



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

TÍTULO:

**SIMULACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA CON CAPACIDAD DE
GIGABIT Y DE RADIO SOBRE FIBRA PARA SER UTILIZADA EN
TRANSMISIONES INALÁMBRICAS WIMAX Y 4G-LTE**

AUTOR:

HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN

Previa la obtención del Título
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Edwin Palacios Meléndez

Guayaquil, Ecuador

2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr.
Henry Manuel Paucar Villón como requerimiento parcial para la obtención
del título de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES.

TUTOR

M. Sc. Fernando Palacios Meléndez

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Miguel A. Heras Sánchez.

Guayaquil, a los 14 días del mes de Marzo del año 2016



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Henry Manuel Paucar Villón**

DECLARÓ QUE:

El trabajo de titulación “SIMULACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA CON CAPACIDAD DE GIGABIT Y DE RADIO SOBRE FIBRA PARA SER UTILIZADA EN TRANSMISIONES INALÁMBRICAS WiMAX Y 4G-LTE” previa a la obtención del Título de Ingeniero en Telecomunicaciones, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 14 días del mes de Marzo del año 2016

EL AUTOR

HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, Henry Manuel Paucar Villón

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: "SIMULACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA CON CAPACIDAD DE GIGABIT Y DE RADIO SOBRE FIBRA PARA SER UTILIZADA EN TRANSMISIONES INALÁMBRICAS WIMAX Y 4G-LTE", cuyo contenido, ideas y criterios es de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

Guayaquil, a los 14 días del mes de Marzo del año 2016

EL AUTOR

HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación y logro académico está dedicado a mis padres; **Nilda Aracely Villón Alejandro** y **Carlos Manuel Paucar Ordoñez** y a mi familia en general, cuyo esfuerzo académico lo he plasmado con mucha responsabilidad y ahínco.

Ustedes queridos padres fueron el motor y el impulso para lograr esta meta y más que toda mi inspiración de lucha. Muchas gracias padres por lo que han hecho por mí y por sus sabios consejos impartidos, y por formarme humanísticamente y profesionalmente.

EL AUTOR

HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN

AGRADECIMIENTO

Siento un profundo agradecimiento a Dios, a mis padres, a mi abuela y hermanos. Muy agradecidos con ustedes por cada apoyo brindado y por su gran cariño demostrado. Gracias por sus enseñanzas y valores inculcados y más que todo por haberme formado desde mi niñez.

Cabe recalcar que todo ese esfuerzo que han hecho por mí, será retribuido de parte mía hacia ustedes, jamás los olvidaré, ni mucho menos los abandonaré querida Madre **Nilda Aracely Villón Alejandro** y querido Padre **Carlos Manuel Paucar Ordoñez**.

Además un agradecimiento incondicional a mi tutor el **MsC Edwin Fernando Palacios Meléndez** por su gran ayuda y aporte en el trabajo de titulación y a mi querida Universidad Católica de Santiago de Guayaquil por haberme permitido educarme y formarme como un profesional con principios éticos y espiritual y más que todo llevarme grandes recuerdos y amigos.

Mil gracias a ustedes queridos Padres, guerreros de Dios y de la vida.

EL AUTOR

HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN

Índice General

Índice de Figuras	X
Índice de Tablas	XII
Resumen	XIII
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	14
1.1. Introducción.....	14
1.2. Antecedentes	15
1.3. Justificación del Problema.....	16
1.4. Definición del Problema.....	17
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	17
1.5.1. Objetivo General.....	17
1.5.2. Objetivos Específicos.....	18
1.6. Hipótesis.....	18
1.7. Metodología de Investigación.....	18
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	20
2.1. Introducción.....	20
2.2. Enlaces de Transmisiones Ópticas.....	22
2.2.1. Fibra óptica.....	22
2.2.2.1. Transmisiones sobre fibra óptica.....	24
2.2.2.2. Fibra multimodo frente a fibra monomodo.....	26
2.2.2.3. La atenuación en fibra	28
2.2.2.4. Dispersión en la fibra óptica.....	29
2.2.2.5. Las no linealidades en la fibra óptica.....	30
2.2.2.6. Acopladores ópticos.....	31
2.3. Transmisores ópticos	32
2.3.1. Cómo funciona una Láser	32

2.3.2.	Diodos Semiconductor Láser.....	35
2.3.3.	Modulación óptica.....	35
2.4.	Receptores ópticos.....	36
2.4.1.	Fotodetectores.....	36
2.5.	Amplificadores ópticos	37
2.5.1.	Amplificador de fibra dopada.	38
2.6.	Radio sobre enlaces de fibra óptica.	39
2.6.1.	Introducción a enlaces ópticos de RF analógica.	39
2.6.2.	Generación de señal de radio base y métodos de transporte.	40
2.6.3.	Configuraciones de enlaces de RoF.	42
2.6.4.	Generación de ondas milimétricas y transporte de tecnologías.	46
2.6.5.	Radio sobre Fibra y Multiplexación por División de Longitud de Onda.....	46
CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE SIMULACION Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....		51
3.1.	Tecnologías de una Red Óptica Pasiva.....	51
3.2.	Diseño de modelos de simulación en OptiSystem.....	55
3.2.1.	Simulación 1: GPON CWDM a través de RoF para longitudes de 210 km.....	56
3.2.2.	Simulación 2: GPON extendida utilizando fibra SM, fibra de compensación de dispersión y rejilla de Bragg de fibra a través de RoF para distancias de 600 km.....	61
3.3.	Resultados Obtenidos.	64
3.3.1.	Resultados de la simulación 1: GPON CWDM a través de RoF para una longitud de 210 km.....	64

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
4.1. Conclusiones.....	80
4.2. Recomendaciones.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82

Índice de Figuras

Capítulo 2

Figura 2. 1: Diagrama de bloque del sistema general de Radio sobre Fibra.	21
Figura 2. 2: Diagrama de bloques de un enlace de transmisión óptica.	22
Figura 2. 3: Multimodo (y monomodo (b) bors ópticos (unidad: μm).	25
Figura 2. 4: La luz que viaja a través de la reflexión interna total dentro de una fibra óptica.	26
Figura 2. 5: La estructura general de un láser.	34
Figura 2. 6: Estructura de un diodo semiconductor laser.	35
Figura 2. 7: Diagrama de bloques de IMDB de enlace óptico analógico.	42
Figura 2. 8: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada RF, EOM.	42
Figura 2. 9: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada EOM, IF.	43
Figura 2. 10: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada EOM, banda base.	44
Figura 2. 11: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de modulación directa.	45
Figura 2. 12: Diagrama de bloques de combinación de DWDM y transmisión RoF.	47
Figura 2. 13: Espectros de señales DWDM de RF de ondas mm con modulación (a) DSB y (b) SSB.	48
Figura 2. 14: Arquitectura de RoF en anillo basado en DWDM.	49

Capítulo 3

Figura 3. 1: Tecnología de redes ópticas pasivas hasta el hogar.	52
Figura 3. 2: Arquitectura típica de una APON.	53
Figura 3. 3: Arquitectura típica de una BPON.	54

Figura 3. 4: Topología de árbol para una EPON.	54
Figura 3. 5: Topología de red GPON.	55
Figura 3. 6: Sistema GPON CWDM a través de RoF para transmisiones combinando WiMAX y LTE	60
Figura 3. 7: Sistema GPON CWDM a través de RoF para 600 km de fibra. 63	
Figura 3. 8: 64 QAM diagrama de constelación de señales de WiMAX durante 20 km de longitud de la fibra	65
Figura 3. 9: 64 QAM diagrama de constelación de señales de WiMAX de 210 kilómetros de longitud de fibra	66
Figura 3. 10: Espectro de emisión óptica de 2,5 Gbps de señal combinada CWDM 18 canales, WiMAX y LTE-Tx-Tx para la longitud SMF 210 km.....	67
Figura 3. 11: Atenuación de potencia de señal de 8 canales en SMF; dBm por km	69
Figura 3. 12: Diagrama de ojo y el factor Q después de divisor para la longitud de onda múltiple ONU para una longitud de fibra de 160 km	70
Figura 3. 13: Diagrama de ojo y la tasa de error de bits para bidireccional SMF 160	71
Figura 3. 14: Diagrama de ojo y rendimiento de la tasa de error de bits para WDM-ONU.	72
Figura 3. 15: Diagrama de ojo y Q-Factor de 210 km	73
Figura 3. 16: Espectro de RF descendente del receptor WiMAX para 210 km.	74
Figura 3. 17: Espectro de RF descendente del receptor LTE para 210 km ..	75
Figura 3. 18: Espectro de RF descendente del receptor WiMAX.	76
Figura 3. 19: Espectro de RF ascendente del receptor LTE.....	77

Índice de Tablas

Capítulo 3

Tabla 3. 1: Relación señal a ruido óptico - OSNR para una fibra de 160 km de longitud.....	78
Tabla 3. 2: Relación señal a ruido óptico - OSNR para una fibra de 210 km de longitud.....	79

Resumen

Actualmente los sistemas de telecomunicaciones más implementados son las redes ópticas pasivas – PON, para lo cual se realizó una descripción general de la tecnología de PONs, así como también se caracterizó los sistemas de Radio sobre Fibra – RoF. Los sistemas RoF permiten integrar o combinar otras tecnologías tales como las comunicaciones inalámbricas: WiFi, WLAN, WiMAX, 3G, 3.5G y 4G-LTE. Aunque, en nuestro país se desconoce que empresas públicas o privadas utilicen sistemas de RoF para combinarse con redes WiMAX o LTE, que son parte del trabajo de titulación. Posteriormente, el software apropiado para el diseño de las simulaciones fue la plataforma OptiSystem, el cual es muy utilizado para modelar sistemas de comunicaciones ópticas. Los dos escenarios escogidos para modelar una red GPON y de RoF permitieron comprobar el rendimiento de la tasa de error de bits, lo cual resulto exitoso de acuerdo a los parámetros que fueron modificados durante la simulación.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

1.1. Introducción

Las tecnologías de las Redes Ópticas Pasivas (Passive Optical Networks, PON) están disponibles a mediados del año 1990, pero a medida que pasan los años, en especial la última década las normas han madurado y se están aplicando las normas comerciales.

Para (García T., 2009) la primera versión fue PON, seguida de Redes Ópticas Pasivas ATM (ATM Passive Optical Network, APON) que evolucionó en Redes Ópticas Pasivas en Banda Ancha (Broadband Passive Optical Networks, BPON). BPON, es compatible con las versiones anteriores de APON. Ethernet sobre Redes Ópticas Pasivas (Ethernet Passive Optical Networks, EPON) y la última versión de Redes Ópticas Pasivas de Capacidad Gigabit (Gigabit Passive Optical Networks, GPON) son las soluciones alternativas para las redes PON en general.

Cabe indicar, que el estándar IEEE no es compatible con las redes APON ni BPON. Es decir, que PON es exclusivamente para tráfico de Ethernet y de protocolos de internet (Internet Protocol, IP). Mientras que GPON es compatible para trabajar con redes inalámbricas y LTE. Las redes GPON son definidas por la recomendación UIT-T serie G.984.1 a través G.984.4. GPON ha mejorado su capacidad en comparación con APON y BPON y también es compatible con versiones anteriores.

El estándar serie G.984 define las características generales de GPON (G.984.1), así como la especificaciones de la capa física (G.984.2), de la capa de transmisión (G.984.3) y la gestión de la Unidad de Red Óptica (*Optical Network Unit, ONU*) y el control de especificación (G.984.4). GPON puede transportar no solamente Ethernet, pero para el tráfico ATM y TDM utilizando el método de encapsulamiento GPON, también conocido como GEM.

1.2. Antecedentes.

En la investigación bibliográfica se encontró varias investigaciones realizadas en la que se tienen sistemas de redes ópticas pasivas integrados con arquitecturas de sistemas ópticos para mejorar la capacidad y servicios para las redes de próxima generación. Una investigación encontrada, es la propuesta de diferentes arquitecturas para la integración de EPON y WiMAX a fin de utilizar las ventajas de mayor ancho de banda de comunicaciones de fibra, en combinación con el rendimiento móvil y de las comunicaciones inalámbricas sin línea de vista (*Non Line of Sight, NLOS*). EPON se utiliza como una red de retorno o backhaul la conexión de diferentes estaciones base de WiMAX.

En la actualidad, muchas empresas de telecomunicaciones tanto privadas como públicas despliegan redes ópticas pasivas de gigabit – GPON. Todas respetando las normas o estándares de la UIT-T. Por ejemplo, Netlife ofrece internet a alta velocidad mediante la topología FTTH (Fibra hasta el hogar) en sectores que otras operadoras como TV Cable y Claro TV no han

llegado, ni muchos menos pensaron desplegar redes en sectores suburbanos, lo que Netlife si logró realizarlo.

Muy pocas empresas utilizan Radio sobre Fibra (Radio over Fiber, RoF), y las instituciones de educación superior realizan investigaciones para analizar y también modelar sistemas RoF. Asimismo, la combinación de GPON y RoF permiten que coexistan comunicaciones entre redes WIMAX y de última generación de celulares 4G LTE.

Se encontraron algunos trabajos de titulación o proyectos fin de grado en repositorios digitales de universidades nacionales e internacionales, en los que modelan sistemas de radio sobre fibra, pero que no trabajan con otros tipos de comunicaciones. Sería extenso colocar el resto de trabajos que están relacionados con el presente trabajo de titulación.

1.3. Justificación del Problema.

El presente trabajo de titulación, se desarrolla en base a una investigación descriptiva de proyectos relacionados y que fueron encontrados en varios repositorios digitales de Universidades. En el repositorio de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, se encontraron dos trabajos de Maestría, de los autores (Navarro V., 2015) y (Morales S., 2015). El primero abordaba la simulación de señales distribuidas en sistemas de Radio sobre Fibra y este sirvió de gran ayuda para desarrollar el modelo de simulación del

proyecto de titulación; y el segundo, realizaba el estudio de la evolución y tendencia de la tecnología RoF, pero solo se utilizó como referencia.

El modelo de simulación a desarrollarse es una red GPON y RoF para transmitir señales inalámbricas WiMAX y 4G-LTE a través del software OptiSystem, cuya plataforma es muy utilizada para simular sistemas de comunicaciones ópticas, el mismo dispone de una amplia librería de elementos necesarios en redes de comunicaciones ópticas, entre las más destacadas están: amplificadores, transmisores, receptores, entre otros.

1.4. Definición del Problema.

En relación a los pocos trabajos realizados en Matlab/Simulink, tanto en la Carrera de Pregrado como Posgrado de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones y en base a lo explicado, surge la necesidad de desarrollar simulaciones de una Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit y de Radio sobre Fibra para ser utilizada en transmisiones inalámbricas WiMAX y 4G-LTE.

1.5. Objetivos del Problema de Investigación.

1.5.1. Objetivo General.

Elaborar modelos de simulación de una red óptica pasiva con capacidad de Gigabit y de Radio sobre Fibra para utilizar en sistemas de comunicaciones inalámbricos WiMAX y LTE utilizando el programa OptiSystem.

1.5.2. Objetivos Específicos.

- Fundamentar teóricamente los principios de comunicaciones ópticas así como del sistema de radio sobre fibra.
- Diseñar en el software OptiSystem escenarios de simulación de una red GPON y RoF para la transmisión de información a través de sistemas WiMAX y 4G-LTE.
- Evaluar los resultados obtenidos de los escenarios de simulación desarrollados en OptiSystem.

1.6. Hipótesis.

En este trabajo de titulación se desarrollan escenarios de simulación, para modelar una red óptica pasiva con capacidad de Gigabit y de Radio sobre Fibra que permitirá demostrar que tanto GPON como RoF son compatibles para coexistir con otras tecnologías de comunicación, tales como, WiMAX y 4G-LTE.

1.7. Metodología de Investigación.

Para (Kothari, 2004) el propósito de la investigación, es descubrir respuestas a preguntas mediante la aplicación de procedimientos científicos. También, afirma que el objetivo principal de la investigación es averiguar la verdad que se oculta y que no se ha descubierto hasta el momento. Aunque cada estudio de investigación tiene su propio propósito específico.

Según, (Kothari, 2004) la investigación sirve:

- a. Para familiarizarse con un fenómeno o para lograr nuevos conocimientos sobre ella (estudios con este objetivo en mente se denominan como los estudios de investigación exploratoria o de formación);
- b. Para una representación precisa de las características de un individuo en particular, una situación o un grupo (estudios con este objetivo en mente se conocen como estudios de investigación descriptivos);
- c. Para determinar la frecuencia con la que se produce algo o con el que está asociado con alguna otra cosa (estudios con este objetivo a la vista que se conoce como estudios de investigación de diagnóstico).

En consecuencia, el presente trabajo de titulación utiliza el método empírico-analítico, cuyo diseño de investigación es formativo y descriptivo, cuyo enfoque es cuantitativo. Emplearemos el método interactivo utilizando el programa de simulación de MatLab/Simulink.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Introducción.

Las redes inalámbricas basadas en tecnologías de Radio sobre Fibra (Radio over Fiber, RoF) se han propuesto como una solución prometedora y rentable para satisfacer el aumento de ancho de banda y la demanda de usuarios en comunicaciones inalámbricas (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015). Desde que se demostró por primera vez el servicio inalámbrico o de telefonía móvil en 1990, una gran cantidad de investigaciones se han llevado a cabo para investigar las limitaciones y desarrollar nuevas y altas tecnologías RoF rendimiento.

En las redes RoF, una estación de control (Control Station, CS) está conectada a numerosas estaciones bases (Base Stations, BSs) funcionales a través de una fibra óptica. Para (Morales S., 2015) la función principal de una BS, es la de convertir la señal óptica a una señal inalámbrica y viceversa. Casi todo el procesamiento incluyendo la modulación, demodulación, codificación, el enrutamiento es realizado en la CS. Es decir, que las redes RoF utilizan enlaces de fibra óptica altamente lineales para distribuir señales de radio frecuencia (*Radio Frequency, RF*) entre la CS y las BSs.

