



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL
DESARROLLO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

TEMA:

**Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando
técnicas de modulación en sistemas RoF**

AUTOR:

Torres Avilés, Guilbert Andrés

Componente práctico del examen complejo previo a la
obtención del grado de **INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES**

REVISOR:

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, Ecuador

10 de marzo del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Torres Avilés, Guilbert Andrés** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, Torres Avilés, Guilbert Andrés

DECLARÓ QUE:

El componente práctico del examen complejo, Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

TORRES AVILÉS, GUILBERT ANDRÉS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

AUTORIZACIÓN

Yo, Torres Avilés, Guilbert Andrés

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

TORRES AVILÉS, GUILBERT ANDRÉS

REPORTE DE URKUND

URKUND

Documento: [Torres_Guilbert.docx](#) (D97232884)

Presentado: 2021-03-04 11:04 (-05:00)

Presentado por: fernandopm23@hotmail.com

Recibido: edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com

Mensaje: Revisión EC Guilbert Torres [Mostrar el mensaje completo](#)

2% de estas 16 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Lista de fuentes Bloques Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

- <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/15...>
- <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12...>
- <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/54...>
- <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13...>
- https://www.researchgate.net/profile/Andres_Es...

Fuentes alternativas

- <http://192.188.52.94:8080/bitstream/3317/12729/...>
- [Jorge_Diaz_TT_2018.docx](#)

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

TEMA:

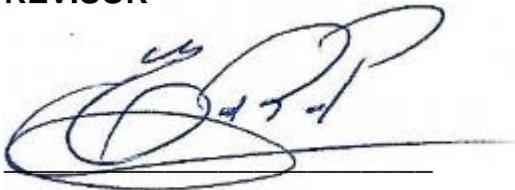
Análisis
del desempeño de una red óptica pasiva
utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF

AUTOR: Torres Avilés, Guilbert Andrés

Componente práctico del examen complejo
previo a
la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

REVISOR: M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

REVISOR



M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación a mis padres, Cecilia Avilés y Guilbert Torres. Quienes durante el año 2020 tuvieron una gran afectación a su salud con enfermedades graves. Hoy siguen luchando y cuidándose, lo cual se ve reflejado poco a poco en su mejoría. Desde pequeño, me forjaron para ser la persona que soy en la actualidad. Muchos de mis logros se los debo a ellos, entre los que se incluye este. Sé que con la bendición de Dios se recuperarán por completo. Espero hacerlos sentir orgullosos de mí, así como yo me siento por ellos.

EL AUTOR

TORRES AVILÉS, GUILBERT ANDRÉS

AGRADECIMIENTO

Mi sincero agradecimiento a mi tutor y decano de la facultad, M. Sc. Manuel Romero Paz, quien con sus conocimientos y apoyo me supo guiar a través de cada una de las etapas de este trabajo de titulación para alcanzar los resultados que buscaba.

También quiero agradecer a los ingenieros docentes, que a lo largo de la carrera universitaria me compartieron sus conocimientos y consejos para escalar en el ámbito académico y humano.

Y de manera especial, agradezco a mi familia; mis hermanas y mis padres. Quienes fueron mi soporte y pilar desde que inicié hace algunos años esta etapa de mi vida hasta la actualidad. Siempre me dieron el empujón que necesitaba cuando tenía caídas, mediante palabras reconfortantes, consejos y calor de hogar. Sin su apoyo moral, económico y emocional esto no sería posible.

EL AUTOR

TORRES AVILÉS, GUILBERT ANDRÉS



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. _____
M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS
DECANO

f. _____
M. Sc. HERAS SÁNCHEZ, MIGUEL ARMANDO
DIRECTOR DE CARRERA

f. _____
M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
OPONENTE

Índice General

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Resumen	XIV
Capítulo 1: Descripción del componente práctico	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivo General.	3
1.3. Objetivos Específicos.	3
Capítulo 2: Fundamentación teórica.	4
2.1. Introducción a RoF.	4
2.2. Tecnología de radio sobre fibra.	5
2.3. Beneficios de la tecnología RoF	7
2.3.1. Pérdida de atenuación baja	7
2.3.2. Gran ancho de banda	8
2.3.3. Inmunidad a las interferencias de radiofrecuencia	9
2.3.4. Fácil instalación y mantenimiento	9
2.3.5. Consumo de energía reducido	10
2.4. Aplicaciones de la tecnología de radio sobre fibra.....	10
2.4.1. Redes celulares	11
2.4.2. LAN inalámbricas.....	11
Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.....	14
3.1. Descripción del modelo de simulación.....	14
3.2. Modelo de simulación del sistema PON-WDM,	14
3.3. Comparación entre dos métodos de modulación externa en RoF-PON.	16
3.4. Comparación de los métodos de modulación DSB, SSB y OCS en una red óptica pasiva usando WDM.....	22

3.5.	Señales de RF moduladas mediante el formato OFDM.....	25
3.5.1.	Señales OFDM mediante modulación QAM.....	27
3.5.2.	Señales OFDM mediante modulación PSK.....	30
3.6.	Discusión de los resultados obtenidos.....	32
	Conclusiones	33
	Recomendaciones.....	34
	Bibliografía.....	35

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de radio sobre fibra.....	6
Figura 2. 2: Diagrama de bloques conceptual del sistema de radio sobre fibra.	6
Figura 2. 3: Regiones de la primera, segunda y tercera ventana de operación de fibra óptica.	7
Figura 2. 4: Aplicación de radio sobre fibra en redes de telefonía celular. ...	11
Figura 2. 5: Aplicación de radio sobre fibra en redes WLAN	12

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Modelo de simulación de un sistema PON-WDM.....	15
Figura 3. 2: Gráfica de la BER para las modulaciones DSB y SSB utilizando una SMF de 80 km.	17
Figura 3. 3: Gráfica de la OSNR vs BER para las modulaciones SSB y DSB utilizando una SMF de 80 km.	18
Figura 3. 4: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación SSB a 80 km.	18
Figura 3. 5: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación DSB a 80 km.	19
Figura 3. 6: BER de SSB y DSB cuando se utiliza SMF de 130 km.	20
Figura 3. 7: OSNR vs BER de SSB y DSB cuando se usa SMF de 130 km.	20
Figura 3. 8: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación SSB a 130 km.	21
Figura 3. 9: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación DSB a 130 km.	21
Figura 3. 10: Diagrama de ojo para modulación OCS en PON-WDM a 80 km.	23

Figura 3. 11: Diagrama de ojo para modulación SSB en PON-WDM a 80 km.	24
Figura 3. 12: Diagramas de ojo para modulación DSB en PON-WDM a 80 km.	24
Figura 3. 13: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación 64-QAM.	26
Figura 3. 14: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación 16-QAM.	26
Figura 3. 15: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación BPSK.	27
Figura 3. 16: Constelación de señales recibidas de 64-QAM después de 40 km SMF.	28
Figura 3. 17: Constelación de señales recibidas de 64-QAM después de 40 km SMF.	28
Figura 3. 18: Gráfica de OSNR vs BER para la modulación 16-QAM después de 40 km.	29
Figura 3. 19: Gráfica de OSNR vs BER para la modulación 64-QAM después de 40 km.	29
Figura 3. 20: Constelación de señales recibidas de 8-PSK después de 40 km SMF.	30
Figura 3. 21: Constelación de señales recibidas de 16-PSK después de 40 km SMF.	30
Figura 3. 21: OSNR vs BER de la señal recibida cuando 8-PSK y 16-PSK se utilizan a 20 Gb/s.	31

Índice de Tablas

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Factor de calidad (Q) para las modulaciones SSB y DSB a diferentes longitudes de SMF.	22
Tabla 3. 2: Factor de calidad (Q) para las modulaciones SSB, DSB y OSC a diferentes longitudes de SMF.	23
Tabla 3. 3: Métricas para el sistema PON-WDM propuesto a diferentes longitudes de SMF.....	25
Tabla 3. 4: Métricas para el sistema OFDM propuesto para la modulación 16-QAM y 64-QAM.	29
Tabla 3. 5: Métricas para el sistema OFDM propuesto para la modulación 8-PSK y 16-PSK.	31

Resumen

El presente documento presenta el desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado “Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF”. Primero se presenta una breve descripción del componente práctico, así como el objetivo general y los objetivos específicos propuestos para evidenciar la parte práctica de la formación como futuro ingeniero en telecomunicaciones. En el capítulo 2 se presenta los fundamentos teóricos de la tecnología, beneficios y aplicaciones de los sistemas de radio sobre fibra (Radio over Fiber, RoF). En el capítulo 3 se crean los escenarios de simulación para la multiplexación por división de longitud de onda (DWM) en una red óptica pasiva (Passive Optical Network, PON) y para sistemas de radio sobre fibra aplicando diferentes técnicas de modulación digital utilizando el software OptiSystem. En cada escenario de simulación se presentan los resultados obtenidos para cada prueba realizada y su respectivo análisis.

Palabras claves: Redes, Acceso, Pon, Multiplexación, Comunicaciones, Radio.

Capítulo 1: Descripción del componente práctico

1.1. Introducción.

Se han realizado muchos estudios en relación con las redes de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), radio sobre fibra (RoF) y multiplexación por división de longitud de onda (WDM) para transformar algo que pueda mejorar la eficiencia en redes de acceso de alta velocidad y bajo costo. Todos los investigadores deben enfrentar grandes desafíos en el diseño de redes de acceso de calidad que puedan cumplir con los criterios anteriores para las necesidades de los consumidores en términos de velocidad y eficiencia de transmisión de datos. Por lo tanto, la comprensión de cada componente de la red de acceso, como OFDM, WDM y RoF, tiene una gran demanda urgente.

OFDM es un método de codificación de la transmisión de datos digitales en varias frecuencias portadoras. Por ejemplo, en los sistemas de comunicaciones móviles, la técnica OFDM trabaja en la división de un espectro de radio en varios subcanales en la estación base. En conjunto, la intensidad de la señal en el subcanal y el número de canal asignado a los diferentes dispositivos se pueden cambiar según sea necesario. Hoy en día, OFDM es muy popular para la comunicación digital de banda ancha, tanto alámbrica como inalámbrica. En un contexto amplio, se utiliza en aplicaciones tales como televisión digital y radiodifusión de audio, acceso a Internet de banda ancha DSL, redes inalámbricas y comunicaciones móviles 4G.

Además, la multiplexación por división de longitud de onda (WDM) es una técnica de multiplexación para que el sistema de fibra óptica multiplexe varias señales portadoras ópticas en una sola fibra óptica utilizando diferentes longitudes de onda (es decir, colores) de luz láser para transportar diferentes señales. Esta técnica permite multiplicar la capacidad y es posible realizar comunicaciones bidireccionales sobre un hilo de fibra óptica.

Radio sobre fibra (RoF) se refiere a una tecnología mediante la cual la luz se modula mediante una señal de radio y se transmite a través de un

enlace de fibra óptica para facilitar el acceso inalámbrico. Aunque la transmisión de radio a través de fibra sirve para múltiples propósitos en redes de televisión por cable (CATV) y estaciones base de satélite, el término RoF generalmente se aplica cuando hay acceso inalámbrico.

1.2. Objetivo General.

Realizar el análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF

1.3. Objetivos Específicos.

- a. Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de radio sobre fibra, beneficios y aplicaciones.
- b. Implementar los escenarios de simulación de una red óptica pasiva utilizando diferentes métodos de modulación sobre la plataforma OptiSystem.
- c. Evaluar los resultados obtenidos para cada escenario de simulación propuestos.

Capítulo 2: Fundamentación teórica.

