación entre los canales menor será la degradación producida por los efectos no lineales. Por otro lado la distancia que recorre la fibra óptica al aumentar su valor incrementa la atenuación de la señal debido a la intensificación de los efectos no lineales, de esta forma para poder realizar transmisiones de largas distancias con la tecnología UDWDM PON se debe implementar los lineamientos establecidos y como condición opcional se puede realizar la reducción de la tasa de transmisión permitiendo alcanzar una mejora considerable del sistema.

## 5.2. RECOMENDACIONES

El desarrollo de las tecnologías UDWDM tiene un alto nivel de importancia debido a su capacidad de poder satisfacer la demanda de tráfico existente y futura, la misma que crece exponencialmente, por este motivo se debe continuar con la investigación y experimentación de este tipo de redes en diversos escenarios, con el fin de no solo realizar el incremento de la capacidad del ancho de banda para cubrir con los requerimientos presentes sino de permitir el desarrollo de nuevos servicios y aplicaciones más avanzadas.

Se debe establecer correctamente los parámetros que inciden en la calidad de la transmisión de datos, considerando cada uno de los aspectos básicos como el espectro de la señal, la potencia de recepción, las tasas de transmisión, la atenuación total del sistema, el tipo de modulación y el tipo de multiplexación, entre otros, lo que permitirá evitar errores al realizar el diseño, dimensionamiento de una red y realizar una simulación más acorde a la realidad.

Al desarrollar la simulación de una red óptica en un software, es importante primeramente verificar la realidad de los resultados, esto evitará errores al momento de realizar un análisis del funcionamiento de la red, se debe utilizar simuladores conocidos y verificados como el que se implementó en la presente investigación (OptiSystem), otro ejemplo sería el software OptSim, esto permite a su vez encontrar más fácilmente tutorías especializadas sobre su manejo.

Es recomendable continuar con la siguiente etapa de este proyecto de investigación, que viene a ser su implementación con dispositivos reales, esto permitirá corroborar completamente los resultados obtenidos y a su vez identificar si existen diferencias, además de delimitar de forma real los alcances de estos sistemas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad de Málaga. “*La Fibra Óptica*”. Recuperado el 12 de noviembre de 2014 de: <http://neo.lcc.uma.es/evirtual/cdd/tutorial/fisico/fibra.html>
- [2] Escuela de Sistemas, Universidad del Azuay. “*Fibra Óptica*”. Recuperado el 12 de noviembre de 2014 de:  
[http://www.uazuay.edu.ec/estudios/sistemas/teleproceso/apuntes\\_1/optica.htm](http://www.uazuay.edu.ec/estudios/sistemas/teleproceso/apuntes_1/optica.htm)
- [3] YRODRIGUEZ. “*Fibra Óptica*”. Recuperado el 12 de noviembre de 2014 de:  
<http://www.monografias.com/trabajos13/fibropt/fibropt.shtml#ixzz3KVKNwPIW>
- [4] GARCIA, Adolfo. “Comunicaciones Por Fibra Óptica”. Recuperado el 13 de noviembre de 2014 de: [http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user\\_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf](http://www.telnet-ri.es/fileadmin/user_upload/preventa/presentaciones/Comunicaciones%20por%20Fibra%20%D3ptica.pdf)
- [5] Universidad de Valencia. “*Tutorial de Comunicaciones Ópticas*”. Recuperado el 13 de noviembre de 2014 de:  
[http://nemesi.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2\\_1\\_1.htm](http://nemesi.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema2/tema2_1_1.htm)
- [6] Instituto Universitario de Microelectrónica, Universidad de las Palmas de Gran Canaria. “*Características de transmisión de fibras ópticas*”. Recuperado el 15 de noviembre de 2014 de:  
[http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/Com\\_Opt\\_I/download/Com\\_Opt\\_I/Temario/caracteristicas.pdf](http://www.iuma.ulpgc.es/~jrsendra/Docencia/Com_Opt_I/download/Com_Opt_I/Temario/caracteristicas.pdf)
- [7] Textos Científicos. “*Propiedades de Transmisión de la Fibra Óptica*”. Recuperado el 15 de noviembre de 2014 de:  
<http://www.textoscientificos.com/redes/fibraoptica/propiedades-tranmision>

[8] Universidad de Valencia. “*Tutorial de Comunicaciones Ópticas*”. Recuperado el 17 de noviembre de 2014 de:

[http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1\\_5\\_1.htm](http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_5_1.htm)

[9] GUANO, Henry, MOLINA, Pamela. “*Estudio y Simulación de los Efectos No Lineales-Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS)*”. Recuperado el 17 de noviembre de 2014 de:

<http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6422/1/CD-4933.pdf>

[10] LEÓN, Carlos. “*Efectos no lineales y su relación con los parámetros de una red WDM*”, Recuperado el 19 de noviembre de 2014 de:

<http://es.scribd.com/doc/223612308/Dialnet->

[EfectosNoLinealesYSuRelacionConLosParametrosDeTran-3914165](http://es.scribd.com/doc/223612308/Dialnet-EfectosNoLinealesYSuRelacionConLosParametrosDeTran-3914165)

[11] CHOMYCZ, B. “*Planning Fiber Optic Networks*”. McGraw-Hill, New York, USA 2009.