En la figura 2.1 se muestra una arquitectura general de ROF. Como mínimo, un enlace de RoF consta de todo el hardware necesario para imponer una señal de RF en un soporte óptico, el enlace de fibra óptica, y el hardware

necesario para recuperar la señal de RF desde el portador. La longitud de onda de la portadora óptica, por lo general se selecciona para coincidir con la ventana o bien $1,3 \mu m$, en la que la fibra monomodo estándar tiene una dispersión mínima, o en la ventana $1,55 \mu m$, en el que su atenuación es mínima.

Este capítulo se constituye de dos partes principales, cubre brevemente eslabón básico de la transmisión por fibra óptica y el estado de las técnicas de las tecnologías, con énfasis en el sistema ROF operando en bandas de onda milimétricas (mm). La primera parte está dedicada a una descripción del enlace de transmisión óptica general, cuando se asume la transmisión de señal digital como redes ópticas actuales.

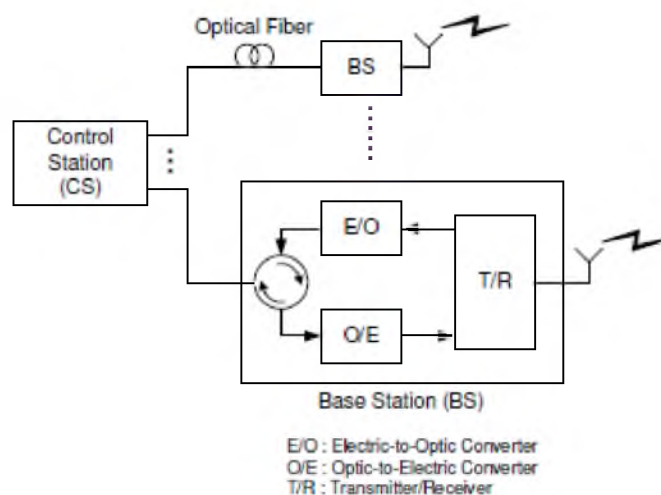


Figura 2. 1: Diagrama de bloque del sistema general de Radio sobre Fibra.
Fuente: (Cardona F. & Fernández C., 2009)

La segunda parte se ocupa principalmente de las tecnologías RoF y se subdivide de la siguiente manera:

- 1) Características y requisitos de enlaces de ROF,
- 2) Técnicas de generación de señal de RF y de transporte, y las configuraciones de enlace
- 3) Técnica de generación de ondas milimétricas y tecnologías de transporte.

Además, con la división de longitud de onda ROF multiplexación (WDM) se describe como lo ha sido uno de los temas candentes en esta área.

2.2. Enlaces de Transmisiones Ópticas.

Un enlace de transmisión óptica se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.2. El mismo, describe brevemente para los que se suponemos una señal de pulso digital, se transmite a través de fibra óptica a menos que se especifique lo contrario. Los enlaces ópticos constan de una fibra óptica, transmisor, receptor y amplificador, cada uno de los que se tratará en las siguientes secciones.

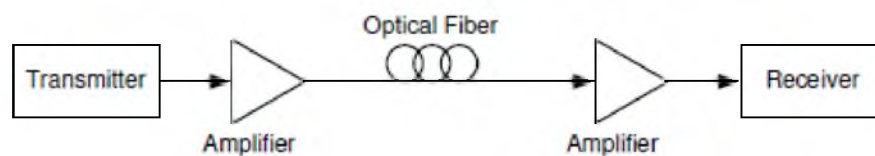


Figura 2. 2: Diagrama de bloques de un enlace de transmisión óptica.

Fuente: (García T., 2009)

2.2.1. Fibra óptica.

La fibra óptica, es un medio dieléctrico para llevar información de un punto a otro en forma de luz. A diferencia del cobre la forma de la transmisión

de la fibra óptica no es de naturaleza eléctrica. Para ser más específicos, la fibra, es esencialmente un filamento delgado de vidrio que actúa como una guía de onda. Una guía de onda, es un medio físico o camino que permite la propagación de las ondas electromagnéticas, tales como la luz.

Debido al fenómeno físico de la reflexión interna total, la luz puede propagarse a raíz de la longitud de una fibra con poca pérdida (véase la figura 2.3).

La fibra óptica tiene dos regiones de baja atenuación [35]. Centrada en aproximadamente 1.300 nm es una gama de 200 nm en el que la atenuación es menor que $0,5\text{ dB/km}$. El ancho de banda total en esta región es de aproximadamente 25 THz . Centrada en 1550 nm es una región de tamaño similar con una atenuación tan bajo como $0,2\text{ dB/km}$. Combinadas, estas dos regiones proporcionan un límite superior teórico de 50 MHz de ancho de banda.

Mediante el uso de estas grandes áreas de baja atenuación para la transmisión de datos, la pérdida de señal para un conjunto de una o más longitudes de onda se puede hacer muy pequeño, reduciendo así el número de amplificadores y repetidores necesarios en realidad. En un solo canal experimentos de larga distancia, las señales ópticas se han enviado a través de cientos de kilómetros sin amplificación.

Además de su enorme ancho de banda y baja atenuación, la fibra también ofrece bajas tasas de error. Los sistemas de comunicación utilizando una fibra óptica suelen operar en los bares de menos de 10^{-11} . El pequeño tamaño y el grosor de la fibra permite más fibra a ocupar el mismo espacio físico como el cobre, una propiedad que es deseable cuando la instalación de redes locales en los edificios. La fibra es flexible, confiable en ambientes corrosivos, y desplegable en un corto plazo. Además, la transmisión por fibra es inmune a las interferencias electromagnéticas y no causa interferencias.

2.2.2.1. Transmisiones sobre fibra óptica.

La luz puede viajar a través de cualquier material transparente, pero la velocidad de la luz será más lenta en el material que en el vacío. La relación de la velocidad de la luz en el vacío a la de un material se conoce como el índice de materiales de refracción (n) y viene dado por $n = c/v$, donde c es la velocidad en el vacío y v es la velocidad en el material.

Cuando la luz viaja de un material de un índice de refracción dado a otro material de un índice de refracción diferente (es decir, cuando se produce refracción), el ángulo en que la luz se transmite en el segundo material depende de los índices de refracción de los dos materiales, así como el ángulo en el que la luz incide en la interfaz entre los dos materiales. De acuerdo con la ley de Snell, tenemos $n_a \text{ sen } \theta_a = n_b \text{ pecado } \theta_b$, donde n_a y n_b somos los índices de refracción de la primera sustancia y la segunda sustancia,

respectivamente; y a y b son los ángulos de la normal del incidente y las luces refractados, respectivamente.

De la figura 2.3, vemos que la fibra consiste en un núcleo completamente rodeado por un revestimiento (ambos de los cuales constan de vaso de diferentes índices de refracción). Consideremos primero una fibra de salto de índice, en el que el cambio de índice de refracción en el límite núcleo-revestimiento es una función escalonada. Si el índice de refracción del revestimiento es menor que la del núcleo, entonces la reflexión interna total puede ocurrir en el núcleo y la luz puede propagarse a través de la fibra como se muestra en la figura 2.4. El ángulo por encima del cual la reflexión interna total tendrá lugar es conocido como el ángulo crítico y está dada por θ_c .

$$\sin \theta_c = \frac{n_{clad}}{n_{core}}$$

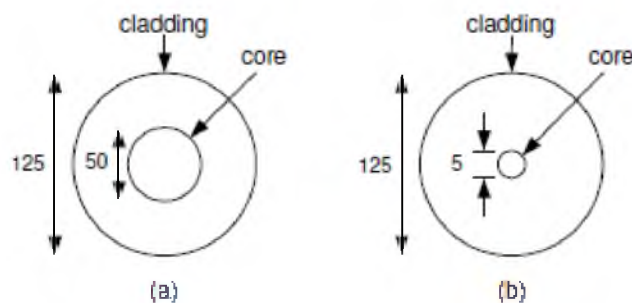


Figura 2. 3: Multimodo (y monomodo (b) bors ópticos (unidad: μm).
Fuente: (Ruiz L., 2015)

Donde n_{clad} y el núcleo son los índices de refracción del revestimiento y el núcleo, respectivamente. Así, para una luz viaje por una fibra, la luz debe incidir sobre la superficie del núcleo-revestimiento en un ángulo mayor que θ_c . Para que la luz entre una fibra, la luz entrante debe estar en un ángulo tal que

la refracción en los resultados de contorno de aire central en las luces de transmisión son en un ángulo para el que la reflexión interna total puede tener lugar en el límite núcleo-revestimiento. El valor máximo de aire se puede derivar de

$$n_{air} \sin \theta_{air} = n_{core} \sin(90^\circ - \theta_c)$$

Podemos reescribir como

$$n_{air} \sin \theta_{air} = \sqrt{n_{core}^2 - n_{clad}^2}$$

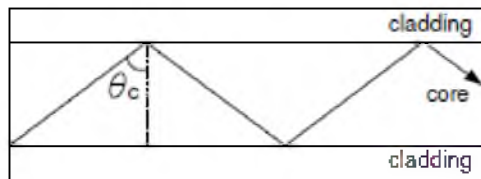


Figura 2. 4: La luz que viaja a través de la reflexión interna total dentro de una fibra óptica.

Fuente: (Robles S. & Guanotasig M., 2014)

La cantidad $n_{aire} \sin \theta_{aire}$ es conocida como la apertura numérica (NA) de la fibra y θ_{aire} es el ángulo máximo con respecto a la normal en el límite de núcleo de aire, de modo que la luz incidente que entra en el núcleo va a experimentar reflexión interna total dentro de la fibra.

2.2.2.2. Fibra multimodo frente a fibra monomodo.

Un modo en una fibra óptica corresponde a una de las posibles formas múltiples en el que una onda puede propagarse a través de la fibra. También se puede ver como una onda estacionaria en el plano transversal de la fibra. Más formalmente, un modo corresponde a una solución de la ecuación de

onda que se deriva de las ecuaciones de Maxwell y sujeto a condiciones de contorno impuestas por la guía de ondas de fibra óptica.

Aunque se puede producir la reflexión interna total θ para cualquier ángulo que es mayor que θ_c , la luz no necesariamente se propagará a todos estos ángulos. Para algunos de estos ángulos, la luz no se propagará debido a la interferencia destructiva entre la luz incidente y la luz reflejada en la interface núcleo-revestimiento dentro de la fibra. Para otros ángulos de incidencia, la onda incidente y la onda reflejada en el embarque COREC interfieren constructivamente con el fin de mantener la propagación de la onda.

Los ángulos para los que no se propagan las ondas corresponden a modos en una fibra. Si más de un modo propaga a través de una fibra, entonces la fibra se llama multimodo. En general, un diámetro de núcleo más grande o alta frecuencia de funcionamiento permite a un mayor número de modos para propagarse.

La ventaja de fibra multimodo es que, su diámetro del núcleo es relativamente grande; como resultado, la inyección de la luz en la fibra con baja pérdida de acoplamiento se puede lograr mediante el uso de, fuentes de luz de gran superficie de bajo costo, tales como diodos emisores de luz (LEDs). La desventaja de fibra multimodo es que introduce el fenómeno de la dispersión intermodal.

En la fibra multimodo, cada modo se propaga a una velocidad diferente debido a diferentes ángulos de incidencia en el límite entre el núcleo-revestimiento. Este efecto causa diferentes rayos de luz de la misma fuente para llegar al otro extremo de la fibra en diferentes momentos, lo que resulta en un impulso que se propaga en el dominio del tiempo. Aumenta la dispersión intermodal con la distancia de propagación, lo que limita la velocidad de bits de la señal transmitida y la distancia que la señal puede viajar. Por lo tanto, en las redes de fibra multimodo RoF no se utiliza tanto como sea posible, en cambio, fibra monomodo se utiliza ampliamente.

La fibra monomodo permite sólo un modo y por lo general tiene un tamaño de núcleo de aproximadamente $10 \mu m$, mientras que la fibra multimodo típicamente tiene un tamaño de núcleo de $50 - 100 \mu m$. Se elimina la dispersión intermodal y por lo tanto puede soportar la transmisión a través de distancias mucho más largas. Sin embargo, se presenta el problema de la concentración de poder suficiente en un núcleo muy pequeño. LEDs pueden no par suficiente luz en una fibra monomodo para facilitar las comunicaciones de larga distancia. Tal una alta concentración de energía de la luz puede ser proporcionada por un láser semiconductor, que puede generar un haz estrecho de luz.

2.2.2.3. La atenuación en fibra

La Atenuación en una fibra óptica conduce a una reducción de la potencia de señal que la señal se propaga a través de una cierta distancia.

Cuando se determina la distancia máxima que se puede propagar una señal para una potencia de transmisión dada y la sensibilidad del receptor, se debe considerar la atenuación. Sea $P(L)$ la potencia del pulso óptica a distancia L [km] desde el transmisor y A es la constante de atenuación de la fibra (en dB/km). La atenuación se caracteriza por

$$P(L) = 10^{-AL/10} P(0)$$

Donde $P(0)$ es la potencia óptica en el transmisor.

2.2.2.4. Dispersión en la fibra óptica.

La dispersión es el ensanchamiento de una duración de pulso a medida que viaja a través de una fibra. Como se ensancha un pulso, se puede ampliar lo suficiente como para interferir con impulsos vecinos (bits) sobre la fibra, dando lugar a la interferencia entre símbolos. La dispersión de este modo limita la separación de bits y la velocidad máxima de transmisión en un canal de fibra óptica. Como se describió anteriormente, una forma de la dispersión es una dispersión intermodal. Esto se produce cuando múltiples modos de la misma señal se propagan a velocidades diferentes a lo largo de la fibra. Tener en cuenta que la dispersión intermodal no se produce en una fibra monomodo.

Otra forma de dispersión es el material o la dispersión cromática. En un medio dispersivo, el índice de refracción es una función de la longitud de onda. Por lo tanto, si la señal transmitida consiste en más de una longitud de onda, ciertas longitudes de onda se propagan más rápidamente que otras longitudes

de onda. Puesto que ningún láser puede crear una señal que consta de una sola longitud de onda exacta, la dispersión cromática se producirá en la mayoría de los sistemas.

Un tercer tipo de dispersión es una dispersión de guía de ondas. Dispersión de guía de ondas es causada como la propagación de diferentes longitudes de onda depende de las características de guía de ondas, tales como los índices y la forma del núcleo de la fibra y el revestimiento.

A 1.300 nm , la dispersión cromática en una fibra monomodo convencional es casi cero. Por suerte, esta es también una ventana de baja atenuación (aunque la pérdida es superior a 1550 nm). A través de técnicas avanzadas tales como cambio de dispersión, fibras con dispersión cero a una longitud de onda entre $1300 - 1700\text{ nm}$ puede ser fabricado.

2.2.2.5. Las no linealidades en la fibra óptica.

Los efectos no lineales en la fibra pueden tener potencialmente un impacto significativo en el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas WDM. Las linealidades en fibra pueden dar lugar a la atenuación, distorsión y la interferencia en varios canales. En un sistema WDM, estos efectos ponen limitaciones en la separación entre canales de longitud de onda adyacentes, limitan la potencia máxima en cualquier canal, y también pueden limitar la tasa de bits máxima.

Los detalles de las no linealidades ópticas son muy complejos y más allá del alcance de la disertación. Debe hacerse hincapié en que son los principales factores limitantes en el número disponible de canales en un sistema WDM.

2.2.2.6. Acopladores ópticos.

Un acoplador es un término general que abarca todos los dispositivos que combinan la luz en o dividir la luz de una fibra. Un divisor es un acoplador que divide la señal óptica en una fibra a dos o más fibras. El divisor más común es un divisor de 1×2 . La relación de división, α es la cantidad de energía que va a cada salida. Los combinadores son el reverso de los divisores, y cuando se da vuelta, un combinador se puede utilizar como un divisor.

Además de la división de potencia incurrida en un acoplador, una señal también experimenta la pérdida de retorno. Si la señal entra una entrada del acoplador, aproximadamente la mitad del poder de la señal va a cada salida del acoplador. Sin embargo, una pequeña cantidad de energía se refleja en la dirección opuesta y se dirige de nuevo a las entradas del acoplador. Otro tipo de pérdida es la pérdida de inserción. Una fuente de pérdida de inserción es la pérdida incurrida cuando la luz se dirige desde una fibra en el dispositivo de acoplador; idealmente, los ejes del núcleo de la fibra y el puerto de entrada del acoplador deben estar perfectamente alineadas, pero la perfección completa puede no ser alcanzable debido a las dimensiones muy pequeñas.

El acoplador en estrella pasivo (PSC) es un dispositivo multipuerto en el que la luz que entra en cualquier puerto de entrada se transmite a cada puerto de salida. El PSC, es atractivo debido a que la potencia óptica que cada salida recibe iguales Abadejo

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{N}$$

Donde P_{in} es la potencia óptica introducida en la estrella por un solo nodo y N es el número de puertos de salida de la estrella. Tenga en cuenta que esta expresión ignora el exceso de pérdida, causada por las leyes introducidas en el proceso de fabricación.

2.3. Transmisores ópticos

2.3.1. Cómo funciona una Láser

La palabra láser, es un acrónimo de amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. La palabra clave es la emisión estimulada, que es lo que permite que un láser para producir haces intensos de alta potencia de luz coherente (luz que contiene una o más frecuencias distintas).

Para entender la emisión estimulada, primero tenemos que familiarizarnos con los niveles de energía de los átomos. Los átomos que son estables (en el estado fundamental) tienen electrones en los posibles niveles de energía más bajos. En cada átomo, hay un número de niveles discretos de energía que un electrón puede tener, que se hace referencia como estados.

Para cambiar el nivel de un átomo en el estado fundamental, el átomo debe absorber energía. Cuando un átomo absorbe energía, que se excita y se mueve a un nivel de energía más alto. En este punto, el átomo es inestable y por lo general se mueve rápidamente de vuelta al estado fundamental por la liberación de un fotón, una partícula de luz.

Hay ciertas sustancias, sin embargo, cuyos estados son casi estables, lo que significa que las sustancias son propensas a permanecer en el estado excitado por períodos más largos de tiempo sin excitación constante. Mediante la aplicación de suficiente energía (en la forma de una bomba óptica o una corriente eléctrica) a una sustancia con estados cuasi-estables durante un período de tiempo suficientemente largo, la inversión de población se produce, lo que significa que hay más electrones en el estado excitado de en el estado fundamental.