2.1. Introducción a RoF.

Hoy en día, debido a las diversas demandas de los usuarios del sistema, la capacidad de datos para la comunicación inalámbrica se ha expandido radicalmente de voz y mensajes simples a multimedia con servicios futuros evolutivos. Los sistemas de radio sobre fibra (*Radio-over-Fiber, RoF*) podrían ser la respuesta a muchas necesidades urgentes de las redes de telecomunicaciones, ya que podrían proporcionar el ancho de banda necesario para la transmisión de datos de banda ancha a los usuarios finales, otros beneficios son la baja pérdida de atenuación y la inmunidad a la radiofrecuencia. interferencia. (Sharma & Thakur, 2017)

En un sistema RoF, la mayoría de los procesos de procesamiento de señales (incluida la codificación, multiplexación y generación y modulación de RF) los lleva a cabo la oficina central (*Central Office, CO*), lo que hace que la estación base (*Base Station, BS*) sea rentable. Por lo tanto, RoF se convertirá en una tecnología clave en la próxima generación de sistemas de comunicaciones móviles. (Kaur & Bhamrah, 2013)

RoF significa un enlace de fibra óptica donde la señal óptica se modula en radiofrecuencias (RF) y se transmite a través de la fibra óptica al extremo receptor. Al llegar al extremo receptor, la señal de RF se demodula y se transmite al usuario inalámbrico correspondiente. La modulación de RF es en la mayoría de los casos digital, en cualquier forma habitual, por ejemplo, modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*), modulación de amplitud en cuadratura (*Quadrature Amplitude Modulation, QAM*), entre otros esquemas de modulación.

Esta modulación se puede realizar directamente con la señal de RF o en una frecuencia intermedia (IF). La técnica RoF tiene el potencial de ser la columna vertebral de la red de acceso inalámbrico. Dicha arquitectura puede ofrecer varias ventajas, como la reducción de la complejidad en el sitio de la

antena, las portadoras de radio pueden asignarse dinámicamente a diferentes sitios de antena, transparencia y escalabilidad.

La tecnología RoF es ahora omnipresente en la infraestructura de telecomunicaciones. La fibra óptica y la tecnología WDM han aumentado significativamente en la capacidad de transmisión de las redes de transporte actuales. Por lo tanto, están desempeñando un papel importante a la hora de respaldar el tráfico de datos en rápido aumento.

2.2. Tecnología de radio sobre fibra.

La tecnología RoF es una tecnología mediante la cual las señales de microondas (eléctricas) se distribuyen mediante componentes y técnicas ópticas (Díaz O., 2019). Un sistema RoF incluye una estación central (*Central Station, CS*) y una estación remota (*Remote Station, RS*) conectados a un enlace o red de fibra óptica. La señal entre CS y BS se transmite en la banda óptica a través de la red RoF. Esta arquitectura hace que el diseño de BS sea bastante simple. En el caso más simple, las BS incluyen principalmente convertidores de óptico a eléctrico (O/E) y eléctrico a óptico (E/O), una antena y algunos circuitos de microondas (dos amplificadores y un diplexor).

En el caso de que un área de aplicación esté en una red inalámbrica móvil (4G-LTE), entonces la CS podría ser la central de conmutación móvil (*Mobile Switching Central, MSC*) y RS sería la estación base (BS). En cuanto a los sistemas de comunicación de banda estrecha y las redes de área local inalámbricas (*Wireless Area Network, WLAN*), entonces la CS sería la cabecera, mientras que el punto de acceso de radio (*Radio Access Point, RAP*) actuaría como la RS. Los sistemas RoF abarcan un amplio rango (generalmente en la región de GHz) y dependen de la naturaleza de las aplicaciones para distribuir las frecuencias de las señales de radio.

Además de las funciones de transporte y movilidad, los sistemas RoF también están diseñados para realizar funcionalidades adicionales del sistema de radio. Estas funciones incluyen modulación de datos, procesamiento de señales y conversión de frecuencia (hacia arriba y hacia abajo). Como se

muestra en la figura 2.1, los sistemas RoF se utilizaron principalmente para transportar señales de microondas y lograr funciones de movilidad en la CS. (Rajpal & Goyal, 2017)

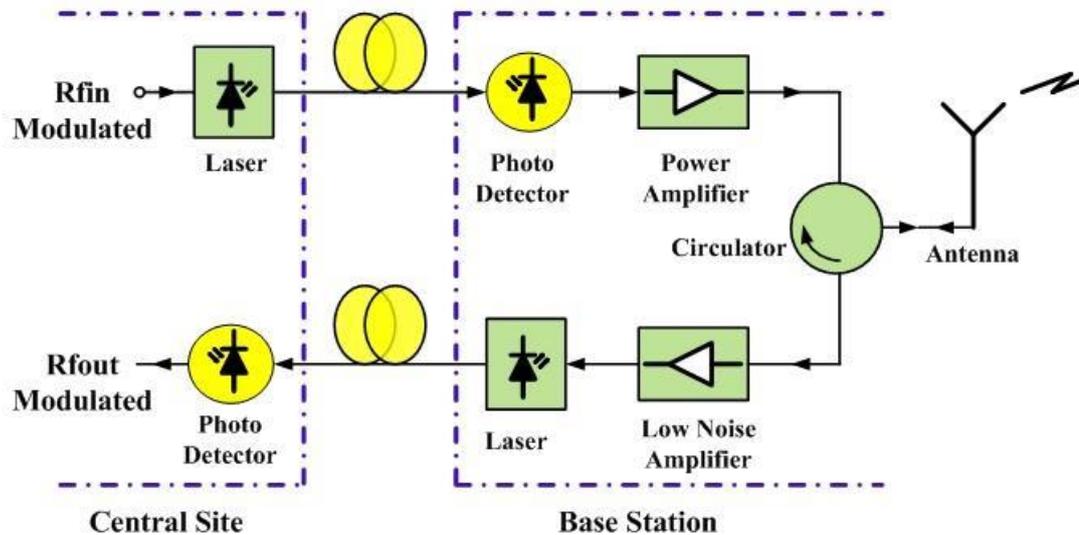


Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de radio sobre fibra.
Fuente:

La centralización de las funciones de procesamiento de señales de RF tiene muchos beneficios, como permite compartir equipos, asignación dinámica de recursos y simplifica la operación y el mantenimiento del sistema. Estas ventajas podrían traducirse en importantes ahorros operativos y en la instalación del sistema, particularmente en los sistemas de comunicación inalámbrica de banda ancha de amplia cobertura, donde se necesita una alta densidad. La figura 2.2 muestra el concepto de sistema RoF.

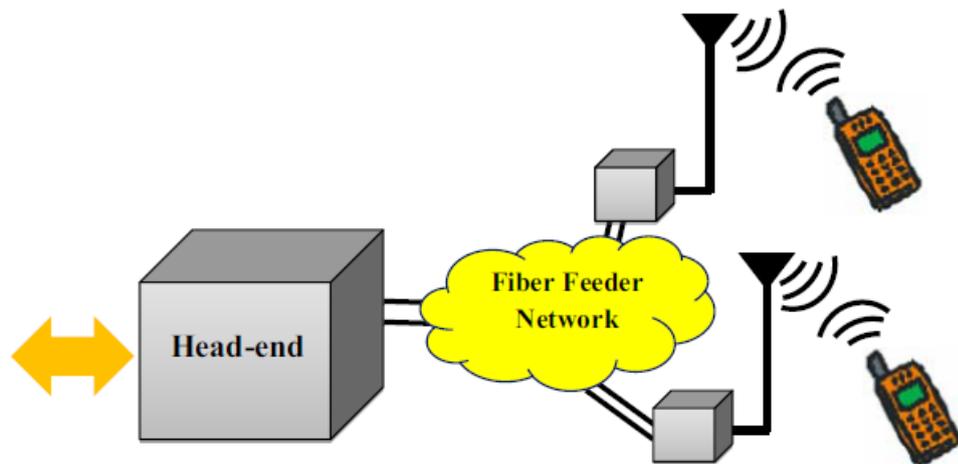


Figura 2. 2: Diagrama de bloques conceptual del sistema de radio sobre fibra.
Fuente: (Rajpal & Goyal, 2017)

2.3. Beneficios de la tecnología RoF

La capacidad de concentrar la mayoría de los costosos equipos de alta frecuencia en una ubicación centralizada es la principal ventaja de los sistemas de radio sobre fibra (RoF), lo que hace posible el uso de sitios remotos más simples (Díaz O., 2019). Además, la tecnología RoF permite la centralización de funciones de movilidad como la macro diversidad para un traspaso sin problemas. Existen muchos beneficios de tener sitios remotos simples. Algunas de estas ventajas se explican brevemente en las siguientes secciones.

2.3.1. Pérdida de atenuación baja

La distribución eléctrica de señales de microondas de alta frecuencia en el espacio libre o a través de líneas de transmisión es problemática y costosa. En el espacio libre, las pérdidas provocan una absorción y una reflexión que aumentan con la frecuencia, mientras que, en las líneas de transmisión, el aumento de la impedancia con la frecuencia provoca pérdidas muy elevadas. Por esta razón, distribuir eléctricamente señales de radio de alta frecuencia a largas distancias requiere costosos equipos de regeneración, ya que para las ondas mm, su distribución mediante el uso de líneas de transmisión no es factible incluso para distancias cortas.

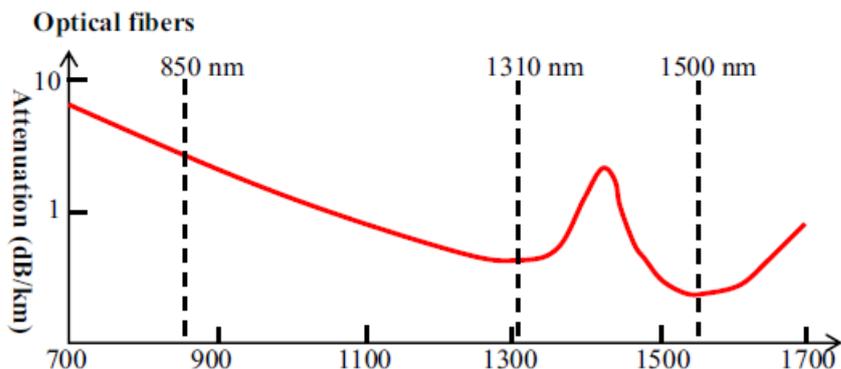


Figura 2. 3: Regiones de la primera, segunda y tercera ventana de operación de fibra óptica.

Fuente: (Rajpal & Goyal, 2017)

La solución alternativa a este problema es distribuir señales de banda base o frecuencias intermedias bajas (IF) desde el centro de conmutación (SC) a las estaciones base (BS). Las señales de banda base o IF se

convierten luego a la frecuencia de microondas o de onda mm requerida en cada estación base, se amplifican y luego se irradian. Esta configuración del sistema es la misma que se utiliza en la distribución de sistemas de comunicaciones móviles de banda estrecha. En cuanto a la fibra óptica, que ofrece una pérdida muy baja, la tecnología RoF se puede utilizar para lograr distribuciones de ondas milimétricas (mm) con poca pérdida, así como simplificar las RAU al mismo tiempo.

Las fibras monomodo (SMF) estándar disponibles comercialmente hechas de vidrio (sílice) tienen pérdidas de atenuación por debajo de 0.2 dB/km y 0.5 dB/km en las ventanas de 1.5 μm y 1.3 μm , respectivamente, tal como se muestra en la figura 2.3. Un tipo más reciente de fibras ópticas que son las fibras ópticas poliméricas (POF) exhiben una atenuación más alta que varía de 10 a 40 dB/km en las regiones de 500 a 1300 nm. Estas pérdidas son mucho más bajas que las encontradas en la propagación en el espacio libre y la transmisión por cable de cobre de microondas de alta frecuencia. Por esta razón, al transmitir microondas en forma óptica, las distancias de transmisión se incrementan varias veces y las potencias de transmisión requeridas se reducen en gran medida.