[12] SOTOMAYOR, Eduardo. “*Minimización del FWM*”. Recuperado el 19 de noviembre de 2014 de:

<http://www.cursos.ucv.cl/eie46300/presentaciones/Minimizacion%20del%20FWM.pdf>

[13] GROSZ, Diego. “*Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica de Alta Capacidad*”. Recuperado el 22 de noviembre de 2014 de:

<http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/consejo/boletin51/enpdf/a03.pdf>

[14] SAAVEDRA, F., LAMAS, A., FERNANDEZ, M., CEPEDA Y., 2005, “*Efectos de la Modulación de Fase Cruzada sobre la propagación de las ondas en Fibra Óptica*”, Universidad Tarapacá, vol. 13 Num. 3.

[15] Universidad de Valencia. “*Modulación de fase cruzada*”. Recuperado el 22 de noviembre de 2014 de:

[http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1\\_6\\_4.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema1/tema1_6_4.htm)

[16] LOPEZ, Martín, VINUESA, Angulo, NUÑO, J.. “*Líneas de investigación experimentales del grupo de Dinámica NoLineal y Fibras Ópticas del Instituto de Óptica “Daza de Valdes del CSIC”*”. Recuperado el 24 de noviembre de 2014 de:

<http://goo.gl/nppMcF>

[17] LOPEZ, José, TOLEDO Alejandro, ORDÓÑEZ, Henry, AGREDO, Juan. “*Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM*”. Recuperado el 24 de noviembre de 2014 de:

<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3914165.pdf>

[18] Universidad San Francisco de Quito, “*Comunicaciones Ópticas*”. Recuperado el 26 de noviembre de 2014 de:

<http://profesores.usfq.edu.ec/renej/Contenidos%20Comunicaciones%20Opticas/Exposiciones2009/SBS.pdf>.

[19] ESPAÑA, María. *Comunicaciones ópticas: conceptos esenciales y resolución de ejercicios*. Ediciones Díaz de Santos, 2005 - 408 pages (España)

[20] ZUAZNABAR, Virgilio. “*Evolución de la Fibra Óptica en el Futuro*”. Recuperado el 29 de noviembre de 2014 de:

<http://www.monografias.com/trabajos76/evolucion-fibra-optica-futuro/evolucion-fibra-optica-futuro3.shtml#ixzz3L6cICz4L>

[21] Universidad de Valencia. “*Sistema TDM*”. Recuperado el 29 de noviembre de 2014 de: [http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4\\_2.htm](http://nemesis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_2.htm)

[22] AMBROCIO, Fausto. “*Comunicaciones Ópticas WDM*”. Recuperado el 29 de noviembre de 2014 de:

<http://es.slideshare.net/FaustoAmbrocio/comunicaciones-pticas-wdm>

[23] Universidad de Valencia. “*Sistema WDM*”. Recuperado el 29 de noviembre de 2014 de:

[http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4\\_4.htm](http://nemesiis.tel.uva.es/images/tCO/contenidos/tema4/tema4_4.htm)

[24] BUELAS, Dulio, TÉLLEZ, Iván, AMADO, Edgar. “*Redes Ópticas DWDM: Diseño e Implementación*”. Recuperado el 2 de diciembre de 2014 de:

<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4169349.pdf>

[25] MONTERO, Dagoberto, “*Ventajas de la nueva tecnología de comunicaciones UDWDM*”. Recuperado el 2 de diciembre de 2014 de:

<http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/proybach/pb0424t.pdf>

[26] TOPTICA. “*Tunable Diode Lasers*”. Recuperado el 15 de diciembre de 2014 de:

[http://www.toptica.com/fileadmin/user\\_upload/products/Diode\\_Lasers/Research\\_Grade/Tunable\\_Diode\\_Lasers/toptica\\_BR\\_SC\\_TDL.pdf](http://www.toptica.com/fileadmin/user_upload/products/Diode_Lasers/Research_Grade/Tunable_Diode_Lasers/toptica_BR_SC_TDL.pdf)

[27] GUEVARA, Juan. “*Tecnologías de redes PON*”. Recuperado el 5 de enero de 2015 de: [http://www.todotecnologia.net/wp-](http://www.todotecnologia.net/wp-content/uploads/2010/06/Definicion_caracteristicas_PON_APON_BPON_GEPON_GPON_EPON.pdf)

[content/uploads/2010/06/Definicion\\_caracteristicas\\_PON\\_APON\\_BPON\\_GEPON\\_GPON\\_EPON.pdf](http://www.todotecnologia.net/wp-content/uploads/2010/06/Definicion_caracteristicas_PON_APON_BPON_GEPON_GPON_EPON.pdf)

[28] TELNET. “*PON (Passive Optical Networks)*”. Recuperado el 5 de enero de 2015 de:

<http://www.telnet-ri.es/soluciones/acceso-gpon-y-redes-ftth/pon-passive-optical-networks/>

[29] YAÑEZ, René, LÓPEZ, Mayté. “*Evolución de las Redes Ópticas en el Futuro*”. Recuperado el 12 de enero de 2015 de:

<http://www.monografias.com/trabajos72/evolucion-redes-opticas-futuro/evolucion-redes-opticas-futuro2.shtml>

[30] Spolitis, S. “*Extending the reach of DWDM-PON access network using chromatic dispersion compensation*”. Recuperado el 12 de enero de 2015 de: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=6082484>