La figura 2.5 se muestra una representación general de la estructura de un láser. El láser se compone de dos espejos que forman una cavidad (el espacio entre los espejos), un medio de acción láser, que ocupa la cavidad, y un dispositivo de excitación. El dispositivo de excitación se aplica corriente al medio láser, que está hecha de una sustancia cuasi estable. Los excita electrones aplicados actuales en el medio láser, y cuando un electrón en el medio láser cae de nuevo al estado fundamental, emite un fotón de luz. El fotón se refleja en los espejos en cada extremo de la cavidad y pasará a través del medio de nuevo.

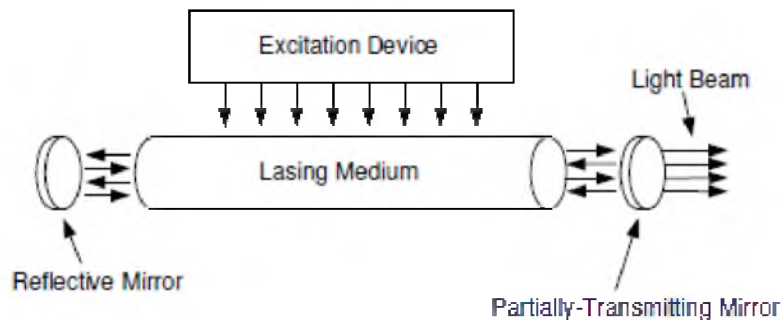


Figura 2. 5: La estructura general de un láser.

Fuente: (García Y., 2016)

La emisión estimulada se produce cuando un fotón pasa muy cerca de un electrón excitado. El fotón puede causar el electrón para liberar su energía y volver al estado fundamental. En el proceso de hacerlo, el electrón libera otro fotón, que tendrá la misma dirección y coherencia (frecuencia) como el fotón estimulante. Los fotones para los que la frecuencia es una fracción integral de la longitud de la cavidad.

Será coherente combinarlo para construir la luz en la frecuencia determinada dentro de la cavidad. Entre la emisión normal y estimulada, la luz a la frecuencia seleccionada se basa en la intensidad hasta que se está quitando energía del medio tan rápido como lo está siendo insertado. Los espejos se alimentan los fotones de ida y vuelta, por lo que la emisión estimulada aún puede ocurrir y altas intensidades de luz puede ser producida. Uno de los espejos es parcialmente transmisora, de manera que algunos fotones escapan de la cavidad en forma de un haz estrecho de luz enfocado. Al cambiar la longitud de la cavidad, la frecuencia de la luz emitida puede ser ajustada.

La frecuencia del fotón emitido depende de su cambio en los niveles de energía. La frecuencia se determina por la ecuación

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

Donde f es la frecuencia del fotón, E_i es el estado inicial (cuasi-estable) del electrón, E_f es el estado final (tierra) del electrón, y h es la constante de Planck ($= 6.626 \times 10^{-34} J \cdot s$).

2.3.2. Diodos Semiconductor Láser.

El tipo de laser más utilizado en redes ópticas, es el diodo semiconductor láser. La implementación más simple de un diodo laser es el diodo de unión $p - n$ con los bordes de espejo perpendicular a la unión (véase la figura 2.6).

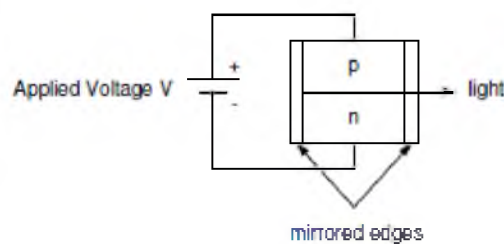


Figura 2. 6: Estructura de un diodo semiconductor laser.
Fuente: (Kramer, De Andrade, Roy, & Chowdhury, 2012)

2.3.3. Modulación óptica.

Para transmitir datos a través de una fibra óptica, la información primero debe ser codificada, o modulada, en la señal de láser. Técnicas analógicas incluyen modulación de amplitud (AM), modulación de frecuencia (FM), y modulación de fase (PM). Las técnicas digitales incluyen modulaciones de

desplazamiento de amplitud (ASK), desplazamiento de frecuencia (FSK) y desplazamiento de fase (PSK). De todas estas técnicas, ASK binario actualmente es el método preferido de la modulación digital debido a su simplicidad. La modulación ASK binario, también es denominada como on-off keying (OOK), donde la señal cambia entre dos niveles de potencia. El nivel de potencia inferior representa un bit "0", mientras que el nivel de potencia más alto representa un bit "1".

En los sistemas que emplean OOK, la modulación de la señal se puede lograr simplemente girando el láser encendido y apagado (modulación directa). En general, sin embargo, esto puede conducir a variaciones en la amplitud y la frecuencia del láser, cuando el láser está encendido. Un enfoque preferido para altas velocidades de bits ($\geq 10Gb/s$), es tener un modulador externo que modula la luz que sale del diodo láser. Con este fin, el interferómetro Mach Zehnder o modulador de electro absorción son los más utilizados.

2.4. Receptores ópticos

2.4.1. Fotodetectores

En los receptores que emplean la detección directa, un fotodetector convierte el flujo fotónico entrante en una corriente de electrones. La corriente de electrones se amplifica y se pasa a través de un dispositivo de umbral. Si un bit es "0" o "1" lógico, dependerá de que si la corriente está por encima o por debajo de un cierto umbral para una duración de bit. En otras palabras, se

toma la decisión en función de si o no la luz está presente durante la duración del bit.

Los dispositivos de detección básica para redes ópticas de detección directa son el fotodiodo PN (unión pn) y el fotodiodo PIN (un material intrínseco se coloca entre el material tipo p y n). En su forma más simple, el fotodiodo es básicamente una unión “pn” polarizada inversamente. A través del efecto fotoeléctrico, la luz incidente sobre la unión creará pares electrón-hueco tanto en el “n” y la “p” regiones del fotodiodo. Los electrones liberados en el “p” región cruzar al “n” región, y los agujeros creados en el “n” región cruzar al “p” región, lo que resulta en un flujo de corriente.

2.5. Amplificadores ópticos

Aunque una señal óptica puede propagarse a gran distancia antes de necesitar amplificación, tanto de largo recorrido y redes de ondas de luz locales pueden beneficiarse de los amplificadores ópticos. Todo amplificador óptico puede diferir de la amplificación optoelectrónica en que puede actuar sólo para aumentar la potencia de una señal, no para restaurar la forma o la temporización de la señal. Este tipo de amplificación se conoce como 1R (regeneración), y proporciona transparencia total de datos (el proceso de amplificación es independiente del formato de modulación de señales). Amplificación 1R se perfila como la opción para las redes totalmente ópticas transparentes del mañana.

Las redes digitales (por ejemplo, la red óptica síncrona – SONET y la jerarquía digital síncrona – SDH), sin embargo, utilizan la fibra óptica sólo como un medio de transmisión, las señales ópticas son amplificadas convirtiendo primero el flujo de información en una señal de datos electrónica y luego retransmitir la señal óptica. Tal amplificación se conoce como 3R (regeneración, reconfiguración y resincronización).

La amplificación óptica utiliza el principio de la emisión estimulada, similar al enfoque utilizado en un láser. Los dos tipos básicos de los amplificadores ópticos son amplificadores láser de semiconductores y amplificadores de fibra dopada.

2.5.1. Amplificador de fibra dopada.

Los amplificadores ópticos de fibra dopada, son longitudes de fibra dopada con un elemento que puede amplificar la luz. El elemento de dopaje más común es el Erbio, que proporciona ganancias para longitudes de onda entre 1.525 – 1560 nm. Al final de la longitud de fibra, un láser transmite una señal fuerte a una longitud de onda más baja (se hace referencia como longitud de onda de bombeo) en la parte posterior de la fibra.

Esta señal de bombeo excita los átomos dopantes en un nivel de energía más alto. Esto permite que la señal de datos estimule los átomos excitados para liberar fotones. La mayoría de los amplificadores de fibra dopada con

erbio (EDFAs) son bombeados por el láser con longitudes de onda de 980 o bien 1480 nm.

Una limitación a la amplificación óptica es el espectro de ganancia desigual de los amplificadores ópticos. Mientras que un amplificador óptico puede proporcionar ganancias a través de una gama de longitudes de onda, no amplificará necesariamente todas las longitudes de onda igual. Esta característica, acompañada por el hecho de que los amplificadores ópticos amplifican el ruido, así como de la señal y el hecho de que la región activa del amplificador puede emitir espontáneamente fotones, que también causan ruido, limitan el rendimiento de los amplificadores ópticos.

2.6. Radio sobre enlaces de fibra óptica.

2.6.1. Introducción a enlaces ópticos de RF analógica.

A diferencia de las redes ópticas convencionales, donde se transmite principalmente de señal digital, RoF es fundamentalmente un sistema de transmisión analógico porque distribuye la forma de onda de radio, directamente en la frecuencia portadora de radio, desde una CS a una BS. En realidad, la señal analógica que se transmite por la fibra óptica puede ser la señal de RF, señal IF (frecuencia intermedia) o señal de banda base (*BaseBand*, *BB*). Para el caso de transmisiones de IF y BB, se requiere de hardware adicional para la conversión a banda RF en la BS.

En el transmisor óptico, las señales de RF, IF y BB pueden ser impuestas a la portadora óptica utilizando modulación directa o externa de la luz láser. En un caso ideal, la señal de salida del enlace óptico será una copia de la señal de entrada. Sin embargo, hay algunas limitaciones a causa de la no linealidad y los límites de respuesta de frecuencia en el láser y dispositivo de modulación, así como la dispersión en la fibra. La transmisión de señales analógicas pone ciertos requisitos en la linealidad y rango dinámico de la conexión óptica.

2.6.2. Generación de señal de radio base y métodos de transporte.

En esta sección, se da una breve descripción de cómo generar y transportar señales de radio a través de una fibra óptica en las redes RoF. Prácticamente la totalidad de los enlaces ópticos, transmiten señales de microondas u ondas milimétricas aplicando la modulación de la intensidad de la luz. Esencialmente, existen tres métodos diferentes para la transmisión de señales de microondas/ondas milimétricas a través de enlaces ópticos con intensidad de modulación, estas son:

- a. **Modulación de intensidad directa:** en modulación de intensidad directa, un parámetro eléctrico de la fuente de luz es modulada por la señal de portadora de información RF. En enlaces prácticos, esto es la corriente del diodo láser, que actúa como el transmisor óptico.
- b. **Modulación externa:** este método se aplica a una fuente de luz no modulada y a un modulador de intensidad de la luz externa. Esta técnica se llama “modulación externa”.

c. **Heterodinación remota:** las señales RF se generan ópticamente a través del heterodino remoto, es decir, un método en el que más de una señal óptica se genera por la fuente de luz, uno de los cuales está modulada por la señal portadora de información y éstos se mezclan o heterodinan por el fotodetector o mediante un mezclador externo para formar la señal de salida de RF.

Los métodos de modulación y heterodinios externos se discuten en más detalle en la subsección 2.6.4. En este apartado, se considera sólo la modulación de intensidad directa. La modulación de la intensidad directa, es la más sencilla de las tres soluciones. Por lo tanto, se utiliza en todas partes que se puede utilizar. Cuando se combina con la detección directa utilizando fotodetectores (*Photo Detector, PD*), que para (Cardona F. & Fernández C., 2009) se refieren con frecuencia como la Modulación de Intensidad y Detección Directa (*Intensity Modulation and Direct Detection, IMDD*) tal como se muestra en la figura 2.7.

Los enlaces de modulación directa, se denomina así, porque un láser semiconductor convierte directamente una modulación de pequeña señal (alrededor de un punto de polarización establecido por una corriente dc) en una correspondiente modulación de pequeña señal de la intensidad de los fotones emitidos (en torno a la intensidad media en el punto de polarización). Por lo tanto, un único dispositivo sirve como fuente óptica para el modulador RF/óptico (véase la figura 2.7).

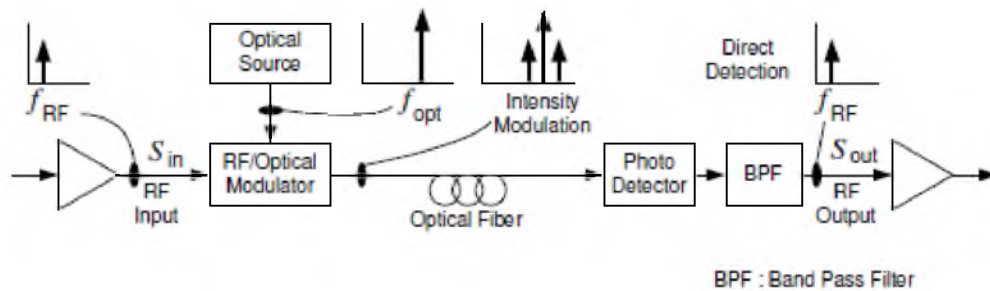


Figura 2. 7: Diagrama de bloques de IMDB de enlace óptico analógico.
Fuente: (Tinoco A., 2011)

2.6.3. Configuraciones de enlaces de RoF.

La configuración típica de enlaces de ROF, se clasifican en función de los tipos de frecuencias de bandas (BB, bandas IF, RF) transmitidos a través de un enlace de fibra óptica. La representación de la configuración de enlaces RoF se muestra esquemáticamente en las figuras 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11. Aquí, suponemos que una BS dispone de una fuente de luz para el propósito de explicación, sin embargo, como se verá en la sección 2.6.4 la BS se puede configurar.

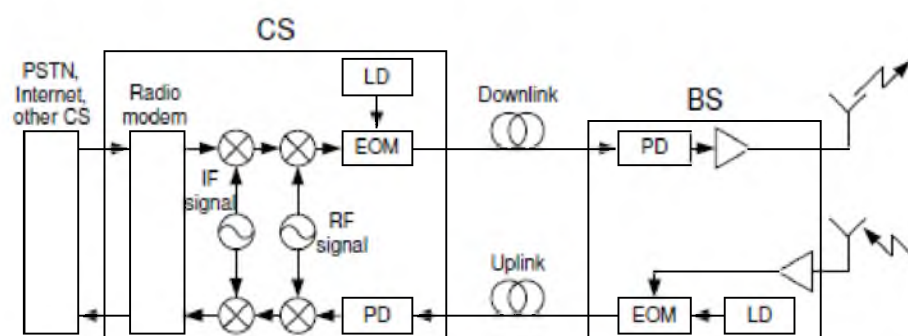


Figura 2. 8: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada RF, EOM.

Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

En la configuración mostrada por la figura 2.8, genera la señal modulada en la CS en una banda de RF y transmitidas directamente a la BS por una

EOM, que se llama “RF-sobre-fibra”. En cada BS, la señal modulada se recupera mediante la detección de la señal óptica modulada con un PD y transmitida directamente a los host móviles (*Mobile Hosts, MHS*). La distribución de señal como RF-sobre-fibra tiene la ventaja de un diseño de BS simplificada, pero es susceptible a la dispersión cromática de la fibra que limita severamente la distancia de transmisión.

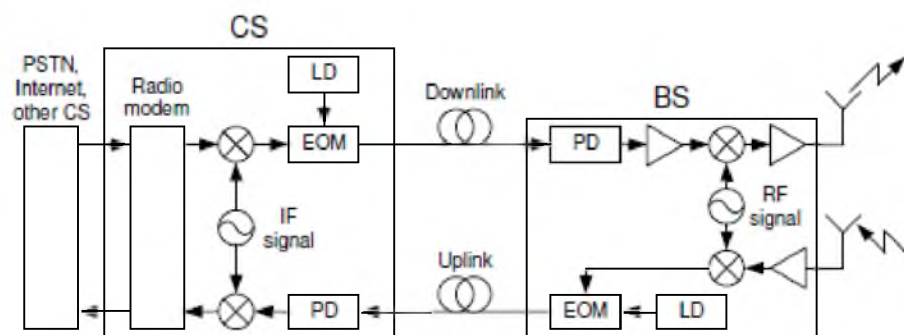


Figura 2. 9: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada EOM, IF.

Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

En la configuración mostrada por la figura 2.9, se genera la señal modulada en la CS en una banda de IF y transmitida a las estaciones de base por una EOM, que se llama “IF sobre fibra”. En cada BS, la señal modulada se recupera mediante la detección de la señal óptica modulada con un PD, con elevación de frecuencia a una banda de RF, y se transmite a los MHs. En este esquema, el efecto de la dispersión cromática de la fibra sobre la distribución de señales si es muy reducido, aunque la antena BS implementada para el sistema de RoF incorpora transporte de IF sobre fibra requiere de hardware electrónico adicional, tal como una frecuencia de ondas milimétricas (LO) para la frecuencia ascendente y conversión descendente.

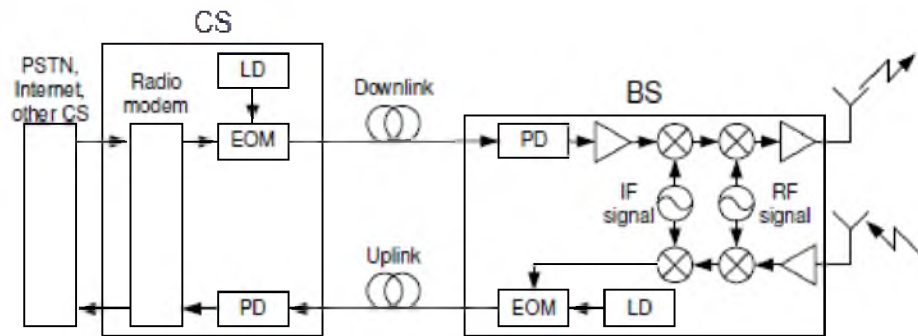


Figura 2. 10: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de señal modulada EOM, banda base.

Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

En la configuración mostrada por la figura 2.10, se genera la señal modulada en el CS en banda base y se transmite a las estaciones de base por una EOM, que se conoce como “Banda base sobre Fibra”. En cada BS, la señal modulada se recupera mediante la detección de la señal óptica modulada con un PD, con elevación de frecuencia a una banda de RF a través de una banda de IF o directamente, y se transmite a los MHs. En la transmisión de banda base, la influencia del efecto de dispersión de la fibra es insignificante, pero la configuración BS es el más complejo. Dado que, sin una frecuencia subportadora, no tiene más remedio que adoptar división de tiempo o multiplexación por división de código.