2.3.2. Gran ancho de banda

Las fibras ópticas ofrecen un ancho de banda enorme. Hay tres ventanas de transmisión principales, que ofrecen baja atenuación, a saber, las longitudes de onda de 850 nm, 1310 nm y 1550 nm, respectivamente (véase la figura 2.3). Para una sola SMF, el ancho de banda combinado de las tres ventanas supera los 50 THz, pero los sistemas comerciales utilizan solo una fracción de esta capacidad (1.6 THz). Sin embargo, aún continúan los desarrollos para explotar más capacidad óptica por fibra.

Los principales factores impulsores para desbloquear cada vez más ancho de banda de la fibra óptica consisten en la disponibilidad de fibra de baja dispersión (o dispersión desplazada), el amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) para la ventana de 1550 nm y el uso de técnicas de multiplexación avanzadas. A saber, la técnica de multiplexación por división

de tiempo óptico (OTDM) en combinación con técnicas de multiplexación por división de longitud de onda densa (DWDM).

Además de la alta capacidad para transmitir señales de microondas, el enorme ancho de banda que ofrecen las fibras ópticas tiene otros beneficios. El alto ancho de banda óptico permite un procesamiento de señales de alta velocidad que puede ser más difícil o imposible de realizar en sistemas electrónicos. Eso significa que algunas de las funciones de microondas más exigentes, como el filtrado, la mezcla, la conversión ascendente y descendente, se pueden implementar en el dominio óptico. Por ejemplo, el filtrado de ondas milimétricas se puede lograr convirtiendo primero la señal eléctrica que se va a filtrar en una señal óptica, luego realizando el filtrado mediante el uso de componentes ópticos como el Interferómetro Mach Zehnder MZI o las rejillas de Bragg) y luego convirtiendo la señal filtrada de vuelta a una señal eléctrica. Además, el procesamiento de señales en el dominio óptico permite utilizar componentes ópticos de bajo ancho de banda más baratos, como diodos láser y moduladores. Pero todavía es capaz de manejar señales de gran ancho de banda.

2.3.3. Inmunidad a las interferencias de radiofrecuencia

La inmunidad a la interferencia electromagnética (EMI) es una propiedad muy atractiva de la tecnología RoF, particularmente para la transmisión de microondas. Esto se debe a que las señales se transmiten en forma de luz a través de la fibra. Por lo tanto, se prefieren los cables de fibra incluso para conexiones cortas en ondas mm. La inmunidad EMI es la inmunidad a las escuchas clandestinas, que es una característica importante de las comunicaciones por fibra óptica porque proporciona privacidad y seguridad.

2.3.4. Fácil instalación y mantenimiento

En los sistemas RoF, los equipos complejos y costosos se mantienen en el centro de conmutación (SC), lo que simplifica las estaciones base remotas. Por ejemplo, la mayoría de las técnicas RoF eliminan la necesidad de un oscilador local y equipo relacionado en la Unidad de Acceso Remoto (RAU). En tales casos, el RAU es una combinación de fotodetector, un amplificador

de RF y una antena. El equipo de modulación y conmutación se mantiene en la cabecera y es compartido por varias RAU. Esta disposición conduce a RAU más pequeños y livianos al reducir efectivamente los costos de instalación y mantenimiento del sistema.

Dos de los requisitos más importantes para los sistemas de ondas milimétricas son la fácil instalación y los bajos costos de mantenimiento de las RAU, debido a la gran cantidad de RAU necesarias. Tener una RAU costosa haría que los costos del sistema fueran prohibitivos. Las numerosas antenas son necesarias para compensar el pequeño tamaño de las células de radio (micro y picocélulas), que es una consecuencia de las distancias de propagación limitadas de las microondas de ondas milimétricas. En aplicaciones donde las RAU no son de fácil acceso, la reducción de los requisitos de mantenimiento conduce a un importante ahorro de costos operativos.

2.3.5. Consumo de energía reducido

El consumo de energía reducido es el resultado de tener RAU simples con equipos reducidos. La mayor parte del equipo complejo se mantiene en la cabecera centralizada. En algunas aplicaciones, las RAU se operan en modo pasivo. Por ejemplo, algunos sistemas de radio de fibra de 5 GHz que emplean picocélulas pueden hacer que las RAU funcionen en modo pasivo. La reducción del consumo de energía en la RAU es significativa teniendo en cuenta que las RAU a veces se colocan en ubicaciones remotas que no reciben alimentación de la red eléctrica.

2.4. Aplicaciones de la tecnología de radio sobre fibra

Hay muchas aplicaciones de la tecnología RoF que consisten en comunicaciones por satélite, comunicaciones por radio móvil, radio de acceso de banda ancha, servicios de distribución de video multipunto (MVDS), sistema de banda ancha móvil (MBS), comunicaciones y control de vehículos y LAN inalámbricas a través de redes ópticas. Estas áreas de aplicación de la tecnología RoF se darán y se discutirán brevemente en las siguientes secciones.

2.4.1. Redes celulares

Un área de aplicación importante de la tecnología RoF son las redes móviles, como se muestra en la figura 2.4. El número cada vez mayor de abonados móviles, junto con la creciente demanda de servicios de banda ancha, ha mantenido una presión sostenida sobre las redes móviles para ofrecer una mayor capacidad. Por esta razón, el tráfico móvil (GSM - Sistema global para comunicaciones móviles) se puede transmitir de manera rentable entre los SC y los BS aprovechando los beneficios de la tecnología SMF. Por otro lado, existen otras funcionalidades RoF como la asignación de capacidad dinámica que proporciona importantes beneficios operativos a las redes celulares.

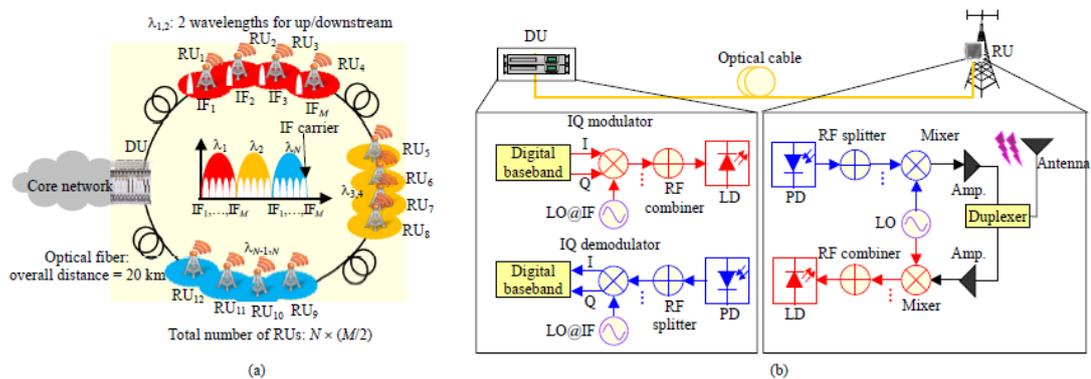


Figura 2. 4: Aplicación de radio sobre fibra en redes de telefonía celular.

Fuente: (Cho et al., 2015)

2.4.2. LAN inalámbricas

Debido a los dispositivos portátiles y las computadoras se ha vuelto cada vez más poderoso y generalizado, donde la demanda de acceso de banda ancha móvil a las LAN también estará en aumento. Esto conducirá una vez más a frecuencias portadoras más altas en la oferta para satisfacer la demanda de capacidad. Por ejemplo, las LAN inalámbricas actuales operan en las bandas ISM de 2,4 GHz y ofrecen una capacidad máxima de 11 Mbps por operador (IEEE 802.11b).

Las próximas generaciones de LAN inalámbricas de banda ancha están preparadas para ofrecer hasta 54 Mbps por operador y requerirán frecuencias de operador más altas en la banda de 5 GHz (IEEE802.11a / D7.0). Las frecuencias portadoras más altas a su vez conducen a microcélulas y

picocélulas, y surgen todas las dificultades asociadas con la cobertura discutidas anteriormente.

Una forma rentable de solucionar este problema es implementar tecnología RoF. Rajpal & Goyal, (2017) ha realizado una LAN inalámbrica a 60 GHz transmitiendo primero desde la BS (estación central), una frecuencia de oscilador estable en una FI junto con los datos a través de la fibra. La frecuencia del oscilador se utiliza para convertir los datos a ondas mm en los transpondedores (estaciones remotas). Esto simplifica enormemente los transpondedores remotos y también conduce a un diseño eficaz de la estación base.

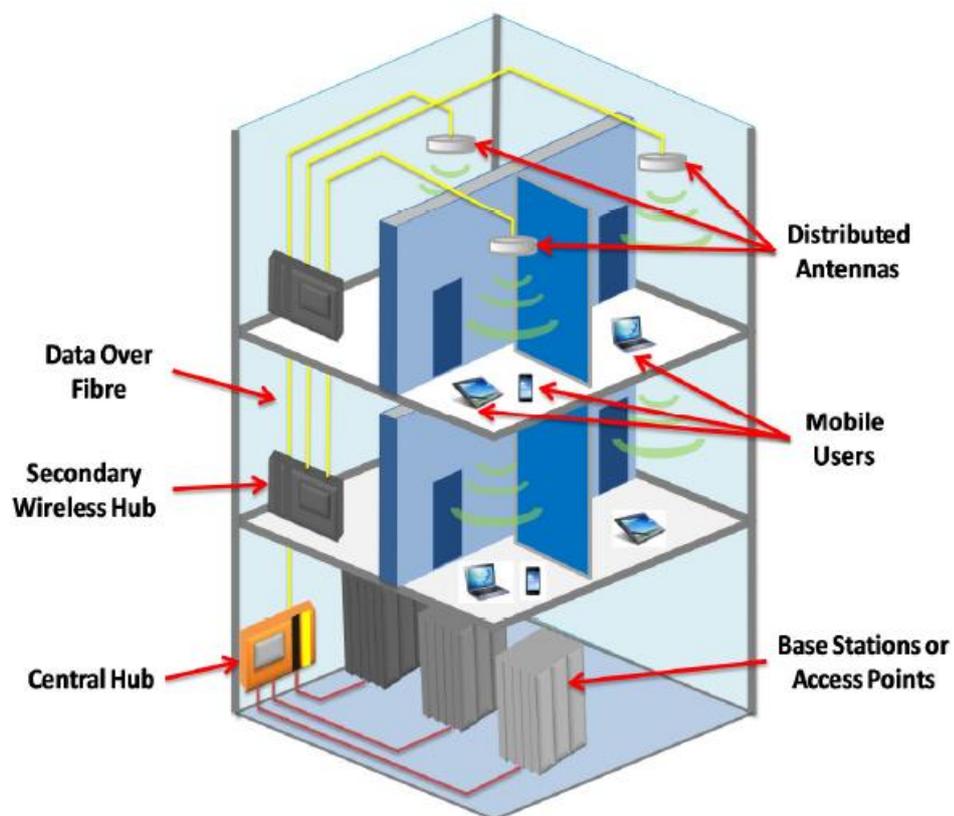


Figura 2. 5: Aplicación de radio sobre fibra en redes WLAN.

Fuente: (Li et al., 2015)

En la figura 2.5 se muestra un enfoque típico de sistema de antena distribuida (*Distributed Antenna System, DAS*) digital que utiliza tecnología digital de radio sobre fibra (RoF). Múltiples servicios inalámbricos desde estaciones base (BS) o puntos de acceso (*Access Point, AP*) alojados en una ubicación central, generalmente el sótano o la sala de TI de un edificio, se

distribuyen digitalmente a través de enlaces de fibra óptica. Este sistema tiene como objetivo utilizar componentes digitales listos para usar y la infraestructura existente en el edificio para la cobertura inalámbrica. (Li et al., 2015)

Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.

3.1. Descripción del modelo de simulación.

El presente capítulo incluye un estudio de los factores de la tasa de error de bits (BER) y calidad (Q) para el modelo de simulación de red óptica pasiva (PON) mediante el esquema de multiplexación por división de onda (WDM) al cual se lo denomina PON-WDM con la finalidad de lograr una tasa de bits máxima transportada a través de una fibra monomodo (*Single-Mode Fiber, SMF*) cuyo alcance sea lo más larga posible.