En la configuración mostrada por la figura 2.11, se genera la señal modulada en la CS en una banda base o una banda de IF y se transmite a las estaciones de base mediante la modulación de un LD directamente. En cada BS, la señal modulada se recupera mediante la detección de la señal óptica modulada con un PD, con elevación de frecuencia a una banda de RF, y se

transmite a los MHs. Esto es factible para frecuencias relativamente bajas, digamos, menos del 10 GHz.

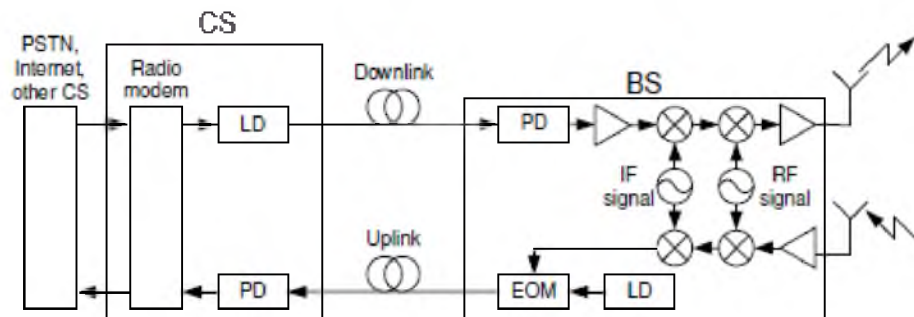


Figura 2. 11: Diagrama de bloque para configuraciones de enlaces de RoF de modulación directa.

Fuente: (Cardona F. & Fernández C., 2009)

Mediante la reducción de la banda de frecuencia utilizada para generar la señal modulada en el CS como IF sobre fibra o BB-sobre-fibra, el ancho de banda necesario para la modulación óptica en gran medida puede ser reducido. Esto es especialmente importante cuando RoF en bandas de ondas mm se combinan con la multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM) como se discutirá en la sección 2.6.5.

Sin embargo, esto aumenta la cantidad de equipos en las estaciones de base debido a un convertidor elevador para el enlace descendente y un convertidor reductor de frecuencia para el enlace ascendente son obligatorios. En la transmisión de subportadora de RF, la configuración BS se puede simplificar sólo si un modulador externo óptico de onda mm y un PD de alta frecuencia se aplica respectivamente a los convertidores eléctricos-a-óptica (E/O) y óptica-a-eléctrico (O/E).

Para enlaces ascendentes desde un MH a la CS, se realiza el proceso inverso. En la configuración mostrada en la figura 2.8, las señales recibidas en una BS se amplifican y son transmitidas directamente a la CS mediante la modulación de una señal óptica de un LD mediante el uso de una MOE. En la configuración de las figuras 2.9 y 2.10, las señales recibidas en una BS se amplifican y convertidas a una frecuencia de banda base a IF y transmitida al CS mediante la modulación de una señal óptica de un LD mediante el uso de una EOM. En la configuración de la figura 2.11, las señales recibidas en una BS se amplifican y convertidas a una IF o una frecuencia de banda base y se transmiten a la CS modulando directamente una señal óptica de un LD.

2.6.4. Generación de ondas milimétricas y transporte de tecnologías.

En la última década una gran cantidad de investigaciones se han realizado para desarrollar técnicas de generación y transporte de ondas mm, que incluyen la generación óptica de señales inalámbricas de bajo ruido de fase y su transporte supera la dispersión cromática de la fibra. Las técnicas más destacadas son: (a) Heterodinación óptica, (b) Modulación externa, (c) Conversión ascendente y descendente, y (d) Transceptor óptico.

2.6.5. Radio sobre Fibra y Multiplexación por División de Longitud de Onda

La aplicación de WDM en redes RoF tiene muchas ventajas, incluyendo la simplificación de la topología de la red mediante la asignación de diferentes longitudes de onda a estaciones bases individuales, permitiendo fáciles

actualizaciones de red y servicios y proporcionar una gestión de red más simple. Por lo tanto, a través de investigaciones WDM se combina con el transporte de ondas ópticas milimétricas. Una disposición esquemática se ilustra en la figura 2.12, donde por simplicidad, solamente se presenta la transmisión de enlace descendente.

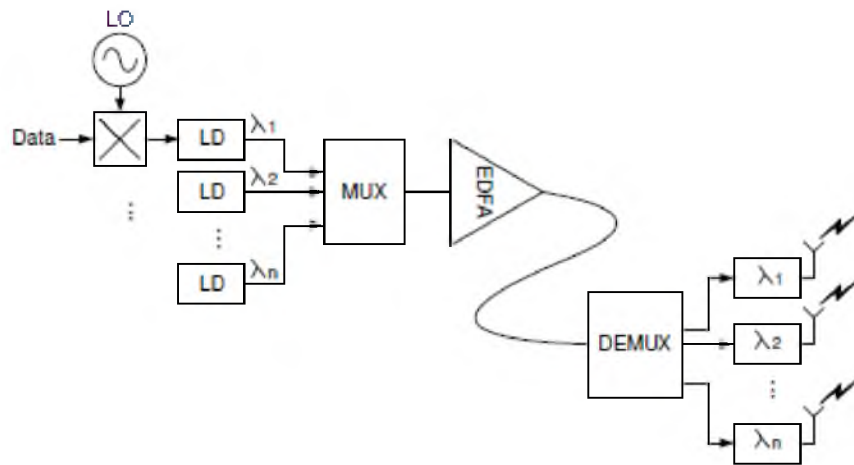


Figura 2. 12: Diagrama de bloques de combinación de DWDM y transmisión RoF.
Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

Las señales ópticas de ondas milimétricas de múltiples fuentes son multiplexadas y la señal compuesta se amplifica ópticamente, transportado sobre una única fibra y demultiplexado para abordar cada BS. Aunque un gran número de longitudes de onda están disponibles en las tecnologías DWDM modernas, ya que las redes RoF de bandas de onda mm, pueden requerir más BSs para ser utilizados de manera eficiente.

Una cuestión difícil es que el ancho espectral óptico de una sola fuente óptica de ondas milimétricas puede acercarse o superar la separación entre canales WDM. Por ejemplo, la figura 2.13 muestra un espectro óptico de

señales DWDM de RF de ondas mm con (a) modulación óptica DSB y (b) modulación SSB, donde se supone que la frecuencia portadora de la señal de onda mm es 60 GHz. La figura 2.13 (a) indica que para transmitir canales de datos individuales en 60 GHz, es necesario mayor ancho de banda a 120 GHz para la modulación DSB.

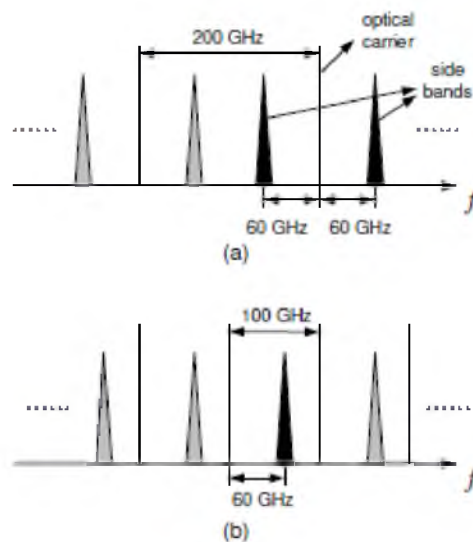


Figura 2. 13: Espectros de señales DWDM de RF de ondas mm con modulación (a) DSB y (b) SSB.

Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

Además, desde un punto de vista de la reducción de costes, es preferible utilizar la asignación de canales de acuerdo con la red debido a la disponibilidad de los componentes ópticos. Entonces, la separación mínima de canales en este caso es de 200 GHz. En el caso de la modulación SSB, esto es 100 GHz, tal como se muestra en la figura 2.13 (b).

Otro problema está relacionado con el número de longitudes de onda requeridas por las BSs. Es deseable utilizar una longitud de onda para apoyar la operación de dúplex completo. Para lograr esto, se pueden utilizar técnicas

de reutilización de longitud de onda, que se basa en la recuperación de la portadora óptica utilizado en la transmisión de señales downstream (descendente) y la reutilización de la misma longitud de onda para la transmisión de señales upstream (ascendente).

En la figura 2.14 se muestra una arquitectura típica de anillo de fibra unidireccional, que puede ser utilizado para la entrega de servicios de banda ancha inalámbrica. En el CS, todas las fuentes de luz descendentes y ascendentes son multiplexados y amplificadas. Los canales de enlace descendente modulado y los canales de enlaces ascendentes no moduladas se alimentan a la red troncal de la red de fibra en anillo.

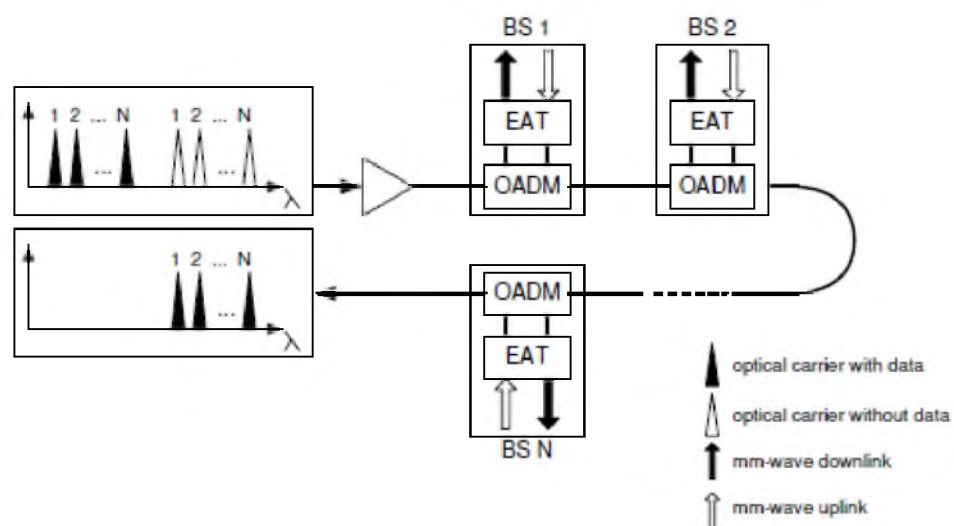


Figura 2. 14: Arquitectura de RoF en anillo basado en DWDM.
Fuente: (Aguirre O., Restrepo R., Velásquez, Amaya F., & Betancur A., 2015)

En cada BS, un par de longitudes de onda de enlaces ascendentes y descendentes se deja caer a través de multiplexores ópticos de inserción/extracción (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) al transceptor de

electroabsorción (ElectroAbsorption Transceiver, EAT), que simultáneamente detecta y modula los canales de enlaces descendente y ascendente, respectivamente. Los canales de enlaces ascendentes modulados se añaden a una backbone de nuevo, en bucle de vuelta a la CS, donde se demultiplexa y detecta. La principal ventaja de esta red en anillo WDM punto a multipunto es la centralización de todas las fuentes de luz necesarias en el CS, lo que permite una configuración BS simple.

CAPÍTULO 3: DESARROLLO DE SIMULACION Y OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Para este capítulo se describe brevemente las tecnologías de las redes ópticas pasivas y posteriormente se realizan la simulación y evaluación de la red GPON y RoF para integrar sistemas de comunicaciones inalámbricas WiMAX y 4G-LTE.

3.1. Tecnologías de una Red Óptica Pasiva.

La arquitectura de una red óptica pasiva es la tecnología líder para fibra hasta el hogar y de fibra hasta las instalaciones (FTTH/FTTH). La mayoría de las redes de telecomunicaciones aún utilizan redes activas, tales como, VDSL, ADSL y de cable, que aplican componentes activos en sus equipos, que se colocan en la red troncal o backbone, central, infraestructura de barrio e instalaciones del cliente.

Los componentes activos en un sistema PON están situados sólo en la oficina central y las instalaciones del cliente; la infraestructura de barrio obtiene un dispositivo de transmisión de la luz pasiva, divisores ópticos, que divide el flujo de datos de una fuente de luz bidireccional, en enlaces individuales conectados a cada cliente. La arquitectura PON, es una forma de red de acceso de fibra óptica, donde el tráfico de transferencias de fibra entre el lado de la red (Interfaz de nodo de servicio) y lado de la red principal del usuario (la interfaz de usuario a red).

En el dominio óptico, el terminal óptico de línea (*Optical Line Termination, OLT*) cesa la fibra en el lado de la red, y la unidad de red óptica (*Optical Network Unit, ONU*) termina la fibra en el lado del usuario. Una red de distribución óptica (*Optical Distribution Network, ODN*), al igual que un divisor óptico sin alimentación, lo cual facilita una sola fibra óptica para atender de 16 a 128 instalaciones, se sitúa entre la OLT y la ONU, tal como se muestra en la figura 3.1.

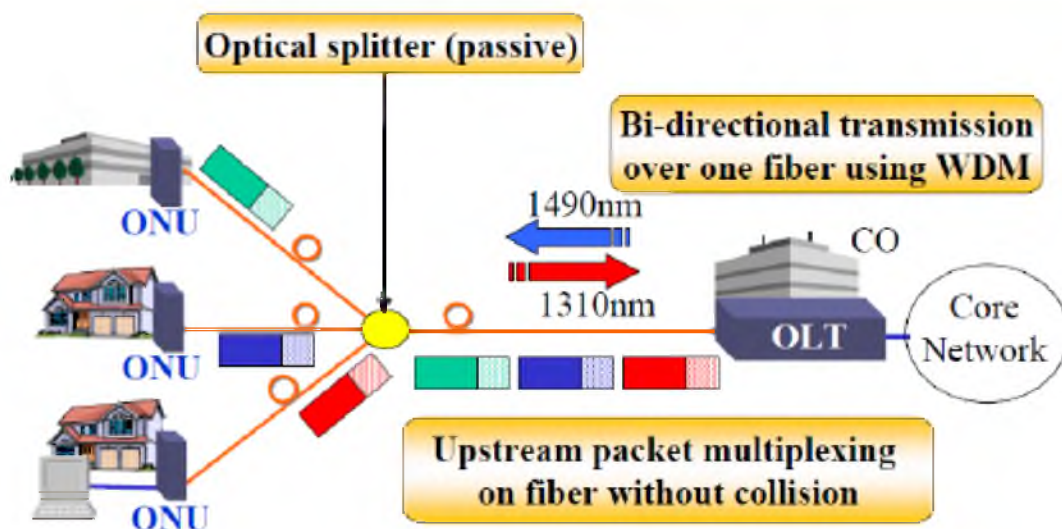


Figura 3. 1: Tecnología de redes ópticas pasivas hasta el hogar.
Fuente: (Nakano, 2016)

De la figura 3.1, la OLT se encuentra en el proveedor de servicio y conectado a las diferentes ONUs a través de un divisor de 1:32. Las ONUs están conectados a los abonados. La máxima longitud de fibra entre la OLT y ONU, también llamado alcance lógico, depende de diferentes parámetros. La atenuación de la fibra, la potencia óptica del láser, la pérdida de inserción de componentes, dispersión, otros efectos no lineales, foto sensibilidad del

detector, el margen y el rendimiento de la señal están formando el presupuesto óptico, que determina el acceso óptico.

En general, la tecnología PON es cada vez más popular, ya que disminuye el costo mediante la reducción del número de equipos de fibra y la oficina requerido. En los últimos años, las empresas de redes en todo el mundo invierten enormemente en FTTP respectivamente tecnología GPON. Las tecnologías empleadas en redes ópticas pasivas son:

a. APON/BPON:

APON, es el primer estándar de PON que estaba basada en celdas ATM. En la figura 3.2 se muestra la arquitectura típica de una APON. Esta red consiste de canales (1) downstream a 155 Mbps o 622 Mbps, (2) upstream a 155 Mbps. Es compatible con diferentes servicios, tales como, Video Digital de Banda Ancha, servicios multimedia y servicios ATM.

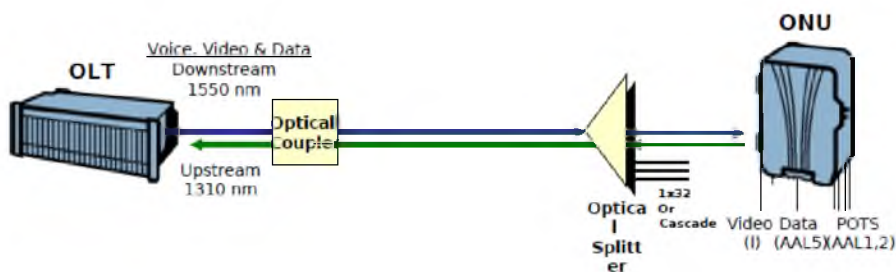


Figura 3. 2: Arquitectura típica de una APON.

Fuente: (Nakano, 2016)

Mientras que, BPON son similares a las APON pero con mayores funciones adicionales. En la figura 3.3 se muestra la arquitectura típica de una BPON. Las BPONs son compatibles con APONs, y

soporta altas tasas de transmisión en canales (1) downstream a 155 Mbps, 622 Mbps y 1244 Mbps; (2) upstream a 155 Mbps y 622 Mbps.

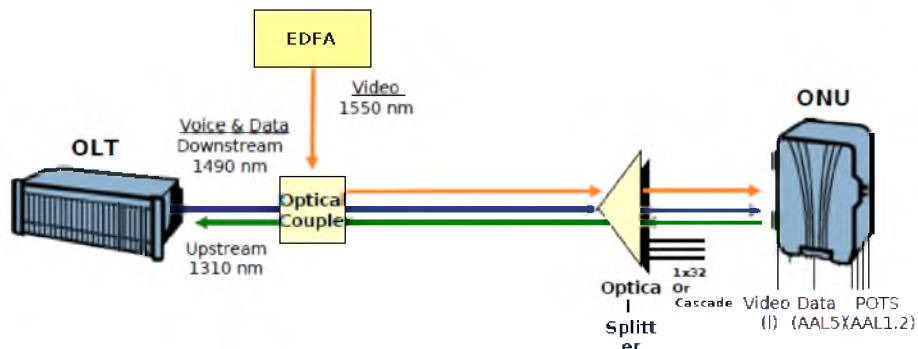


Figura 3. 3: Arquitectura típica de una BPON.
Fuente: (Nakano, 2016)

b. EPON

Todos los paquetes transportados en EPON están encapsulados en tramas de Ethernet. En la figura 3.4 se muestra una de las configuraciones de EPON con topología de árbol. EPON soporta paquetes de tamaños variables, longitud de onda similar a BPON, velocidad máxima de bits de 1 Gbps, número mínimo de splitters (divisores ópticos) 16 y se permiten diferentes configuraciones.

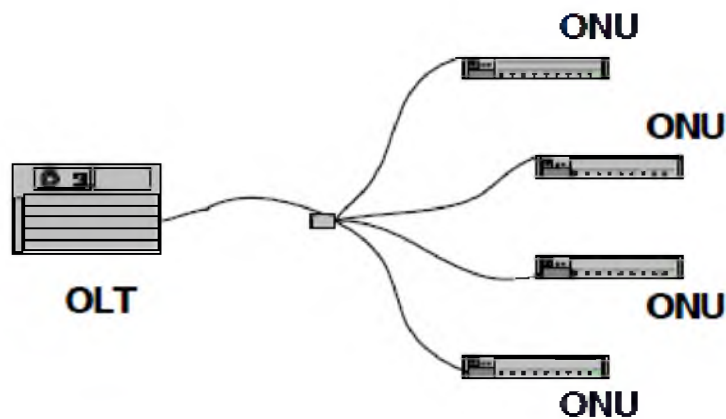


Figura 3. 4: Topología de árbol para una EPON.
Fuente: (Nakano, 2016)

c. GPON

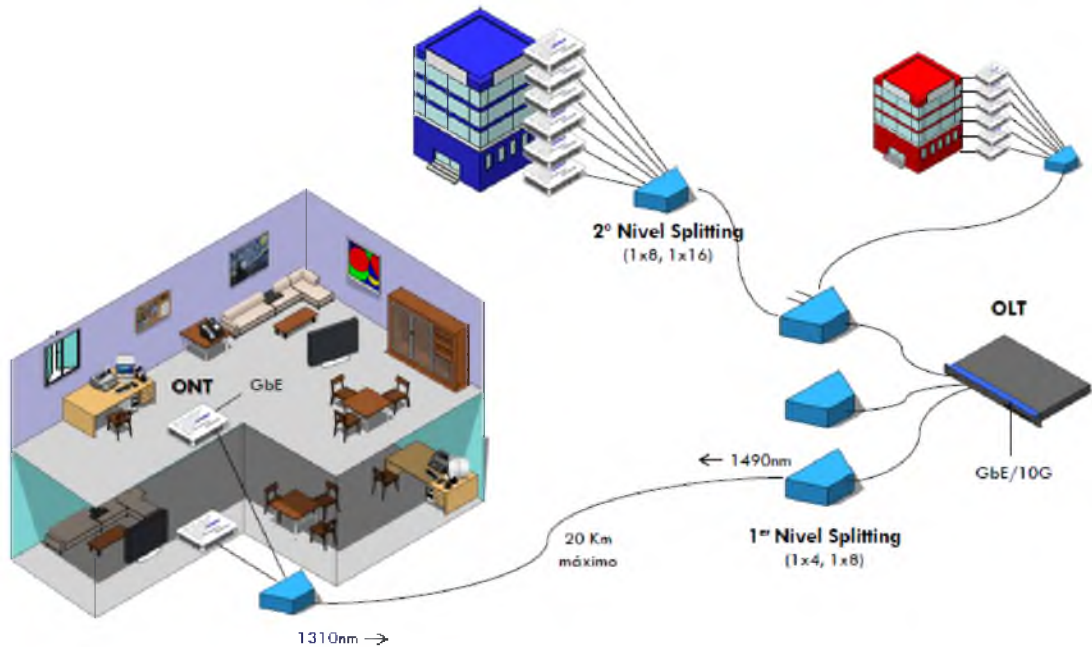


Figura 3. 5: Topología de red GPON.

Fuente: (García Y., 2016)

3.2. Diseño de modelos de simulación en OptiSystem.

Las siguientes secciones presentan el diseño de la simulación del sistema de transmisión utilizando el software OptiSystem. En la sección 3.2.1 se describe, la arquitectura de GPON y CWDM a través de RoF para una longitud de fibra de 160 km hasta el divisor y, posteriormente, a la ONU y 50 km a la WDM-DEMUX, con un total de 210 km.

En segundo lugar, la ventaja de transmisiones combinando LTE, WiMAX, y 18 longitudes de onda de banda base en GPON a través de RoF. En la sección 3.2.2, se propone GPON y CWDM a través de RoF para la transmisión de señales de red extendida a una distancia de 600 km.

3.2.1. Simulación 1: GPON CWDM a través de RoF para longitudes de 210 km.

En la figura 3.6, se muestra la topología de árbol de la configuración experimental. La dirección descendente comienza desde la cabecera GPON y OLT. Como se mencionó en la sección 3.1, la OLT es el corazón de GPON, que soporta datos descendentes de 2.5 Gbps al splitter de 32. La red se llama "red óptica pasiva" porque el divisor óptico no necesita alimentación eléctrica externa para funcionar.

El terminal óptico de línea (OLT) consta de la multiplexación CWDM, multiplexor WDM (WDM-MUX), demultiplexor WDM (WDM-DEMUX), transmisor y receptor LTE (LTE Tx y LTE Rx) y finalmente, transmisor y receptor WiMAX (WiMAX-Tx y WiMAX-Rx). Los sistemas CWDM tienen canales a longitudes de onda espaciadas a 20 nm de diferencia, en comparación con el espaciado de 0.4 nm para DWDM.

Las emisiones láser se producen en dieciocho canales a dieciocho longitudes de onda definidas: a partir de 1611 nm, 1591 nm, 1571 nm, 1551 nm, 1531 nm, 1511 nm, 1491 nm, 1471 nm y hasta 1271 nm. La inexactitud de longitud de onda o la variabilidad (tolerancia) en un láser CWDM llega hasta ± 3 nm, mientras que en un láser DWDM, la tolerancia es mucho más estrecha.

La tecnología LTE, es compatible con varios anchos de banda de transmisión escalables incluyendo 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz. La velocidad máxima de datos de destino a través del sistema RoF, es para ambos sistemas WiMAX y LTE a 1 Gbps, mientras que 100 Mbps para el sistema inalámbrico y 54 Mbps para WiMAX. Los esquemas de modulación en el rango de la capa física de QPSK sobre 16 QAM a 64 QAM y pueden ser modificados rápidamente a diferentes subportadoras para apropiarse de las diversas condiciones de recepción de los abonados. El sistema está configurado con WiMAX móvil, gracias a su esquema de transmisión (OFDMA) y el incremento de escalabilidad de los parámetros actuales de la capa física.

A continuación, la transmisión exitosa de canales WiMAX 64 QAM OFDM y LTE 64 QAM OFDM se demuestra a través de la combinación de una red GPON y el sistema de RoF. Los canales WiMAX 64 QAM y LTE 64 QAM como una función de la unidad de RF son transmitidas en las dos moduladores MZMs (Mach-Zehnder) en el OLT. El diodo láser CW tiene una potencia de salida media de 3 dBm para la frecuencia de láser 193.1 THz, ancho de línea para 10 MHz, ruido relativo dinámico de 3dB y un umbral de ruido de 100dB. El diodo láser CW-1 emite una onda de luz a 193.1 THz, en una entrada óptica del MZM-1, donde WiMAX-RF se modula para el láser. El diodo láser CW-2 emite una onda de luz a 193.2 THz para MZM-2, donde LTE-RF se modula para el láser y, posteriormente, es impulsado como una onda óptica en la fibra; primeramente puesto en marcha en WDM-MUX.

La técnica WDM, por una parte, se utiliza para garantizar la transparencia de la señal para diferentes formatos de señal de radio y para evitar interferencias con el espectro GPON CWDM. Por otro lado, las longitudes de onda de emisión de láser se optaron por una red CWDM de tono de 20 nm para operar señales a/desde la estación base requerida.

En primer lugar, la longitud de onda CWDM de 18 canales se inicia en WDM-MUX, que alimenta en combinación con LTE y WiMAX de longitud de onda CWDM en la fibra monomodo (SMF) bidireccional de 160 km hasta el divisor (splitter) de 32. El divisor bidireccional actúa como un acoplador que divide la señal óptica a una, dos, o más fibras. Estos, se emplean para distribuir los datos descendentes a 2.5 Gbps desde y hacia la OLT a las ONUs y el multiplexor WDM combina los datos ascendentes a 1.5 Gbps a partir de las ONUs y del demultiplexor WDM a una OLT.

Cada ONU es capaz de soportar 24 usuarios finales hasta 100 Mbps, y se puede utilizar en el caso de FTTP como una interfaz para la línea de cobre, o el caso de fibra hasta la acera (FTTC), sino que también se puede utilizar en FTTN. Este componente de manera uniforme divide la potencia de entrada de la señal para N puertos de salida. Los parámetros S para el divisor son:

$$S = \left[10 \log \frac{1}{N} - \alpha \right]^{<0^\circ}$$

Donde α , es la pérdida de inserción de parámetros (en dB); N es el número de puertos de salida y el índice de puerto de salida. Por último, el

demultiplexor WDM está conectado al divisor a través de una SMF de 50 km de longitud. Esta tecnología proporciona una solución atractiva para la primera milla debido al hecho, de que no requiere ninguna división de señal. Por otra parte, los sistemas WDM permiten a los abonados utilizar su propio canal de longitud de onda; los receptores LTE y WiMAX con longitudes de onda de 1552 nm y 1551 nm, respectivamente.

En los receptores WiMAX y LTE del demodulador en cuadratura, el cual implementa un demodulador analógico utilizando un generador de portadora para componentes en cuadratura Q e I, demodula la señal de RF; consta de dos filtros de paso de banda. La frecuencia de corte a 7 GHz de un filtro paso bajo se ha configurado; el demodulador OFDMA es implementado para muestras de 1024.

La banda base ascendente y las señales inalámbricas de 1.25 Gbps viajan desde el usuario a la ONU y, posteriormente, a la OLT a través de un divisor. El transmisor WiMAX y LTE (WiMAX-Tx y LTE-Tx) de longitudes de onda de 1300-1320 nm se despliegan desde un multiplexor WDM a través de una SMF de 50 km de longitud al divisor, desde allí a través de una fibra bidireccional de 160 km a la OLT. En la OLT, el demultiplexor CWDM separa las señales. El PIN convierte las señales ópticas en señales eléctricas, que irradian a través de la RAU a la LTE y al receptor WiMAX.

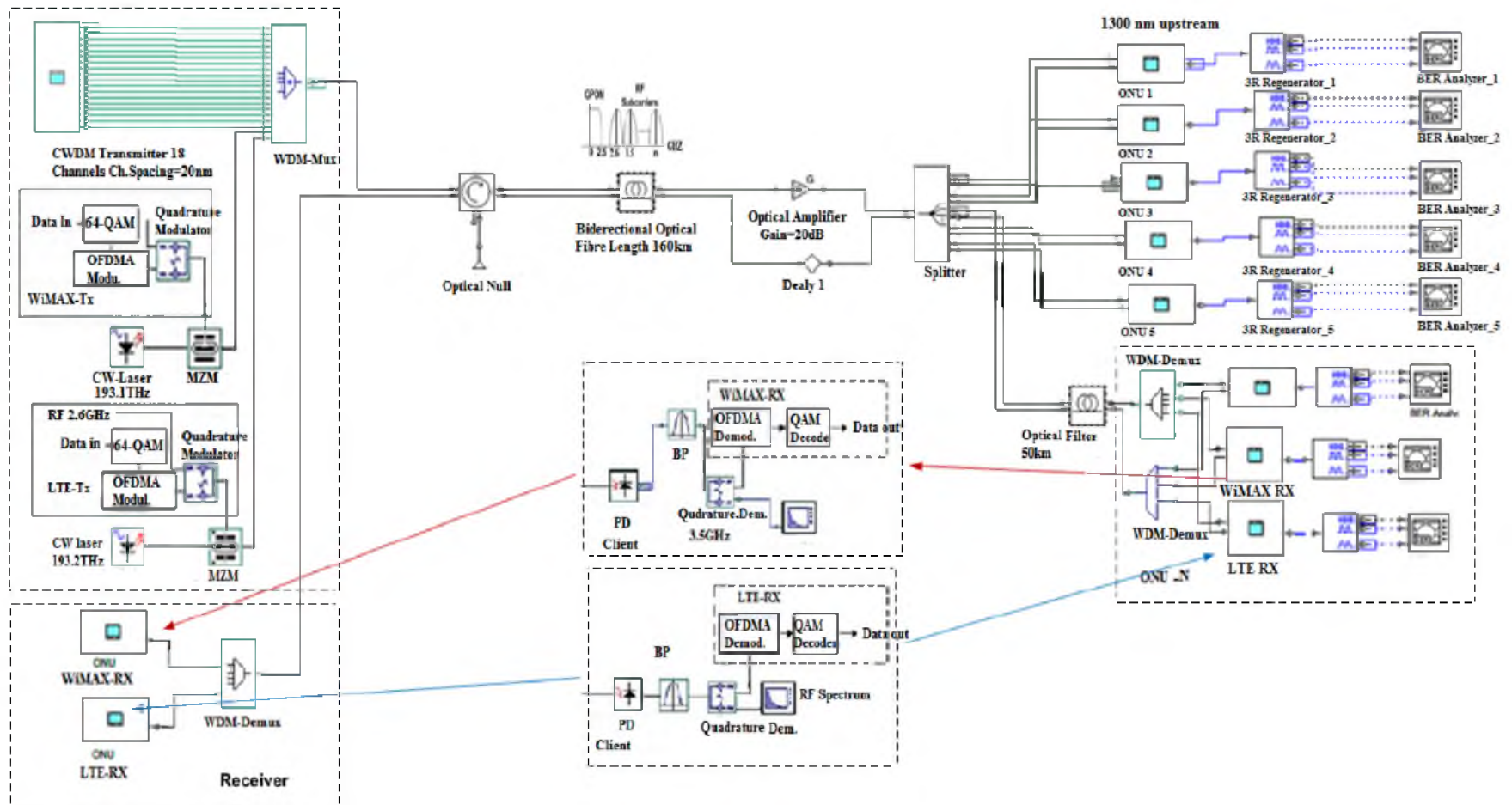


Figura 3. 6: Sistema GPON CWDM a través de RoF para transmisiones combinando WiMAX y LTE
Elaborado por: Autor.

3.2.2. Simulación 2: GPON extendida utilizando fibra SM, fibra de compensación de dispersión y rejilla de Bragg de fibra a través de RoF para distancias de 600 km.

La siguiente sección describe la configuración de la simulación de la red GPON para transmisiones a grandes distancias, que en relación a la simulación anterior son diferentes configuraciones. El sistema propuesto es ampliado, a través del despliegue de la técnica de compensación triple: SMF, DCF y CFBG.

Los downstream para 64 QAM WiMAX OFDMA y 64 QAM LTE OFDMA se transmiten como señales de RF a la fibra. El espectro de RF WiMAX oscila en 3.5 GHz y RF LTE a 2.6 GHz, que comprenden 128 subportadoras y anchos de banda de 20 MHz. En la figura 3.7 se muestra el esquema de la configuración de simulación de WiMAX y LTE a través de RoF, incluyendo las técnicas de compensación de dispersión ya mencionadas. En esta simulación, la estación base despliega los datos de WiMAX y LTE en el sistema de fibra como una señal de RF de 3.5 GHz y 2.6 GHz; en primer lugar, a la unidad de antena remota como una señal eléctrica. Posteriormente, la señal se convierte en una señal de fibra óptica mediante la modulación de la RF al rayo láser, un diodo láser que se ha encendido en el MZM y desde allí a la WDM.

La señal óptica entonces se multiplexa con longitud de onda de CWDM y es alimentado al sistema de RoF. El sistema RoF, comprende un DCF con una fibra de 25 km, dos SMF con una fibra de 125 km cada uno y otro DCF

con fibra de 25 km, conectados finalmente a la técnica CFBG, que se añade después de cada 300 km. La técnica CFBG es utilizada debido a los atenuadores de alta potencia en DCF también para minimizar la pérdida de energía en el sistema de fibra óptica y para controlar las dispersiones cromáticas en conjunción con la DCF. El ancho de banda modulado de CFBG es $\Delta\lambda = 2 \text{ nm}$, $n = 0,0006$ y tiene una longitud de 125 mm.

La disposición descrita permite un ajuste de la señal de dispersión positiva en SMF; Por lo tanto, la transmisión de la señal se puede aumentar a 600 km de longitud de fibra. El parámetro de dispersión de SMF es 16 ps/nm.km y atenuación de la señal es 0.2 dB/km ; por lo tanto, la dispersión total acumulada es $(16)(125) = 2000 \text{ ps/nm}$. La técnica de compensación DCF está configurada para dispersiones negativas de -80 ps/nm.km a 1552 nm para neutralizar señales de dispersión positiva en SMF.

El divisor bidireccional es compatible con varias longitudes de onda para una ONU, ya que la ONU es capaz de soportar 24 abonados y WDM, que posteriormente se proporciona al abonado hasta 16 canales. La señal de transmisión ascendentes de 1.25 Gbps viaja desde el abonado a la ONU y luego a la OLT a través de un divisor en longitudes de onda de 1.300 nm y 1.320 nm. A continuación, se desplaza desde los transmisores WiMAX y LTE al receptor OLT WiMAX y LTE a través del splitter y una fibra bidireccional.