En este trabajo de titulación se estudiaron los dos principales sistemas PON-WDM. Cada uno de estos sistemas fue analizado bajo diferentes parámetros con diferentes diseños y elementos. La función común de estos dos sistemas es mejorar la tasa de transmisión de bits mediante el uso de diferentes métodos de modulación, ya sea mediante formatos de modulación OFDM de una sola portadora o de múltiples portadoras.

En un sistema RoF de portadora única de este tipo, se utilizaron tres esquemas de modulación para convertir señales de RF y se compararon entre sí. Es necesario estudiar cada método individualmente para encontrar el método apropiado para transmitir señales de RF a través de PON-WDM.

3.2. Modelo de simulación del sistema PON-WDM,

El modelado del sistema PON-WDM se realiza y analiza utilizando el software OptiSystem. La figura 3.1 muestra la simulación general en el software OptiSystem para dos transmisores en la terminación de línea óptica (OLT) con una tasa de bits de 2.5 Gbps. Esta tasa de bits se utilizará en todo el diseño porque si la red funciona para esta tasa de bits, funcionará para todas las demás tasas de bits. La longitud de la secuencia es de 128 bits y las muestras por bit es de 64. Éstas harán un total de 8192 muestras y son importantes porque necesita secuencias lo suficientemente grandes para simular la red a estas altas velocidades de bits. La ventana de tiempo es 5.12e-08 con una distancia de 80 km.

En este modelo propuesto, los dos transmisores se transmiten con dos longitudes de onda diferentes 193.1 THz y 193.2 THz con un espaciado de 0.1. Cada sección del transmisor consta de una entrada de láser de onda continua (CW) con un nivel de potencia de 0 dBm. La salida del cual es modulada por un modulador Mach-Zehnder (MZM) usando una secuencia de bits pseudoaleatoria (PRBS) con formato de no retorno a cero (NRZ).

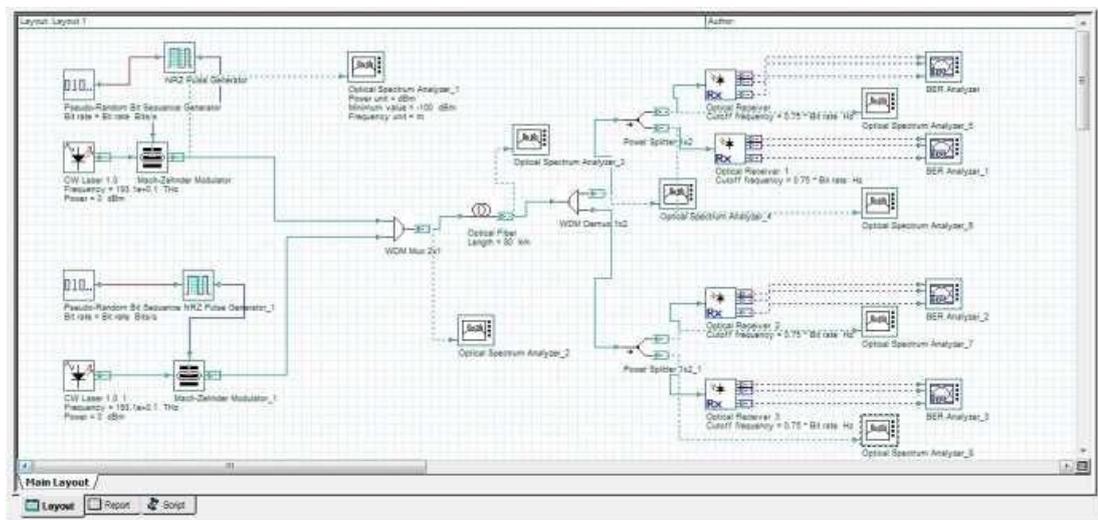


Figura 3. 1: Modelo de simulación de un sistema PON-WDM.

Elaborado por: Autor.

Para la transmisión de datos, el formato NRZ es el formato de datos más adecuado que se puede utilizar. Luego, las dos señales se combinan usando un demultiplexor DDM 1x2. Todas estas señales de salida de los divisores de potencia llegan a los usuarios en el extremo receptor. En el lado derecho del receptor en la unidad de red óptica (ONU) debe haber un filtro pasa bajo, un fotodiodo y un fotodetector PIN para analizar los resultados.

Para visualizar formas de onda, espectro óptico, diagramas de ojo, etc., se deben utilizar varios instrumentos de medición como analizador de espectro óptico, analizador de BER y analizador de diagrama de ojo. El factor Q, la BER y la altura del ojo son los parámetros de rendimiento más utilizados. Se puede definir el factor Q como el parámetro para medir la calidad de la señal para determinar la BER. El factor Q se define como:

$$Q = \frac{m_1 - m_0}{\sigma_1 + \sigma_0}$$

Donde m_1 , m_0 son el valor promedio de la señal de recepción en los instantes de muestreo cuando se transmite un “1” o “0” lógico y σ_1 , σ_0 son las desviaciones estándar.

La tasa de error de bit se define como el porcentaje de bits de error dividido por el número total de bits transferidos durante un intervalo de tiempo estudiado. Comúnmente se expresa como diez a una potencia negativa. La BER es una indicación de retransmisión de un paquete u otra unidad de datos cuando se produce un error. Conociendo el factor Q, la BER se puede estimar mediante,

$$BER = \frac{1}{2}ERFC\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right)$$

En el diagrama del ojo, el mejor momento para tomar muestras de una forma de onda recibida es cuando la altura de la apertura del ojo es lo más grande posible. Debido a la distorsión de amplitud en la señal, la altura se reduce. El grado de distorsión se define por la distancia vertical entre el nivel máximo de señal y la parte superior de la abertura del ojo. Es más difícil distinguir entre unos y ceros en la señal cuando el ojo se cierra más. La altura de los ojos viene dada por,

$$E_H = \frac{m_1 - 3\sigma_1}{m_0 - 3\sigma_0}$$

3.3. Comparación entre dos métodos de modulación externa en RoF-PON.

Se construyó un esquema de Optiwave para analizar la BER, la relación señal/ruido óptico (OSNR), diagrama de ojo y factor Q a 2.5 Gbps en el sistema RoF-PON tal como se muestra en la figura 3.1. Se consideró la producción de señales de RF utilizando modulación de doble banda lateral (DSB) o banda lateral única (SSB) para encontrar una comparación entre ellas. Antes de analizar el resultado, las frecuencias de las señales de oscilador local (LO) en las modulaciones DSB (ver figura 3.2) y SSB (ver figura 3.3) se fijan en 60 GHz, y la velocidad de bits en 2.5 Gbps. En la figura 3.2 se muestra la gráfica de la potencia recibida frente a la BER para las

modulaciones DSB y SSB después de variar la potencia del láser de onda continua (CW) 10 veces, es decir, de 5 dBm a -5 dBm. Cuando la longitud de la SMF es igual a 80 km, la potencia recibida en la modulación SSB y la BER es mayor en la modulación DSB que la BER de la modulación SSB. Mientras que tanto la modulación SSB como DSB tienen casi el mismo valor de potencia recibida.

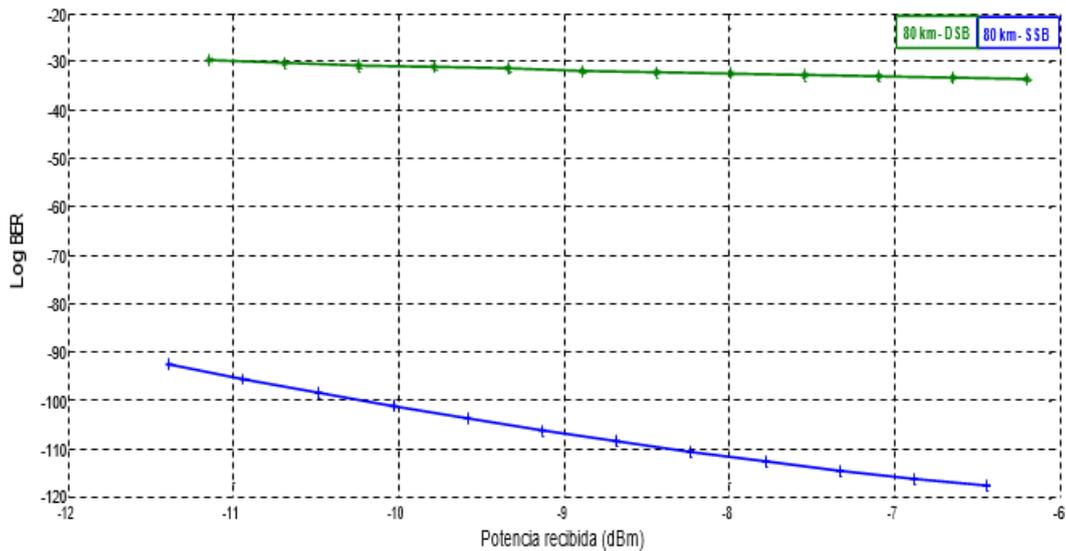


Figura 3. 2: Gráfica de la BER para las modulaciones DSB y SSB utilizando una SMF de 80 km.
Elaborado por: Autor.

El valor máximo de log BER en la modulación SSB fue de alrededor de -92,47 mientras que el máximo en la modulación DSB fue inferior a -30. Un valor bajo de log BER conduce a una señal de alta calidad tanto en modulación SSB como en la modulación DSB. En el caso de tener una OSNR casi igual, en la figura 3.3 se muestra una BER baja en la modulación SSB. La razón por la que la modulación SSB supera a los sistemas DSB es porque ocupa ambos lados de las señales en DSB significa transmitir señales con un ancho de banda de 120 GHz, mientras que en SSB solo es necesario 60 GHz. En otras palabras, la modulación DSB ofrece el doble de ancho de banda, lo que aumenta la dispersión en la SMF.

La otra comparación se refiere a los diagramas de ojo de la señal recibida tanto para la modulación DSB como para SSB. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran que la apertura de ojo de la señal recibida en la modulación SSB es

más grande que en la modulación DSB. Tener un ojo de gran apertura representa una señal recibida con alta calidad que se degrada cuando el diagrama de ojo se encoge. Los factores de calidad (Q) son inversamente proporcionales, es decir que se incrementan cuando la BER disminuye. La tasa de bits transportada por las señales de RF necesita una alta calidad de señales de RF para poder entregarse con un error bajo.

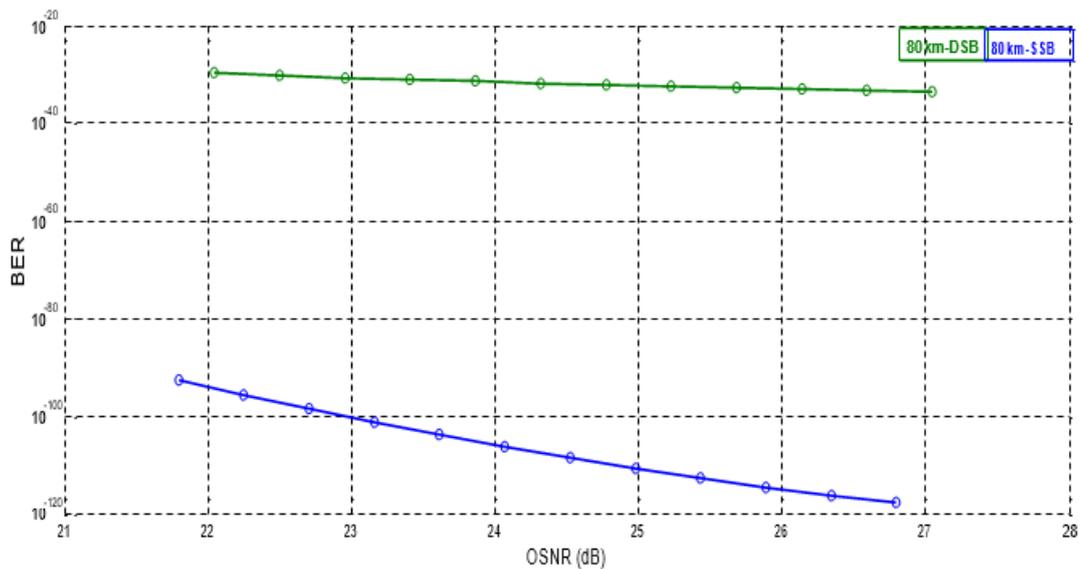


Figura 3. 3: Gráfica de la OSNR vs BER para las modulaciones SSB y DSB utilizando una SMF de 80 km.

Elaborado por: Autor.

Puede verse claramente en los diagramas de ojo (véanse las figuras 3.4 y 3.5) que el factor Q en la modulación SSB es mayor que el factor Q en la modulación DSB. Aunque el factor Q de la modulación DSB es menor, todavía es suficiente para recibir una señal satisfactoria teniendo en cuenta la longitud de la SMF.

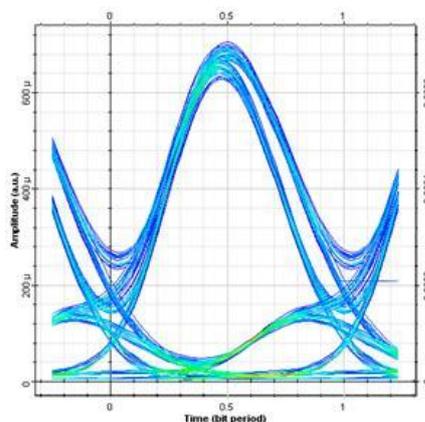


Figura 3. 4: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación SSB a 80 km.

Elaborado por: Autor.

Además, el sistema RoF-PON contribuye a mantener la calidad de la señal recibida cuando se utilizan las modulaciones DSB o SSB para modular las señales de RF, que luego se envían a través de la SMF de 80 km. Los valores de BER y OSNR de las señales recibidas muestran que la transmisión de señales a través del sistema PON, especialmente para la modulación DSB, es adecuada, aunque la BER sea más alta que en la modulación SSB.

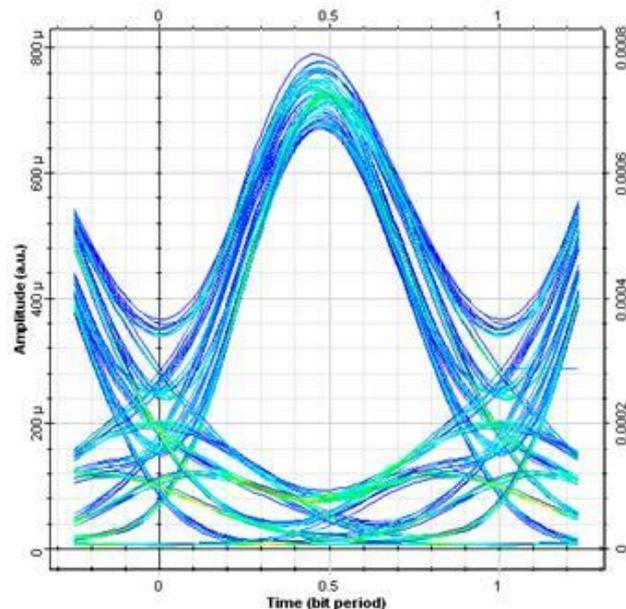


Figura 3. 5: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación DSB a 80 km.
Elaborado por: Autor.

Al repetir el mismo procedimiento que para una SMF de longitud 80 km, la longitud de la SMF se amplió a 130 km para encontrar la longitud máxima para la transmisión de señales de RF. La figura 3.6 muestra que la BER en la modulación DSB sigue siendo más alta que la BER en la modulación SSB. A medida que la longitud de la SMF se extendió en 50 km, para lo cual las modulaciones SSB y DSB perdieron alrededor del 50% de sus valores de OSNR. El OSNR máximo en la modulación SSB después de la extensión es alrededor de 16.79 dB mientras que el OSNR máxima en la modulación DSB es 17.04 dB, tal como se muestra en la figura 3.7.

Después de expandir la longitud de la SMF, la apertura del diagrama de ojo (véanse las figuras 3.8 y 3.9) se hizo más pequeño y como resultado el factor Q disminuyó. Tener una apertura de diagrama de ojo pequeña significa que las señales se ven afectadas por la dispersión y atenuación de la fibra

óptica que se producen después de una cierta longitud de SMF. En el caso de la modulación DSB o SSB, la contracción en la apertura del diagrama de ojo expone que la transmisión de 60 GHz a través de 130 km no puede ir más allá de esa distancia con solo 2.5 Gbps.

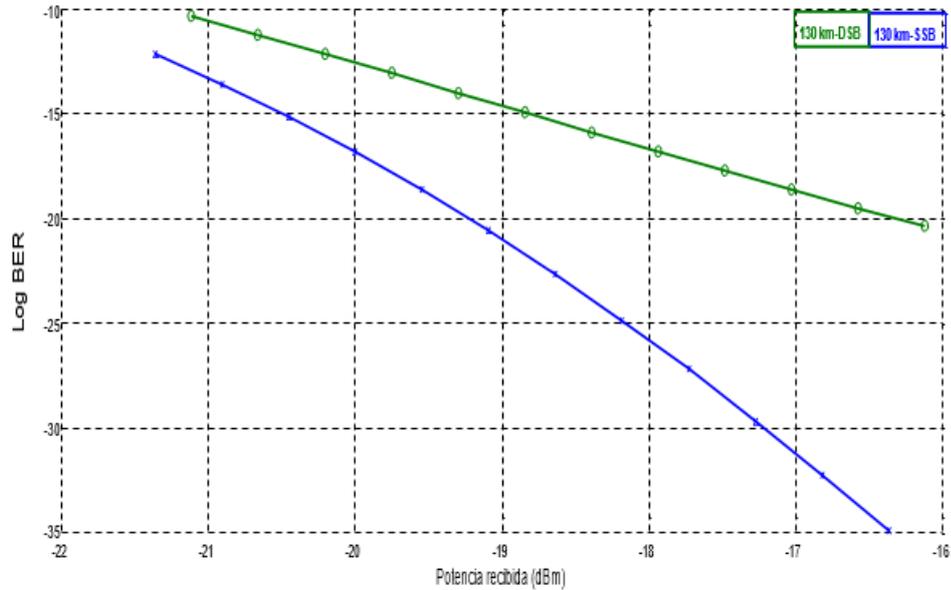


Figura 3. 6: BER de SSB y DSB cuando se utiliza SMF de 130 km.
Elaborado por: Autor.

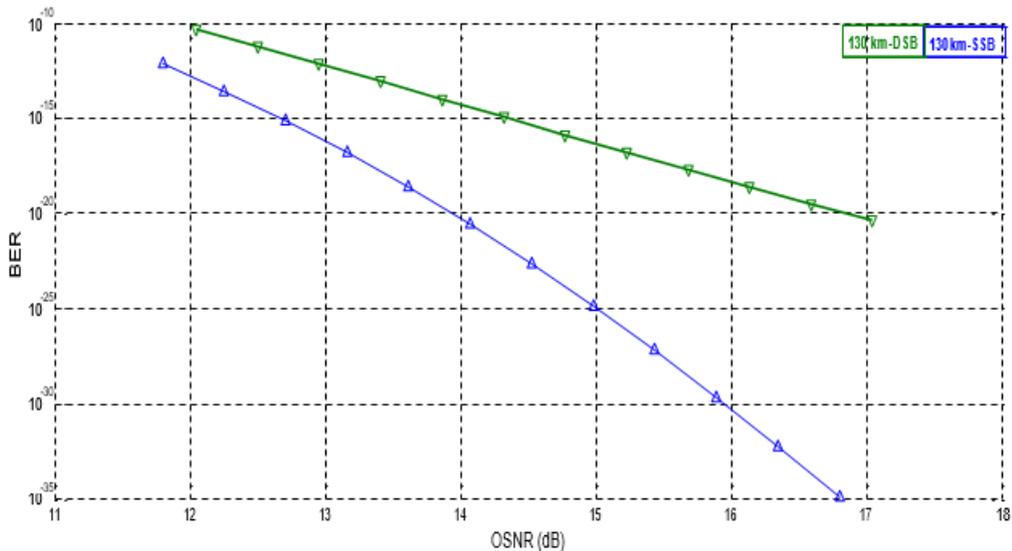


Figura 3. 7: OSNR vs BER de SSB y DSB cuando se usa SMF de 130 km.
Elaborado por: Autor.

La tabla 3.1 muestra una comparación entre dos ondas mm moduladas por SSB y DSB para diferentes longitudes de SMF (30, 80 y 130 km). La comparación entre estos dos métodos fue para los valores del factor Q. A pesar de la alta reducción en el factor Q de la modulación SSB de 75.33 a

11.3, el valor del factor Q cuando todavía se admiten un SFM de 130 km. La baja potencia de la señal de modulación DSB cuando se utiliza una SMF de 130 km no sería suficiente para recibir una señal con la calidad adecuada. Por otro lado, la potencia recibida cuando se utiliza una SMF de 130 km con la modulación SSB es aceptable.

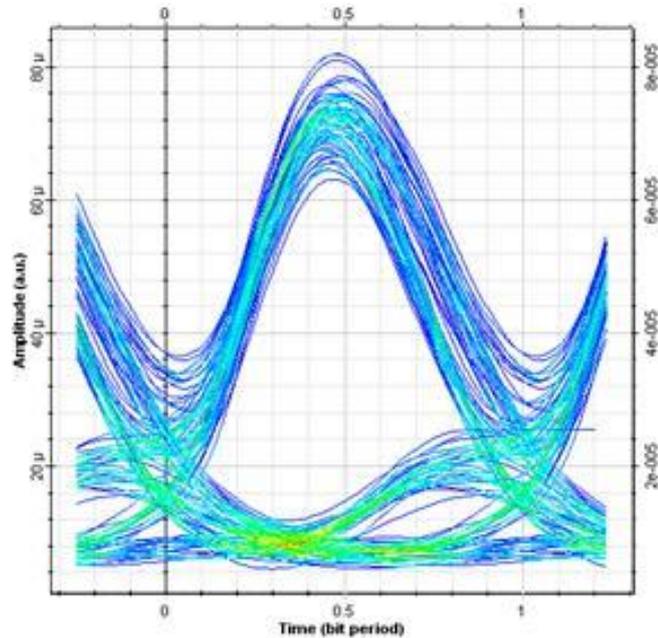


Figura 3. 8: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación SSB a 130 km.
Elaborado por: Autor.

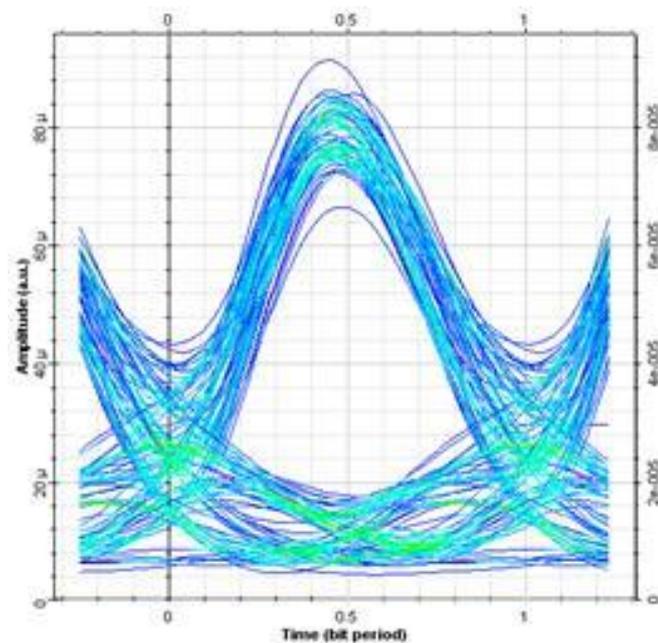


Figura 3. 9: Diagrama de ojo de la señal recibida para modulación DSB a 130 km.
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 1: Factor de calidad (Q) para las modulaciones SSB y DSB a diferentes longitudes de SMF.