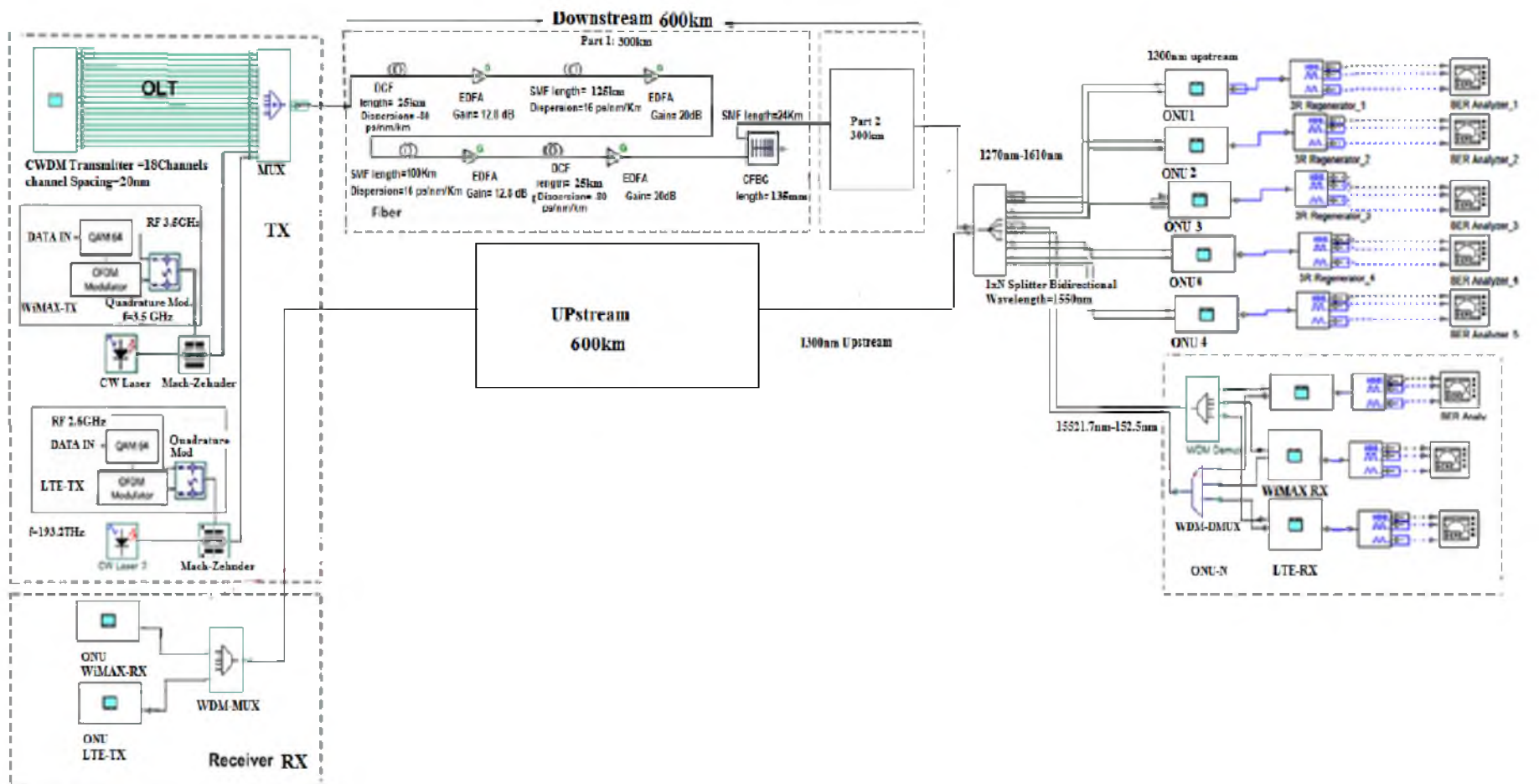


Figura 3. 7: Sistema GPON CWDM a través de RoF para 600 km de fibra.
Elaborado por: Autor.

Un diodo fotodetector en la ONU (PIN para corrientes de 10 nA y frecuencia central a 193.1 THz) convierte la potencia óptica en la señal de corriente eléctrica. Como se ha mencionado antes, la utilización del filtro gaussiano de pasa banda eléctrica establece el ruido de la señal eléctrica a un retardo mínimo y el retardo de grupo se vuelve constante para todas las frecuencias

3.3. Resultados Obtenidos.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones; en primer lugar, con respecto a la conexión de fibra de 210 km en segundo lugar, por el aumento del espacio a 600 km .

3.3.1. Resultados de la simulación 1: GPON CWDM a través de RoF para una longitud de 210 km .

En esta sección, las señales WiMAX-RF y LTE-RF como canales analógicos y 18 canales CWDM como digitales se modulan y se convierten en canales ópticos multiplexados en WDM-Mux y se transmiten a través del sistema GPON - RoF para una SMF bidireccional para longitudes una longitud de 160 km hasta el divisor bidireccional.

En el divisor bidireccional se transmite directamente a las ONUs y desde el divisor a través de la SMF bidireccional para longitud de fibra de 50 km hasta el CWDM-DEMUX, que en total se tiene una longitud de fibra de 210 km en este sistema. En el WDM-DEMUX, las longitudes de onda que transportan

LTE y WiMAX están separados y son transmitidos posteriormente a LTE y al receptor WiMAX-Rx.

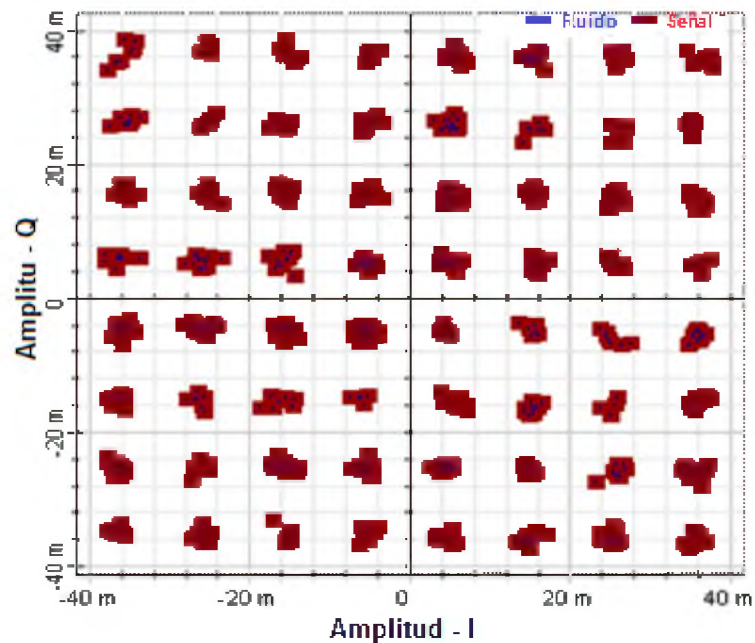


Figura 3. 8: Diagrama de constelación de la señal 64-QAM de WiMAX durante 20 km de longitud de la fibra.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.8 muestra el diagrama de constelación eléctrica de 64-QAM para el receptor WiMAX (WiMAX-Rx) a 3.5 GHz. La señal en el receptor se transmite a través de RoF sobre una SMF bidireccional en una distancia de 20 km. También muestra que hay ruido incluido, que es producida por el diodo láser y debido a la atenuación de potencia y dispersión de la señal en SMF.

La señal de banda base consigue un poco de ruido, que se refiere al ruido blanco. Los tipos de ruido en el sistema de fibra óptica causada por el diodo láser, se pueden dividir en umbral de ruido y el ruido dinámico. Los tipos de ruido PD se llaman ruido térmico y el ruido de un disparo. En la SMF

bidireccional, la señal óptica se vuelve débil después de 20 km, debido a la atenuación y la dispersión de energía de la señal así como la dispersión cromática, que afecta a la calidad de la señal.

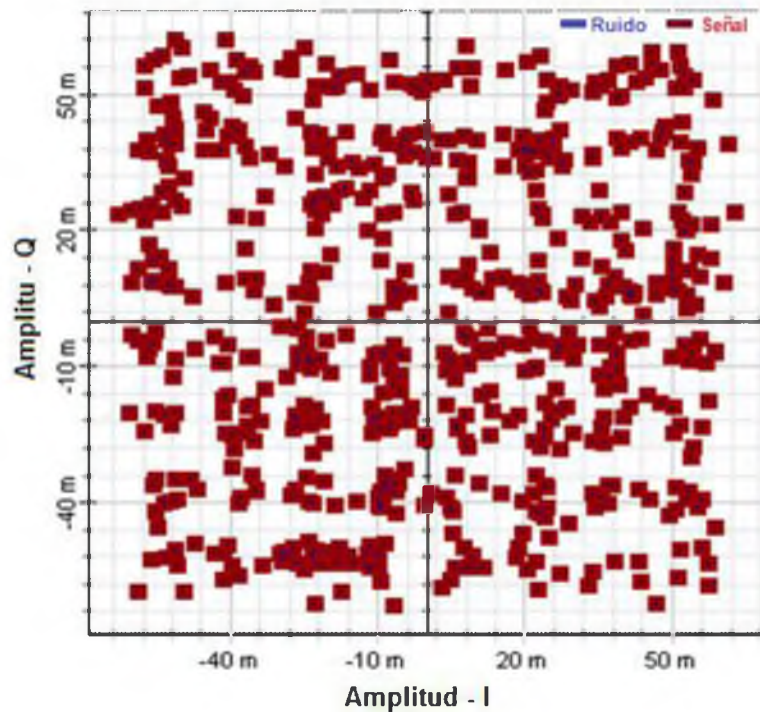


Figura 3. 9: Diagrama de constelación 64 QAM para WiMAX con longitud de fibra mayor a 210 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.9 muestra el esquema de modulación 64-QAM para la SMF después de 210 km de longitud de fibra; la constelación de señal mostrada es un poco clara como resultado del alto nivel de ruido, debido a la alta pérdida de potencia en la SMF. El tramo de transmisión de la señal es limitada, debido a la dispersión positiva de 16 ps/nm.km, que es la razón para que el impulso luminoso se propague. Esta expansión o ensanchamiento del pulso conduce a la distorsión de la señal o pérdida por cada kilómetro. En esta figura, la

calidad de la señal es baja, en comparación con la simulación de la figura 3.7, debido al aumento de la atenuación de energía por kilómetro y del ruido.

El EDFA sólo puede amplificar las señales ópticas, que obtienen una pérdida de energía mínima. Por lo tanto, el DCF y FBG se utilizan para aumentar la transmisión de la señal, mediante el control de la señal de difusión en la SMF.

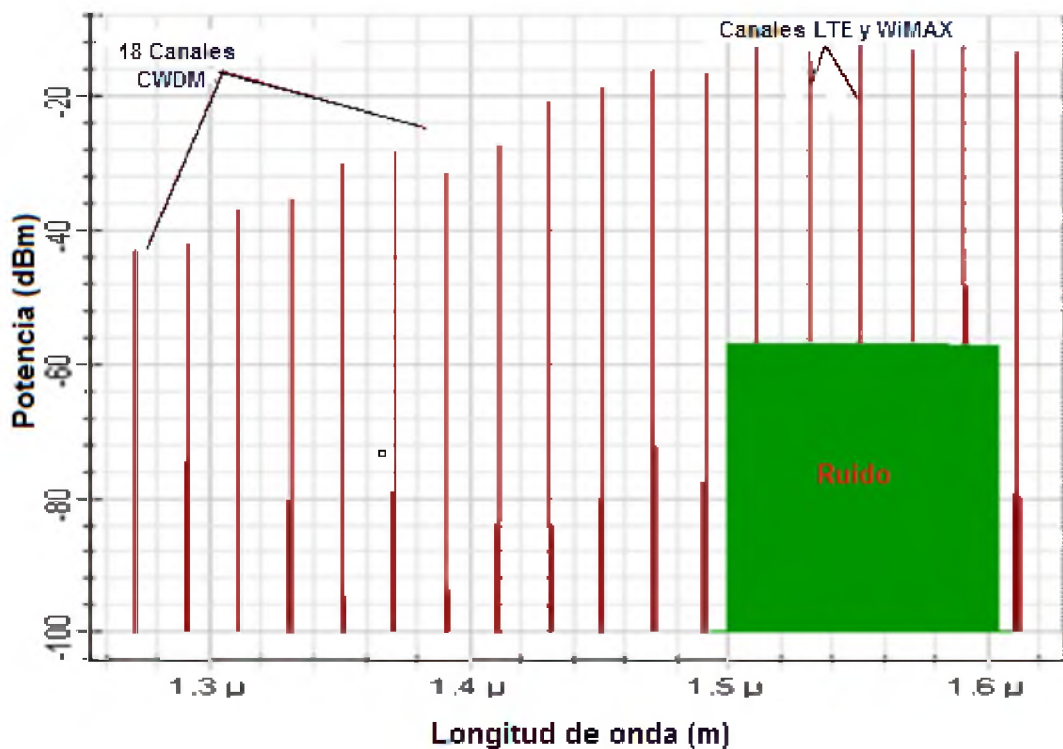


Figura 3. 10: Espectro de emisión óptica a 2.5 Gbps de señal combinada 18 canales CWDM WiMAX y LTE para SMF de longitud 210 km.
Elaborado por: Autor.

En la figura 3.10 se ilustra el espectro de emisión óptica a 2.5 Gbps para la combinación de señales de 18 canales CWDM, que representan la señal digital, también de WiMAX y LTE-Tx, representan la señal analógica. El CWDM ofrece un enfoque favorable de la entrega de 2.5 Gbps a la red de

acceso. El multiplexor WDM-Mux alimentado dentro de la SMF bidireccional para el enlace de fibra de 210 km.

El WDM multiplica la capacidad de fibra óptica por medio de la multiplexación de señales luminosas de diferentes longitudes de onda en una SMF; las longitudes de onda de fibra varían entre 1271 nm y 1611 nm, que transportan la banda base (señal digital) y las señales analógicas (LTE y WiMAX-RF). El nivel de potencia para la longitud de onda de 1271 nm oscila en -46 dB pero a partir de 1550 nm a 1622 nm, oscila en -15 dB, debido al hecho de que la atenuación de potencia es mayor en la longitud de onda de 1271 nm a 1382 nm.

La longitud de onda de WiMAX-RF es 1552.5 nm y para LTE-RF es 1551.7 nm; el área verde en el espectro que se muestra en la figura 3.10 se refiere al ruido, que se produjo a partir de la señal inalámbricas de RF y del diodo láser. Los diodos láser, por lo general implican ruido de intensidad relativa. El espectro también muestra que el nivel de energía es independiente de la longitud de onda.

Como se muestra en la figura 3.11, el rango de la pérdida de potencia de la señal después de la SMF de 210 km está en -41 a -46 dBm para diferentes longitudes de onda. La transmisión de la señal de la señal óptica sobre la SMF bidireccional alcanza los 160 km de longitud por medio de RoF al divisor bidireccional, a continuación, desde el divisor por medio de la SMF

bidireccional de 50 km de longitud al demultiplexor WDM-DEMUX, que en total da una longitud de 210 km. La potencia de la señal medida para la longitud de onda de 1271 nm en el receptor, oscila en -46dBm, para 1291 nm disminuye hasta -43dBm, y para 1311 nm a -41dB. Este resultado demuestra el nivel de potencia en el sistema óptico dependerá de la longitud de onda.

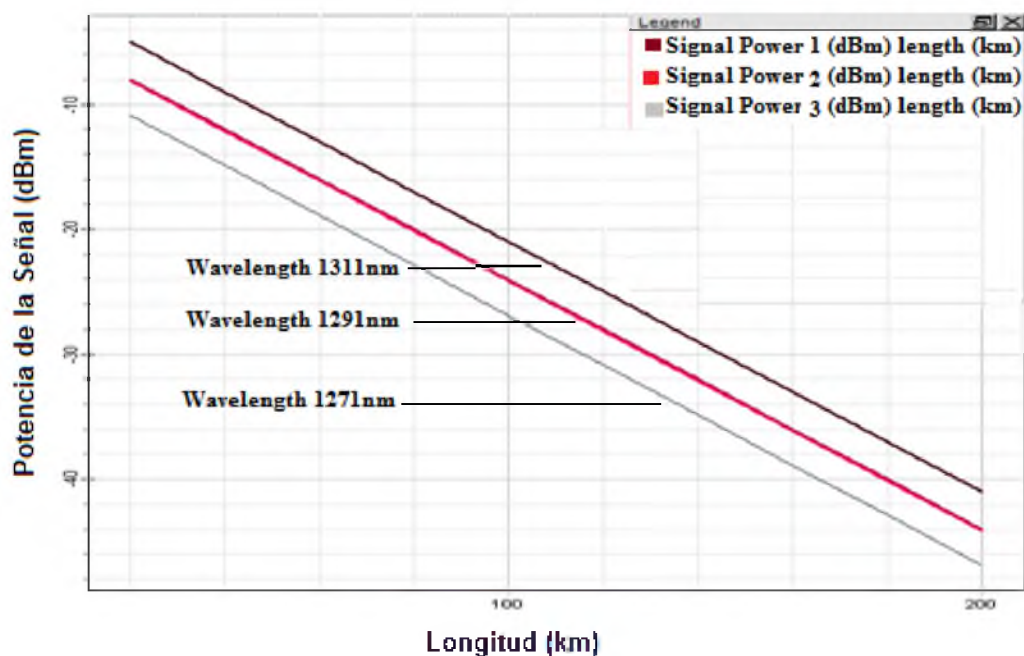


Figura 3. 11: Atenuación de potencia de señal de 8 canales en SMF; dBm por km
Elaborado por: Autor.

El diagrama de ojo es una herramienta útil para el análisis cualitativo de las señales en sistemas de transmisión digital. En la figura 3.12 se muestra una amplia abertura del diagrama de ojo de la ONU para longitudes de onda de 1551 nm y SMF bidireccional de 160 km de longitud; el factor Q se mide en el rango de 7.452. El divisor, es compatible con múltiples longitudes de onda, cada ONU obtiene una amplia abertura del diagrama de ojo con un mínimo de ruido, lo que representa una alta relación señal/ruido (SNR) y una

baja fluctuación (jitter). Adicionalmente, existe un rápido progreso cuando se centra a 400 ps, igual a 2.5 GHz; la longitud de onda tiene diferentes factores de dispersión.