Longitud de SMF (km)	Modulación DSB Factor Q	Modulación SSB Factor Q
30	16.45	75.44
80	12.08	22.64
130	8.97	12.08

Elaborado por: Autor.

3.4. Comparación de los métodos de modulación DSB, SSB y OCS en una red óptica pasiva usando WDM.

La integración de cualquiera de los tres métodos de modulación en una red óptica pasiva (PON) usando WDM (véase la figura 3.10) no pudo satisfacerse debido a la inserción de WDM en el esquema. Cada canal de WDM obtiene una longitud de onda individual y una tasa de bits de 2.5 Gbps. Como se analizó en la sección 3.3 la modulación SSB muestra suficiente fuerza para transmitir señales de hasta 130 km de longitud.

Sin embargo, la inserción de WDM provoca más ruido en las señales transmitidas y, como resultado, la calidad disminuirá. Por otro lado, la modulación DSB no podía ir más allá de los 80 km. Para superar este problema, se propone como alternativa la modulación de supresión de portadora óptica (OCS). El ancho de banda del oscilador local (LO) en la modulación OCS se seleccionó una frecuencia de 30 GHz con un cambio de fase de 180°.

El voltaje de polarización era más del doble de los valores de voltaje en las modulaciones SSB y DSB. En la tabla 3.2 se muestra una comparativa de tres métodos de modulación con relación al factor de calidad (Q) cuando se integran al sistema PON-WDM propuesto. Con diferentes longitudes de SMF, el factor Q máximo se produjo cuando se utilizó la modulación OCS. Después de una cierta longitud de SMF, ocurre una disminución drástica debido a la dispersión y atenuación en SMF.

Tabla 3. 2: Factor de calidad (Q) para las modulaciones SSB, DSB y OSC a diferentes longitudes de SMF.

Longitud de SMF (km)	Modulación DSB Factor Q	Modulación SSB Factor Q	Modulación OCS Factor Q
30	18.96	44.55	51.19
70	7.6	10.04	12.37
100	3.8	5.2	7.4

Elaborado por: Autor.

Tener un valor de factor Q bajo significa que la modulación DSB tiene el valor máximo de BER, mientras que el valor mínimo sucede cuando se utiliza la modulación OCS. Este aumento en el valor de la BER en la modulación DSB está relacionado con la integración de PON-WDM. Además, el método de modulación DSB no puede permitir que la RF viaje más de 80 km.

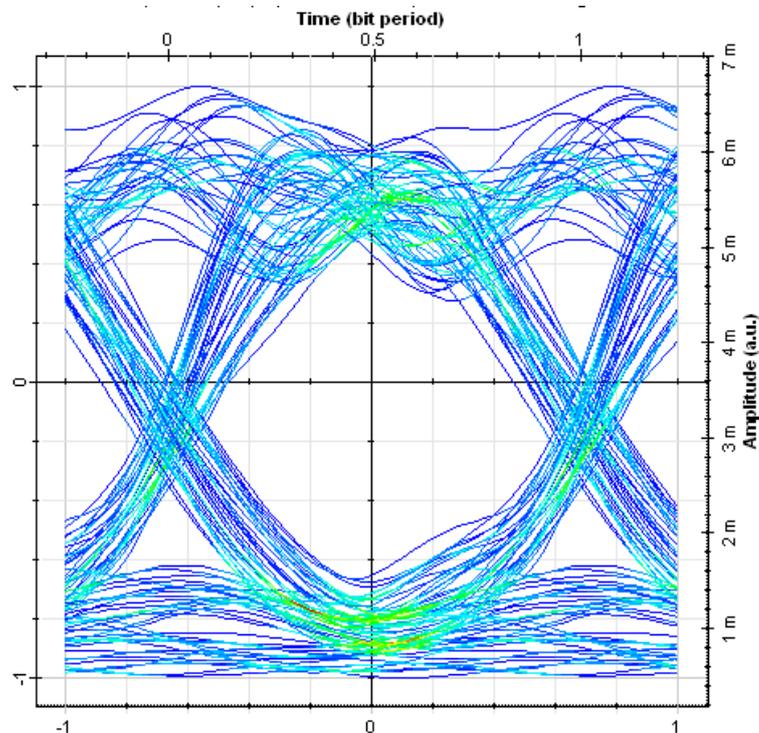


Figura 3. 10: Diagrama de ojo para modulación OCS en PON-WDM a 80 km.
Elaborado por: Autor.

Los tres diagramas de ojo de los tres métodos de modulación propuestos se muestran en las figuras 3.10, 3.11 y 3.12, y demuestran que cuando se utiliza una SMF de 80 km, la apertura del ojo aumenta cuando se utiliza la

modulación OCS. La señal de RF modulada por OCS tiene suficiente fuerza para transportar la tasa de bits sin problemas con una BER menor.

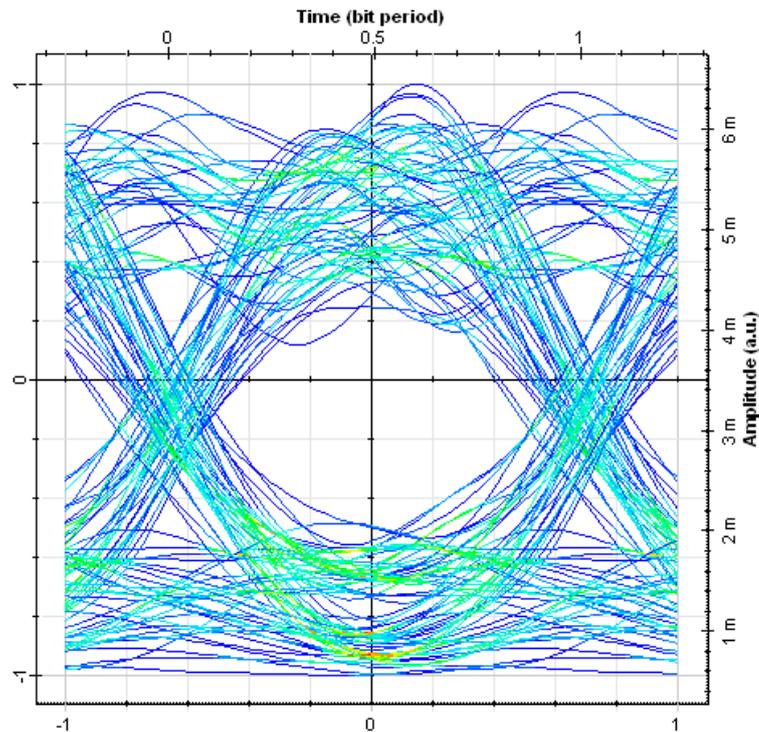


Figura 3. 11: Diagrama de ojo para modulación SSB en PON-WDM a 80 km.
Elaborado por: Autor.

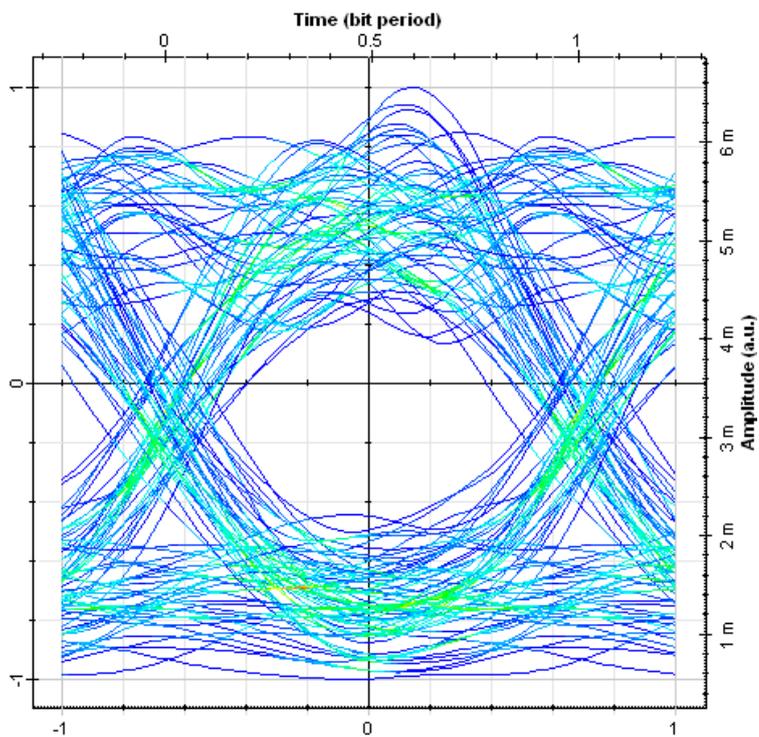


Figura 3. 12: Diagramas de ojo para modulación DSB en PON-WDM a 80 km.
Elaborado por: Autor.

Tener señales de RF calificadas contribuye a transmitir una tasa de bits más alta al usuario final. Los tres métodos de modulación se probaron cuando la longitud de la SMF era igual a 40 km y la velocidad era 10 Gbps. En la tabla 3.3 se muestra la comparativa de estos tres métodos de modulación con relación al factor Q, OSNR y potencia recibida. El factor Q máximo aparece cuando se utiliza la modulación OCS, sin embargo, el factor Q mínimo fue cuando se utiliza la modulación DSB. Debido a la buena calidad de las señales recibidas, el método de modulación OCS demostró ser el mejor método para transmitir 10 Gb/s a través del sistema WDM-PON hasta 40 km. De los diagramas de ojo de los tres métodos, se puede ver claramente que el ojo de gran apertura apareció cuando se utilizó OCS. El diagrama del ojo es una prueba más de que los OCS son el mejor método.

Tabla 3. 3: Métricas para el sistema PON-WDM propuesto a diferentes longitudes de SMF.

	Modulación OCS	Modulación SSB	Modulación DSB
Factor Q	8.844	6.045	4.135
OSNR	22.265	14.356	29.89
Poder	-47.899	-45.667	-29.25

Elaborado por: Autor.

3.5. Señales de RF moduladas mediante el formato OFDM.

En esta parte, el esquema propuesto se implementa en el software OptiSystem para encontrar la OSNR, la potencia recibida y la constelación eléctrica de la señal recibida. Se utilizaron dos métodos de modulación diferentes en el formato OFDM para descubrir los mejores métodos entre ellos. Las señales multiplexadas de cuatro canales se enviaron a través de una SMF de 40 km con una tasa de bits igual a 20 Gbps y 30 Gbps. Los métodos de modulaciones utilizados en formato OFDM fueron QAM y PSK con diferente orden M, tales como BPSK, 16-PSK, 16-QAM y 64-QAM.

En la salida OFDM fue modulada con RF de 20 GHz por el modulador Mach-Zehnder (MZM). Aunque agregar una señal de RF ayudó a expandir el ancho de banda de las señales de la portadora, provocó una caída en la

potencia de la señal. Para superar este problema, se aumentó la potencia de entrada del láser CW para mantener la potencia requerida del proceso de transmisión.

Un aumento en la potencia de entrada del láser CW varía de un método de modulación a otro. Por ejemplo, 64-QAM necesita menos potencia de entrada que 16-QAM, y BPSK necesita el mayor aumento de potencia de CW. En las figuras 3.13 a 3.15 muestran los espectros ópticos de las señales antes del envío a través de una SMF para los métodos de modulación indicados.

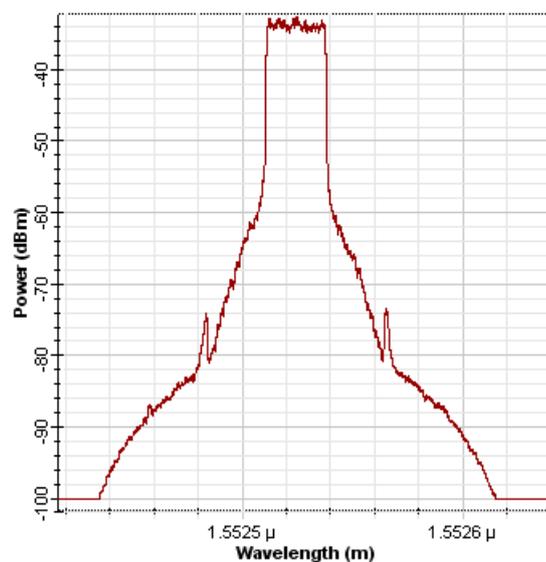


Figura 3. 13: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación 64-QAM.
Elaborado por: Autor.

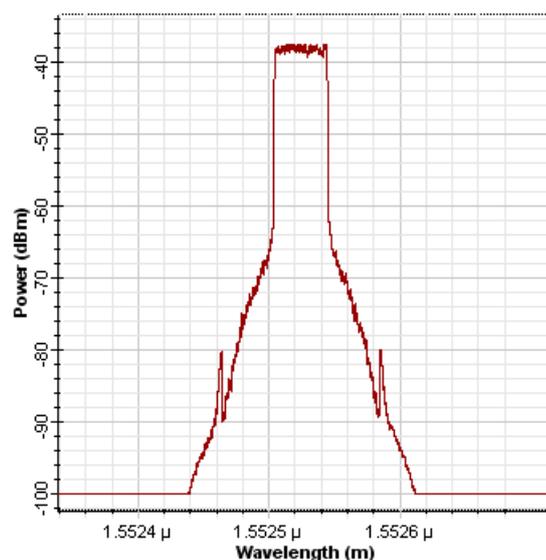


Figura 3. 14: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación 16-QAM.
Elaborado por: Autor.

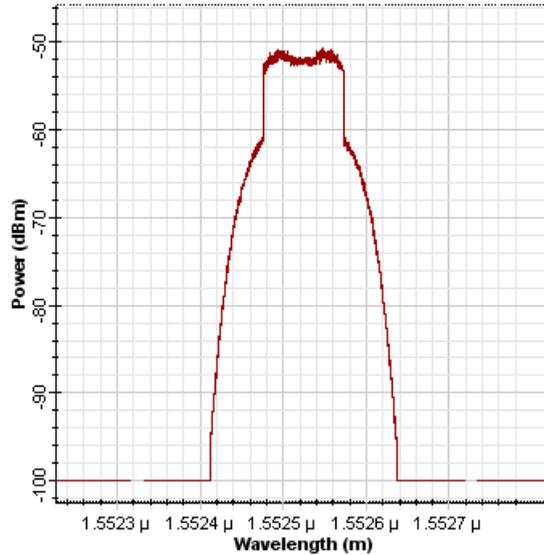


Figura 3. 15: Espectros ópticos del canal WDM para la modulación BPSK.
Elaborado por: Autor.

3.5.1. Señales OFDM mediante modulación QAM.

Una representación útil en un sistema de comunicación de este tipo son los analizadores de constelaciones eléctricas, que se utilizan para representar la constelación eléctrica de todos los métodos de modulación utilizados antes del proceso de demodulación. En esta parte, el método de modulación para OFDM elegido es QAM con dos órdenes diferentes, 16-QAM y 64-QAM. Las figuras 3.16 y 3.17 muestran los diagramas de constelaciones eléctricas para las modulaciones 16-QAM y 64-QAM respectivamente cuando se utiliza una tasa de bits de 20 Gbps con una SMF de longitud 40 km. Se puede ver claramente que el esquema de modulación 16-QAM tiene puntos de constelación muy separados y hay una gran distancia entre los dos puntos mientras que los puntos más dispersos aparecieron con la modulación 64-QAM.

La tabla 3.4 muestra la comparativa de las señales recibidas en un orden diferente del método de modulación QAM. Es evidente que el uso del formato OFDM con el método de modulación 64-QAM tiene el valor más alto de OSNR y potencia recibida. La OSNR y la potencia recibida más bajos se producen cuando se utiliza el esquema de modulación 16-QAM. Dado que hay poca potencia recibida en la modulación 16-QAM, es suficiente para solo un bit por símbolo. Por otro lado, los valores más altos de OSNR y la potencia recibida

en la modulación 64-QAM pueden no ser adecuados para seis bits por símbolo.

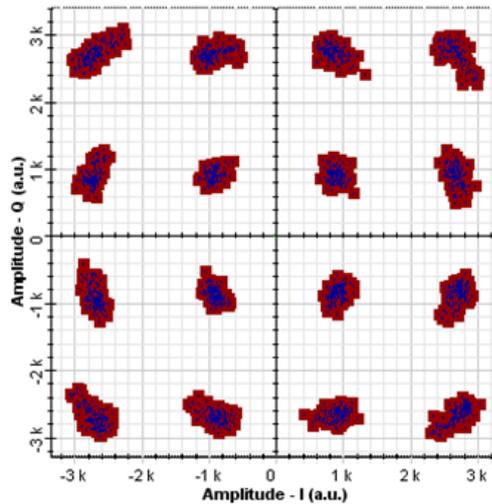


Figura 3. 16: Constelación de señales recibidas de 64-QAM después de 40 km SMF.

Elaborado por: Autor.

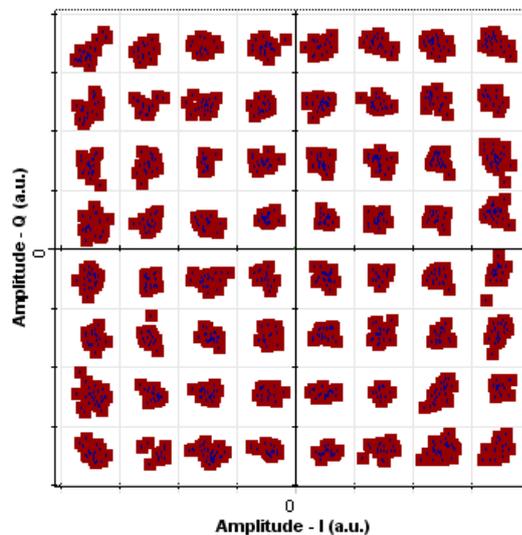


Figura 3. 17: Constelación de señales recibidas de 64-QAM después de 40 km SMF.

Elaborado por: Autor.

Tener valores altos de OSNR y potencia recibida no podría ser suficiente para tener una BER menor. La Figura 3.17 y la Figura 3.18 muestran un OSNR frente a BER cuando se utilizan 16-QAM y 64-QAM. A partir de estas dos cifras, es evidente que 16-QAM tiene un valor de BER menor que 64-QAM en diferentes valores de OSNR. Cuando se aumentan los valores de OSNR, la BER en ambos métodos disminuyó. Sin embargo, la BER alcanzó un valor más bajo en 16-QAM.

Tabla 3. 4: Métricas para el sistema OFDM propuesto para la modulación 16-QAM y 64-QAM.

Longitud SFM (km)	OSNR (dB)		Potencia Rx (dBm)	
	16 - QAM	64 - QAM	16 - QAM	64 - QAM
40	97.31	97.47	-5.16	-4.52619
80	35.89	41.25	-53.05	-50.6
120	27.9	33.3	-61.02	-58.75

Elaborado por: Autor.

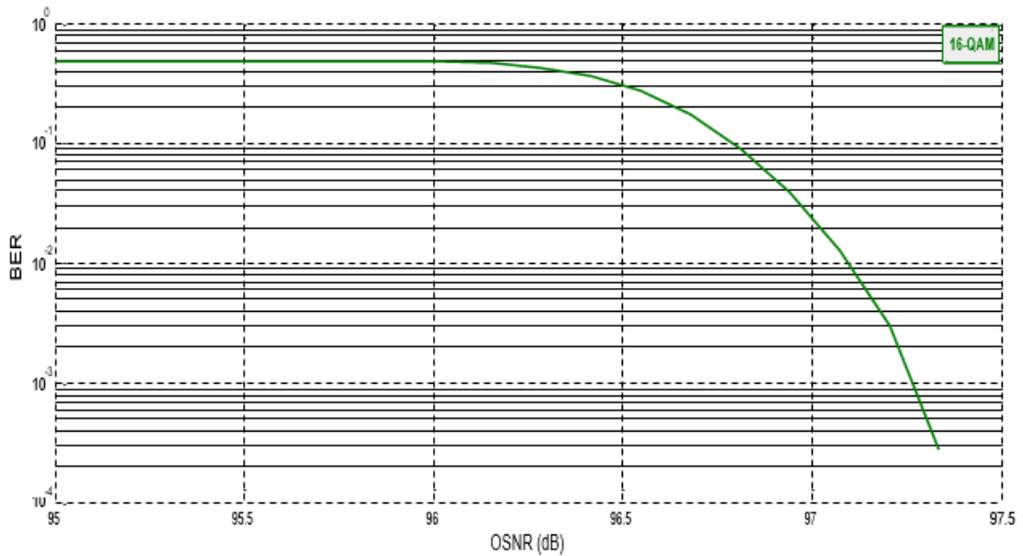


Figura 3. 18: Gráfica de OSNR vs BER para la modulación 16-QAM después de 40 km.

Elaborado por: Autor.

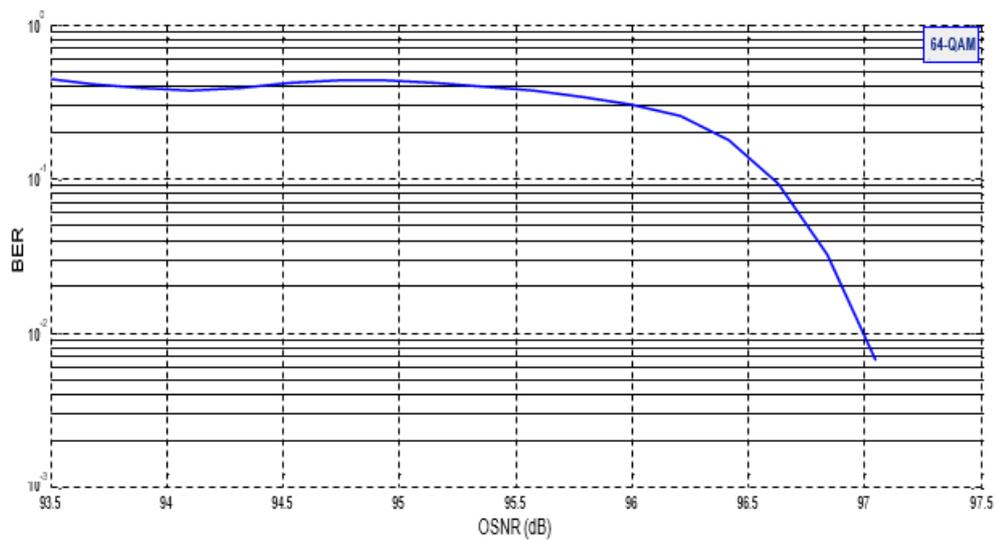


Figura 3. 19: Gráfica de OSNR vs BER para la modulación 64-QAM después de 40 km.

Elaborado por: Autor.

3.5.2. Señales OFDM mediante modulación PSK.

En esta parte, se utilizaron dos órdenes de PSK como método de modulación de OFDM que son 8-PSK y 16-PSK. Como técnica para medir la BER de las señales recibidas, se volvió a utilizar una constelación eléctrica en esta parte. Las figuras 3.20 y 3.21 muestran dos constelaciones diferentes de la señal recibida cuando se utilizaron 8-PSK y 16-PSK. Cada punto de los 8 puntos de la constelación 8-PSK representa 3 símbolos.