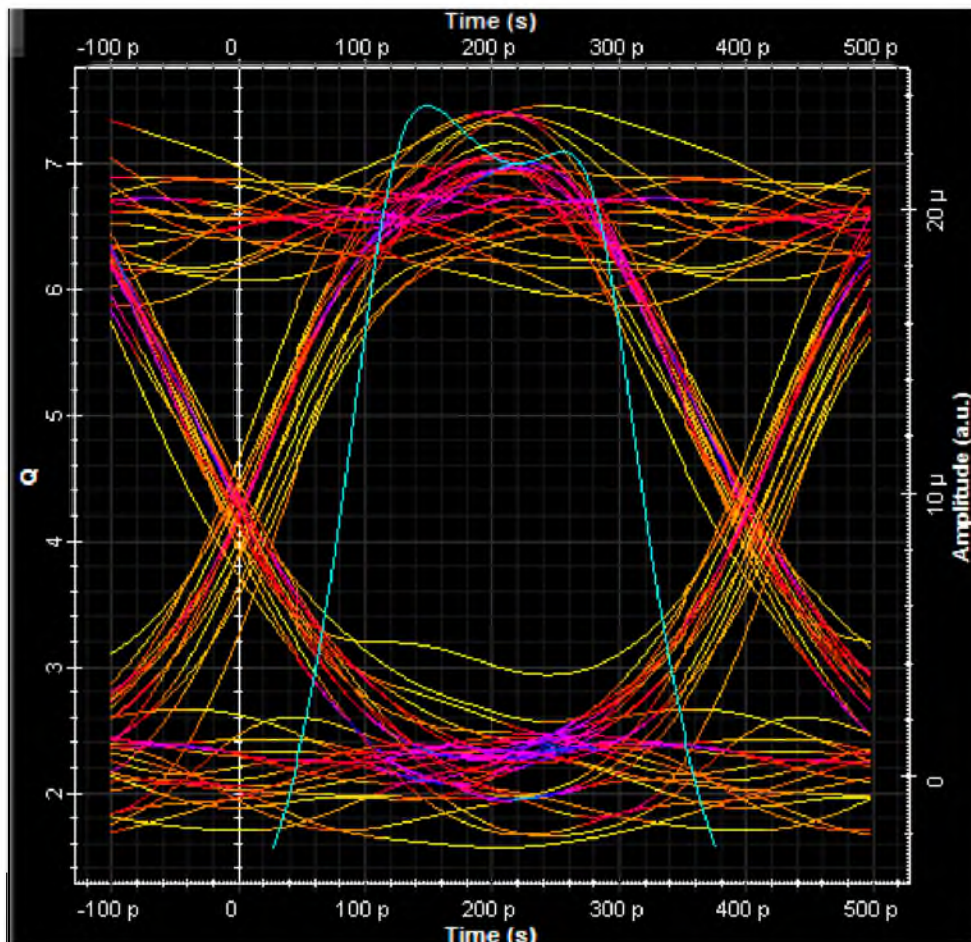


Figura 3. 12: Diagrama de ojo y el factor Q después del divisor para longitudes de ondas múltiples de la ONU para una fibra de 160 km de longitud.

Elaborado por: Autor.

El diagrama de ojo eléctrico de conversión descendente a 2.5 Gbps se muestra en la figura 3.13. El ancho de pulso de la señal transmitida a 2.5 Gbps por las ondas milimétricas ópticas (1551 nm), es de aproximadamente 400 ps para OSNR es 21.96 dB. Las curvas de la tasa de error de bits - BER y se mide en 4.5×10^{-14} con un mínimo de ruido, después de la transmisión de la señal a través de RoF en el sistema CWDM-GPON para la SMF bidireccional

de 160 km de longitud a la ONU. Además, se presenta un ojo completamente abierto para la ONU para el canal de 1.551 nm de longitud de onda.

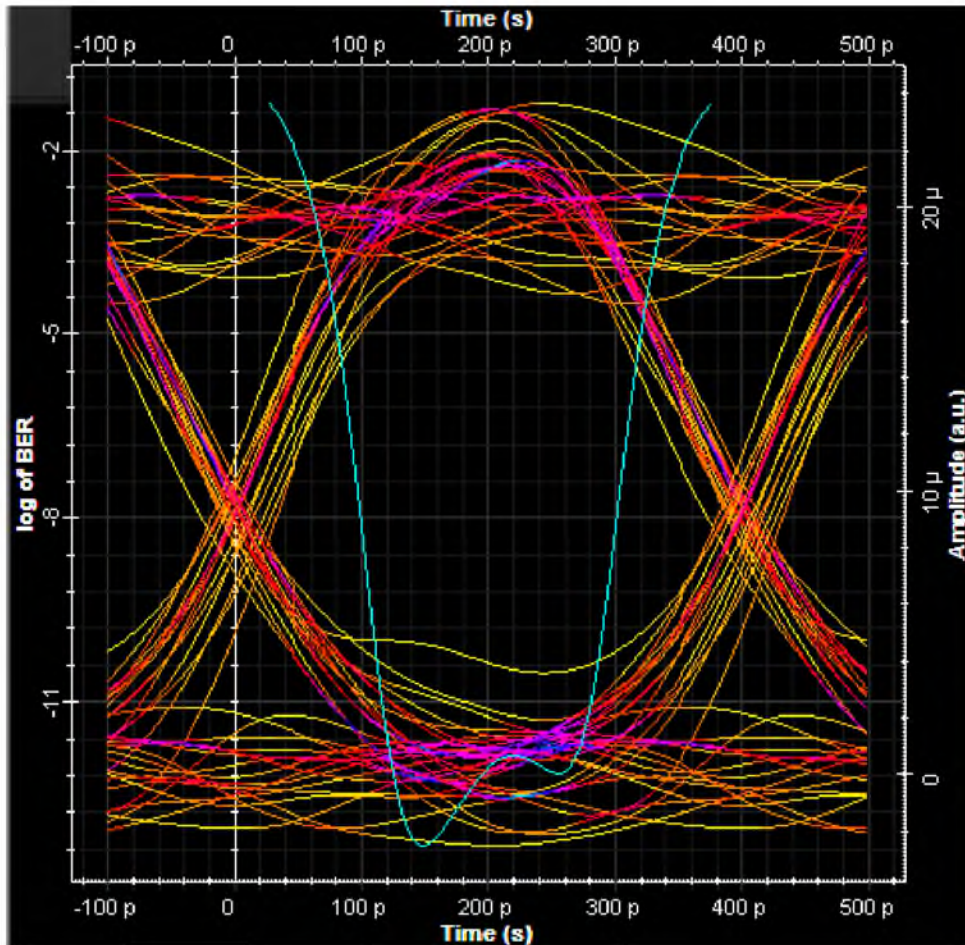


Figura 3. 13: Diagrama de ojo y la tasa de error de bits para la SMF bidireccional de 160 km de longitud.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.14 muestra un diagrama de ojo de conversión descendente de 2.5 Gbps completamente abierto para la ONU después del demultiplexor WDM-DEMUX; la BER es medida en el intervalo de 1.719×10^{-55} durante el tiempo de 400 ps y el factor Q es 15.64. Desde el divisor, las diversas longitudes de onda son alimentadas en la SMF de 50 km de longitud; la longitud de transmisión de la red GPON por medio del divisor al demultiplexor

WDM-DEMUX, es de 210 km. El CWDM-DEMUX proporciona la longitud de onda individual al usuario por medio de RAU, que cubre un área de micro celda de 1552,5 nm.

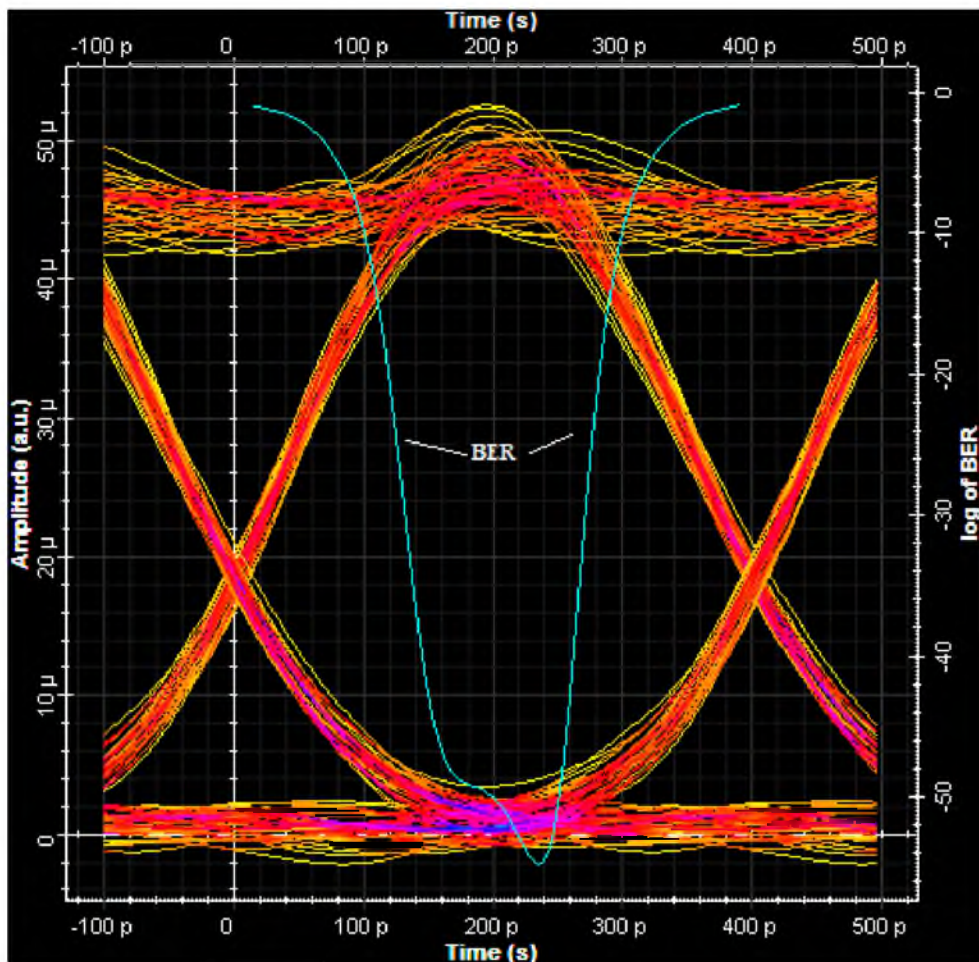


Figura 3. 14: Diagrama de ojo y rendimiento de la tasa de error de bits para WDM-ONU.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.15 muestra un diagrama de ojo de conversión descendente de 2.5 Gbps completamente abierto para la ONU después del demultiplexor WDM-Demux; el factor Q se desempeña satisfactoriamente con una medida de 28.64 para un tiempo de 400 ps y para la OSNR de 21.85 dB. Desde el divisor, las diversas longitudes de onda son alimentadas en la SMF de 50 km

de longitud; la longitud de la transmisión desde GPON a través del divisor al demultiplexor WDM-Demux, es de 210 km. El demultiplexor CWDM proporciona la longitud de onda individual al abonado por medio de RAU, que cubre un área de células micro de 1552.5 nm.

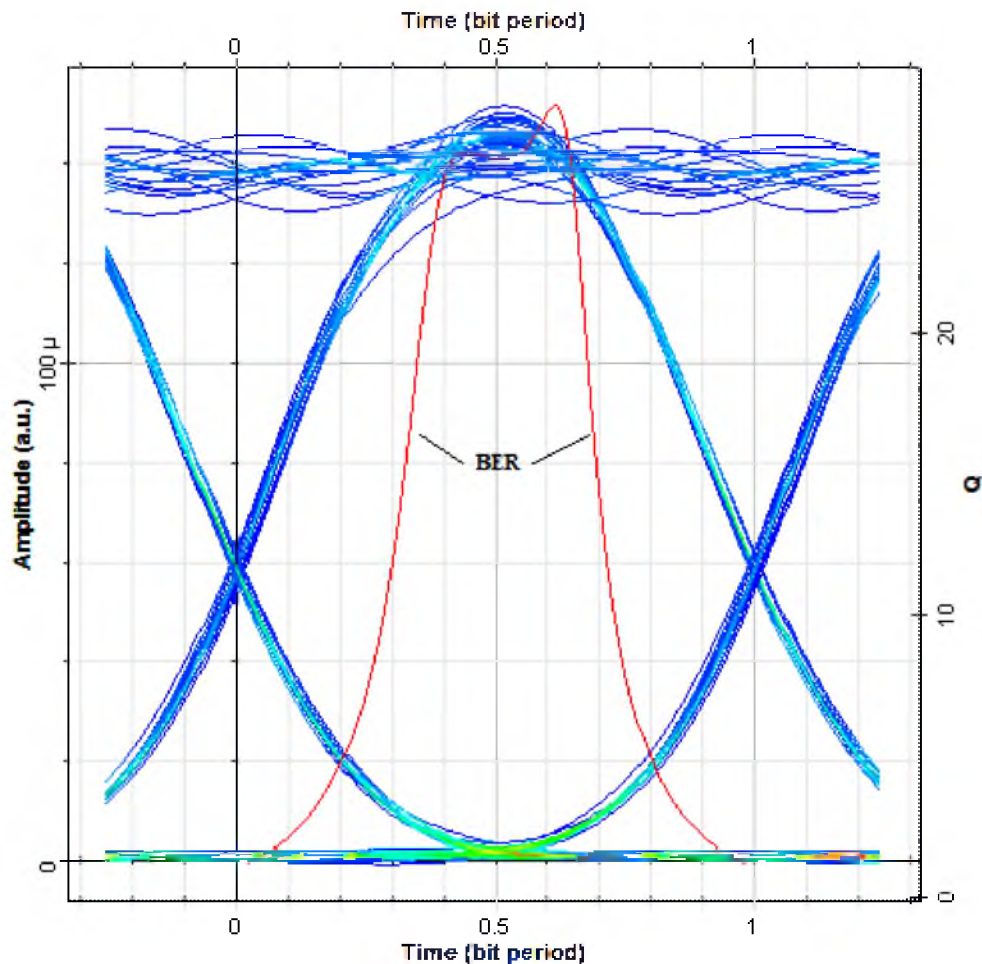


Figura 3. 15: Diagrama de ojo y Q-Factor de 210 km
Elaborado por: Autor.

La figura 3.16 muestra el espectro RF descendente del receptor 64 QAM WiMAX-Rx para la frecuencia portadora de 3.5 GHz y un ancho de banda de 20 MHz. El área del espectro de color azul se refiere a la señal y el ruido, el verde al ruido, y el rojo de la señal sin ruido. La señal se transmite a través de

la SMF bidireccional de 160 km de longitud al divisor y desde allí a través una SMF bidireccional de 50 km de longitud al demultiplexor WDM-Demux, donde la señal óptica se separa a la longitud de onda 1552.5 nm para WiMAX y 15571.7 nm para LTE. Posteriormente, la señal óptica se convierte en una señal eléctrica en el PD y se transmite al receptor WiMAX. La amplitud de potencia mide -44dBm y la OSNR es 21.85 dB.

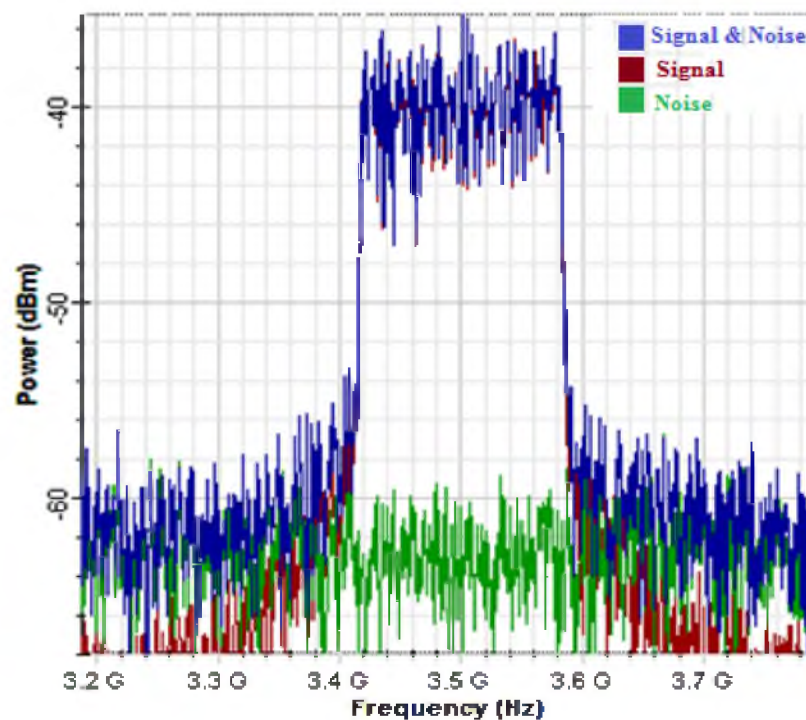


Figura 3. 16: Espectro de RF descendente del receptor WiMAX para 210 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.17 muestra el espectro RF descendente (downstream) de la modulación 64-QAM del LTE-Rx con frecuencia de portadora de 2.6 GHz y un ancho de banda de 20 MHz. El área azul del espectro, se refiere a la señal y el ruido; el verde con el ruido; y el rojo de la señal sin ruido. La señal se transmite a través de la SMF bidireccional de 160 km de longitud al divisor y

del divisor bidireccional a través de la SMF de 50 km de longitud al demultiplexor WDM-Demux. El demultiplexor WDM-Demux separa la señal óptica a la longitud de onda de LTE en 1551.7 nm. A continuación, la señal óptica se convierte en eléctrica en el PD y se transmite al receptor LTE. La amplitud de potencia mide -70 dBm y OSNR de 21.85 dB.