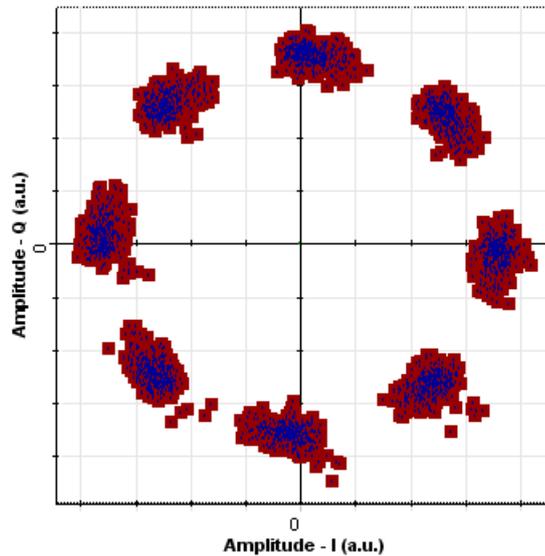


Figura 3. 20:Constelación de señales recibidas de 8-PSK después de 40 km SMF.
Elaborado por: Autor.

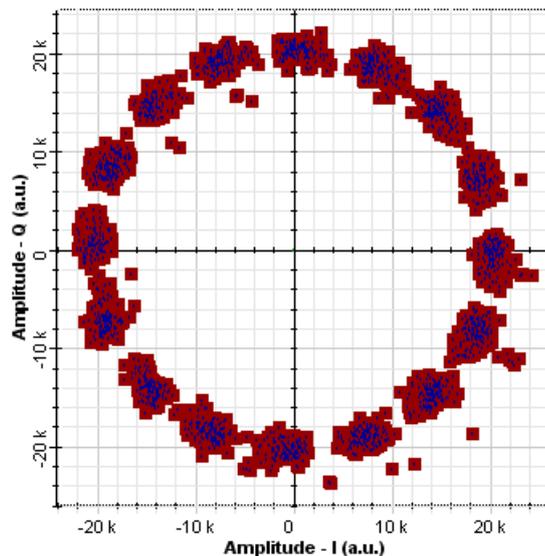


Figura 3. 21: Constelación de señales recibidas de 16-PSK después de 40 km SMF.
Elaborado por: Autor.

Sin embargo, representa 4 símbolos por bit en 16-PSK. Claramente, hay suficiente espacio entre dos puntos en el diagrama de constelación cuando se utiliza la modulación 8-PSK, lo que ayuda a eliminar la dispersión. Por otro lado, este espacio entre dos puntos cualesquiera cuando se utiliza la modulación 16-PSK se hizo más pequeño. Como resultado, la BER en la modulación 16-PSK aumentó.

La tabla 3.5 muestra la comparativa entre los dos órdenes diferentes de modulación PSK con relación a la OSNR y señal de potencia recibida. Las diferencias de OSNR y valores de potencia recibidos en estos dos métodos fueron muy tenues. Debido a que tiene una capacidad mayor, es preferible 16-PSK cuando se usa con OSNR y potencia recibida casi iguales en ambos órdenes. La BER en 16-PSK es mayor que la BER en 8-PSK de acuerdo con la figura 3.22. La BER en 16-PSK es mayor ya que está relacionada con la capacidad, que es mayor que la capacidad ofrecida por 8-PSK.

Tabla 3. 5: Métricas para el sistema OFDM propuesto para la modulación 8-PSK y 16-PSK.

	8-PSK	16-PSK
OSNR (dB)	78.7466	78.8159
Potencia Rx (dBm)	-21.2534	-21.1841

Elaborado por: Autor.

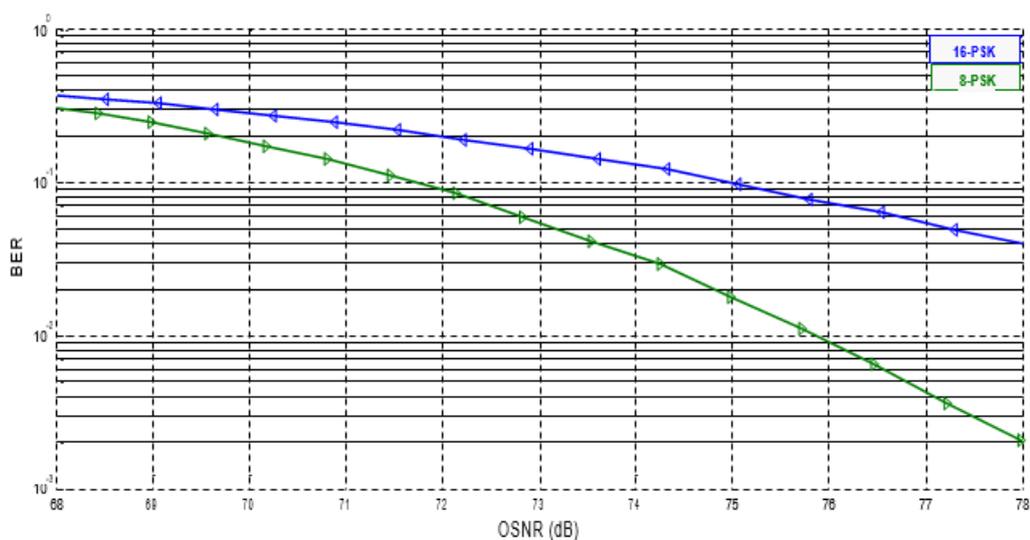


Figura 3. 22: Gráfica de OSNR vs BER para las modulaciones 8-PSK y 16-PSK con una velocidad de 20 Gbps.

Elaborado por: Autor.

3.6. Discusión de los resultados obtenidos.

Para la primera parte de los resultados, se realizó una comparación en términos de BER entre dos métodos diferentes de conversión ascendente de ondas milimétricas. La BER en los métodos propuestos se demostró con éxito cuando se utiliza en el sistema PON. Estas implementaciones, que se lograron cuando se utilizó PON, permitieron un aumento en la longitud de transmisión hasta 130 km y en la tasa de bits hasta 10 Gbps.

Para una SMF de longitud 80 km, la potencia máxima recibida alcanzada en la modulación SSB fue de alrededor de -6.43 dBm después de estar alrededor de -28 dBm con una longitud de transmisión de solo 40 km. Además, el log BER se mejoró a -117 después de 11. Por otro lado, el uso de la modulación DSB en PON mejoró la potencia recibida de -20 dBm con sólo 2 km de SMF usado a -6,2 dBm con una SMF de 80 km.

La segunda parte de los resultados contiene un estudio de tres métodos propuestos para integrar cada uno de ellos en una PON-WDM. Se probó prácticamente que los tres métodos se utilizan en una PON-WDM con una SMF de hasta 70 km.

El factor Q máximo en diferentes longitudes de SMF se produce cuando se utiliza la modulación OCS hasta 130 km, y 10 Gbps para cada canal. La transmisión de 10 Gbps para cada canal de WDM significa que la PON-WDM puede transmitir más de 1.6 Tbps.

La última parte de los resultados muestra el uso de una modulación de formato OFDM para modular las señales de RF. Los cuatro métodos de modulación lograron con éxito la BER requerida para tener una señal de calidad. Aunque la BER más alta se produce cuando se utiliza la modulación 64-QAM, fue adecuado debido a la alta capacidad del gran número de símbolos que ofrece la modulación 64-QAM.

Conclusiones

Se estudió y analizó el rendimiento de la BER con diferentes tipos de modulaciones de RF. En la primera parte, se analizó la utilización de más de una técnica de conversión ascendente de onda milimétrica. Los tres métodos mostraron una diversidad de detalles de la señal recibida que dependía de la longitud del SMF y de la tasa de bits. Entre SSB y DSB en un solo RoF, SSB mostró una señal recibida de alta calidad incluso cuando se amplió la longitud del SMF.

Por otro lado, la señal producida en DSB mostró menos capacidad de ser transmitida a larga distancia que la SSB. Esta menor capacidad está relacionada con la dispersión de la SMF, que se produce sobre todo cuando se transmite una señal de banda doble. Transmitir una señal con una banda de doble cara a 60 GHz de LO significa que la frecuencia de la señal es de 120 GHz para ambas bandas.

Las señales de RF integradas con WDM-PON demostraron que OCS tenía el factor Q entre los tres métodos después de ciertas longitudes de SMF con una tasa de bits de 10 Gb/s para cada canal de señal de WDM

Recomendaciones.

A continuación, se recomienda dos propuestas de trabajos futuros a partir del presente componente práctico:

1. Implementación de una red GPON-DWDM utilizando modulaciones digitales sobre el software MatLab/Simulink.
2. Análisis comparativo de sistemas WDM y DWDM en sistemas de radio sobre fibra sobre el software OptiSystem.

Bibliografía.

- Cho, S.-H., Han, C., Chung, H. S., & Lee, J. H. (2015). Demonstration of Mobile Fronthaul Test Bed Based on RoF Technology Supporting Two Frequency Assignments and 2×2 MIMO Antennas. *ETRI Journal*, 37(6), 1055–1064. <https://doi.org/10.4218/etrij.15.0115.0146>
- Díaz O., J. A. (2019). *Análisis de rendimiento de la técnica de multiplexación OFDM para sistemas RoF utilizando OptiSystem*. [Trabajo de Titulación, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/12729>
- Kaur, H., & Bhamrah, M. S. (2013). Comparison of NRZ and RZ data modulation formats in SAC-OCDMA system under introduced clock timing jitter of laser diode. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2(8), 2942–2949.
- Li, T., Penty, R. V., & White, I. H. (2015). Novel digital radio over fibre for 4G-LTE. *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, 312–317. <https://doi.org/10.1109/ICCW.2015.7247197>
- Rajpal, S., & Goyal, R. (2017). A Review on Radio-Over-Fiber Technology-Based Integrated (Optical/Wireless) Networks. *Journal of Optical Communications*, 38(1). <https://doi.org/10.1515/joc-2016-0020>
- Sharma, A., & Thakur, K. (2017). Comparison of MDRZ, CSRZ and DRZ schemes using different Communiacion Channels. *International Journal of Computer Applications*, 172(3), 26–30. <https://doi.org/10.5120/ijca2017915106>



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, **Torres Avilés, Guilbert Andrés** con C.C: # 080359947-1 autor del Trabajo de Titulación: **Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF** 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, 10 de marzo del 2021

f. _____

Nombre: Torres Avilés, Guilbert Andrés

C.C: 080359947-1

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF		
AUTOR(ES)	Torres Avilés, Guilbert Andrés		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	De Telecomunicaciones		
TITULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	10 de marzo del 2021	No. DE PÁGINAS:	35
ÁREAS TEMÁTICAS:	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Ópticas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Redes, Acceso, PON, Multiplexación, Comunicaciones, Radio		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras)	<p>El presente documento presenta el desarrollo del componente práctico del examen complejo denominado "Análisis del desempeño de una red óptica pasiva utilizando técnicas de modulación en sistemas RoF". Primero se presenta una breve descripción del componente práctico, así como el objetivo general y los objetivos específicos propuestos para evidenciar la parte práctica de la formación como futuro ingeniero en telecomunicaciones. En el capítulo 2 se presenta los fundamentos teóricos de la tecnología, beneficios y aplicaciones de los sistemas de radio sobre fibra (Radio over Fiber, RoF). En el capítulo 3 se crean los escenarios de simulación para la multiplexación por división de longitud de onda (DWM) en una red óptica pasiva (Passive Optical Network, PON) y para sistemas de radio sobre fibra aplicando diferentes técnicas de modulación digital utilizando el software OptiSystem. En cada escenario de simulación se presentan los resultados obtenidos para cada prueba realizada y su respectivo análisis.</p>		
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593 98 134 6395	E-mail: gtorresavi7@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Teléfono: +593-9-67608298		
	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):			