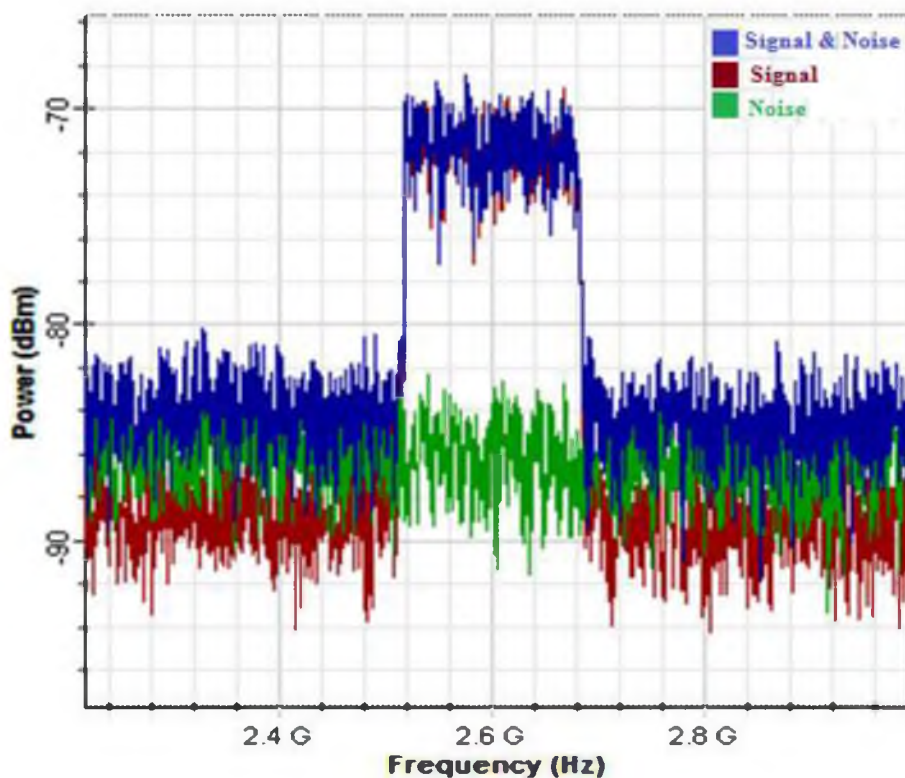


Figura 3. 17: Espectro de RF descendente del receptor LTE para 210 km
Elaborado por: Autor.

La figura 3. 18 muestra el espectro RF descendente de la modulación 64-QAM del receptor WiMAX-Rx para una frecuencia de portadora a 3.5 GHz y un ancho de banda de 20 MHz. El color azul se refiere a la señal y el ruido, la zona del espectro verde para el ruido y el rojo de la señal sin ruido. La señal se transmite desde el usuario a través de la SMF de 50 km de longitud al divisor bidireccional y desde allí a través de la SMF de 160 km de longitud al

demultiplexor WDM-Demux. El demultiplexor WDM-Demux, separa la señal óptica a la longitud de onda de WiMAX en 1300 nm. El PD convierte la señal óptica a eléctrica; posteriormente, la señal eléctrica se transmite a la estación base WiMAX. La amplitud de potencia mide -45 dBm.

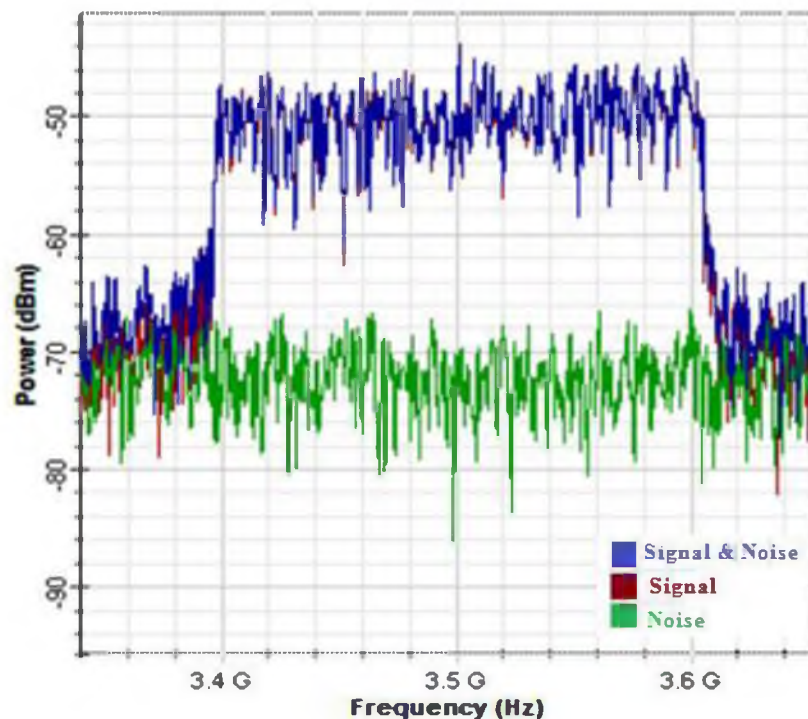


Figura 3. 18: Espectro de RF descendente del receptor WiMAX.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.19 representa el espectro RF ascendente del receptor LTE para la frecuencia de portadora de 2.6 GHz y un ancho de banda de 20 MHz. El área azul del espectro azul se refiere a la señal y el ruido, el verde con el ruido y el rojo de la señal sin ruido. La señal se transmite desde el usuario a través de la SMF bidireccional de 50 km de longitud al divisor bidireccional y desde allí a través de la SMF bidireccional de 160 km de longitud al demultiplexor WDM-Demux. El demultiplexor WDM-Demux separa la señal

óptica a la longitud de onda de LTE en 1320 nm. El PD convierte la señal óptica a eléctrica, que luego se transmite a la estación base LTE. La medida de amplitud de potencia para el receptor LTE es -40dBm.

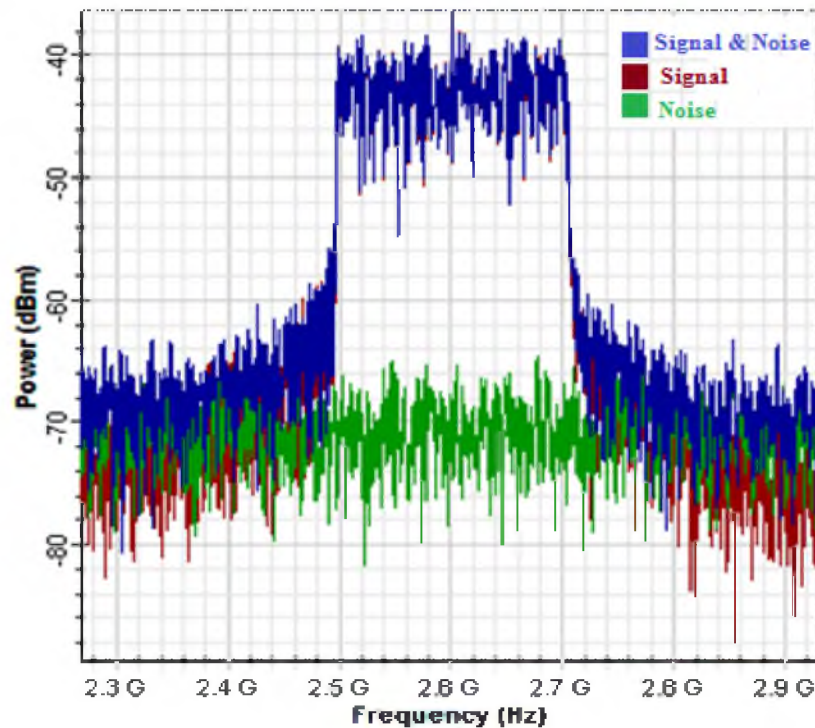


Figura 3. 19: Espectro de RF ascendente del receptor LTE.
Elaborado por: Autor.

La relación óptica de señal a ruido (OSNR), es utilizada como análisis fundamental y básico de diseño de sistemas. La OSNR designa la calidad de la señal en una red óptica mediante la identificación de la relación de la potencia de la señal a la potencia de ruido de la señal. El OSNR depende de la velocidad de bits, lo que significa que, cuanto mayor es la velocidad de bits, mayor será la OSNR. Una función de la OSNR, llamado factor de Q, enmarca una descripción cualitativa de la salida del receptor; la siguiente ecuación define la OSNR:

$$OSNR(dB) = 10\log \frac{P_{signal}}{P_{noise}} + 10\log \frac{B_m}{B_{ref}}$$

Donde P_{signal} es la potencia media de la señal; B_{ref} es el ancho de banda óptico referencial, que normalmente es 0,1 nm a 1550; P_{noise} es la potencia de ruido óptico; B_m es el ruido de ancho de banda equivalente de un analizador de espectro óptico. El ruido se produce en el diodo láser transmisor de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA). La OSNR se mide para probar la cualificación de los canales individuales.

Tabla 3. 1: Relación óptica de señal a ruido - OSNR para una fibra de 160 km de longitud.

Frequency (THz)	Input OSNR (dB)	Output Signal (dBm)	Output OSNR (dB)
188.43021	95.991313	-11.008945	22.070897
190.82906	95.858411	-11.141822	21.883632
193.28979	95.991494	-11.008802	21.960329
195.8148	95.857409	-11.142859	21.770274
198.40666	95.991901	-11.008347	21.84696

Elaborado por: Autor.

La tabla 3.1 muestra la frecuencia ópticas de RF a través de la SMF de 160 km de longitud al divisor, también para cada frecuencia de entrada y salida de la OSNR del enlace final de SMF, y la potencia de señal de salida en dBm. La OSNR más alta se produce en la longitud de onda de 1591 nm (a una frecuencia de 188.43 THz), debido al pico bajo de la SMF estándar, que se refiere a la pérdida de baja potencia en las longitudes de onda de 1550 nm a 1591 nm. La OSNR más bajo está en la longitud de onda de 1531 nm (195.81 THz), debido al pico bajo de la SMF. La diferencia entre el OSNR en la entrada y al final de la SMF después de 160 km es 73.92 dB.

Tabla 3. 2: Relación señal a ruido óptico - OSNR para una fibra de 210 km de longitud.

Frequency (THz)	Signal Power (dBm)	Noise Power (dBm)	OSNR (dB)
188.43021	-10.040243	-32.002975	21.962732
190.82906	-10.173425	-31.948587	21.775162
193.28979	-10.040107	-31.892063	21.851956
195.8148	-10.174921	-31.836266	21.661344
198.40666	-10.040265	-31.77844	21.738174

Elaborado por: Autor.

En la tabla 3.2 e muestra la OSNR en el demultiplexor WDM-Demux después del divisor para la SMF de 50 km de longitud; la pérdida de potencia media en el divisor es 73.43 dBm. Una pérdida de potencia de 0.11 dB puede ser reconocido por la duración del divisor al demultiplexor WDM. Como resultado, la más alto OSNR se produce en la longitud de onda de 1591 nm (a una frecuencia de 188.43 THz), debido al baja pico de la SMF estándar, que se refiere a la pérdida de baja potencia en las longitudes de onda 1.550 nm a 1590 nm; la pérdida de alta potencia se plantea en las longitudes de onda de 1371 nm a 1391 nm. Las frecuencias desde 188.4 THz a 198.4 THz se destacan con relación a las longitudes de onda de 1591 nm a 1511 nm, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1. Conclusiones.

- En los fundamentos teóricos se describieron los enlaces de transmisión óptica convencional, los componentes ópticos básicos y tecnologías de los sistemas de Radio sobre Fibra – RoF, que incluyeron configuraciones típicas de enlaces RoF, las mismas que fueron apoyadas por la generación de técnicas de generación y transporte de ondas milimétricas y sistemas ROF combinados con WDM.
- De acuerdo al potencial que RoF puede soportar, con poca infraestructura para brindar servicios de banda ancha y ventajas tales como la rentabilidad, fácil implementación, las redes RoF serán una alternativa prometedora integrando redes inalámbricas.
- Durante el diseño de la simulación de un sistema GPON y de RoF combinado con redes inalámbricas WiMAX y LTE, se observó el comportamiento del espectro de RF y de banda base con velocidades de 2.5 Gbps para enlaces descendentes y 1.25 Gbps para enlaces ascendentes.
- Las señales viajaron a través de la fibra monomodo de 160 km de longitud al splitter de 32 y de ahí fueron transmitidas directamente a la ONU también al demultiplexor CWDM vía SMF bidireccional 50 km de longitud, que para la primera simulación el total de longitud de la fibra es 210 km. En el demultiplexor CWDM, la señal óptica se separa a la longitud de onda de LTE y WiMAX.

- El despliegue de una topología de red diferente que utilice las compensaciones DCF y FBG en combinación con SMF superó el problema de la dispersión cromática y de la atenuación de potencia en fibra SMF. Por lo tanto, se logró una extensión de la distancia de transmisión a 600 km. Los resultados mostraron una OSNR satisfactoria, muy buena tasa de error de bits, diagrama de ojo muy abierto y también un claro espectro de RF.
- El amplificador de potencia óptica para la longitud extendida utiliza 151.2 dB, que es una pequeña cantidad en comparación con la transmisión de señales a través del aire para una distancia aún mucho más corta. La pérdida de trayectoria de 3.5GHz WiMAX RF, entre la antena de la estación base de alta 30m y la antena de la estación de alta suscriptor 2m, oscila a 165 dB para la distancia de 5 km.

4.2. Recomendaciones.

- Realizar futuros trabajos de titulación en la que se despliegue el análisis mediante simulación de redes GPON y sistemas RoF pero utilizando modulaciones digitales OOK, DQPSK, entre otras.
- Adquirir herramientas o plataformas de simulación con licencia profesional, para que los estudiantes y/o investigadores de la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, utilicen poderosas y robustas herramientas de modelación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre O., K., Restrepo R., F., Velásquez, J., Amaya F., F., & Betancur A., L. (2015). Arquitectura óptica inalámbrica para la transmisión de señales de radio sobre fibra para aplicaciones de ciudades inteligentes. *Simposio de Investigación USTAMED*, 203-208.
- Cardona F., J., & Fernández C., L. (2009). *Estudio de Técnicas de Modulación para enlaces ópticos*. Cataluña: Repositorio de la UPC.
- García T., J. (2009). *Análisis y Evaluación Comparada de Redes de Acceso GPON y EP2P*. Cataluña: Editorial UPC.
- García Y., A. (2016, Enero 12). *GPON y GPON Doctor: Introducción y Conceptos Generales*. Retrieved from <http://www.ccapitalia.net/descarga/docs/2012-gpon-introduccion-conceptos.pdf>
- Kothari, C. (2004). *Research Methodology: Methods and Techniques*. New Delhi: New Age International.
- Kramer, G., De Andrade, M., Roy, R., & Chowdhury, P. (2012). Evolution of optical access networks: Architectures and capacity upgrades. *Proceedings of the IEEE*, 1188-1196.
- López B., M., Moschim, E., & Rudge B., F. (2009). Estudio Comparativo de Redes GPON y EPON. *Scientia et Technica*, 321-326.

- Morales S., J. (2015). *Estudio de la Evolución y Tendencia de la Tecnología RoF*. Guayaquil: Repositorio Digital Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Nakano, Y. (2016, Enero 20). *ITU*. Retrieved from https://www.itu.int/ITU-T/worksem/ngn/200604/presentation/s6_nakano.pdf
- Navarro V., J. (2015). *Simulación de Señales Distribuidas en RoF para redes WiMAX a través de la modulación OFDM y 64-QAM*. Guayaquil: Repositorio Digital Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Navarro, S., Joyanes A., L., Pérez M., L., & Camilo, W. (2011). Análisis de la Red Óptica Pasiva con Capacidad de Gigabit a través de las Redes de Fibra Óptica de la Empresa de Transmisión Eléctrica Dominicana de la Ciudad de Santo Domingo. *Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, LACCEI*, 1-10.
- Robles S., J., & Guanotasig M., B. (2014). *Estudio y diseño de una red de fibra óptica con tecnología GPON red óptica pasiva con capacidad de gigabit para el edificio matriz de la Universidad Tecnológica Israel implementada en una maqueta técnica de medición y pruebas*. Quito: Repositorio Digital Universidad Israel.
- Ruiz L., D. (2015). *Estudio Comparativo y Simulación de las Tecnologías PON tradicionales y emergentes*. Quito: Repositorio Digital Universidad Politécnica Salesiana.

Tinoco A., J. (2011). *Estudio y Diseño de una Red de Fibra Óptica FTTH para brindar servicios de voz, video y datos para la Urbanización Los Olivos ubicada el sector Toctesol en la Parroquia Borrero de la Ciudad de Azogues*. Cuenca: Repositorio Digital Universidad Politécnica Salesiana.



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



SENESCYT
Secretaría Nacional de Educación Superior,
Ciencia, Tecnología e Innovación

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN** con C.C: # 0927371716 autor del Trabajo de Titulación: **SIMULACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA CON CAPACIDAD DE GIGABIT Y DE RADIO SOBRE FIBRA PARA SER UTILIZADA EN TRANSMISIONES INALÁMBRICAS WiMAX Y 4G-LTE** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 14 de marzo de 2016

f. _____
Nombre: HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN
C.C: 0927371716



REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	SIMULACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA CON CAPACIDAD DE GIGABIT Y DE RADIO SOBRE FIBRA PARA SER UTILIZADA EN TRANSMISIONES INALÁMBRICAS WiMAX Y 4G-LTE		
AUTOR(ES) (apellidos/nombres):	HENRY MANUEL PAUCAR VILLÓN		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES) (apellidos/nombres):	M. Sc. EDWIN F. PALACIOS MELÉNDEZ		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	14 de marzo de 2016	No. DE PÁGINAS:	84
ÁREAS TEMÁTICAS:	Fundamentos de Comunicaciones, Sistemas de Comunicaciones, Fibra Óptica		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	COMUNICACIONES ÓPTICAS, RoF, GPON, WiMAX y 4G		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Actualmente los sistemas de telecomunicaciones más implementados son las redes ópticas pasivas – PON, para lo cual se realizó una descripción general de la tecnología de PONs, así como también se caracterizó los sistemas de Radio sobre Fibra – RoF. Los sistemas RoF permiten integrar o combinar otras tecnologías tales como las comunicaciones inalámbricas: WiFi, WLAN, WiMAX, 3G, 3.5G y 4G-LTE. Aunque, en nuestro país se desconoce que empresas públicas o privadas utilicen sistemas de RoF para combinarse con redes WiMAX o LTE, que son parte del trabajo de titulación. Posteriormente, el software apropiado para el diseño de las simulaciones fue la plataforma OptiSystem, el cual es muy utilizado para modelar sistemas de comunicaciones ópticas. Los dos escenarios escogidos para modelar una red GPON y de RoF permitieron comprobar el rendimiento de la tasa de error de bits, lo cual resulto exitoso de acuerdo a los parámetros que fueron modificados durante la simulación.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: 042665590 0993744497	E-mail: henrypaucar03@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	Teléfono: 0968366762		
	E-mail: edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec		

SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA

Nº. DE REGISTRO (en base a datos):	
Nº. DE CLASIFICACIÓN:	
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):	