



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando
multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes
ópticas pasivas (PON)**

AUTOR:

Ing. Blum Cárdenas, Juan Pablo

Examen Complexivo previo a la obtención del Grado Académico de
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

1 de diciembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Blum Cárdenas, Juan Pablo** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 1 de diciembre del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Blum Cárdenas, Juan Pablo**

DECLARÓ QUE:

El examen complejo “**Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, 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 científico del Examen Complexivo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 1 de diciembre del 2021

EL AUTOR

Blum Cárdenas, Juan Pablo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

AUTORIZACIÓN

Yo, **Blum Cárdenas, Juan Pablo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del examen complejo titulado: **“Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 1 de diciembre del 2021

EL AUTOR

Blum Cárdenas, Juan Pablo

REPORTE DE URKUND

URKUND Lista de fuentes Bloques Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Documento	JP_Blum_MET_Final.docx (D90811651)
Presentado	2021-01-03 01:30 (-05:00)
Presentado por	fernandopm23@hotmail.com
Recibido	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
Mensaje	Revisión TT Juan Pablo Blum Mostrar el mensaje completo 1% de estas 24 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

+	Categoría	Enlace/nombre de archivo	▣
+		http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/33...	▣
+		https://docplayer.es/114440847-Universida...	▣
+		https://docplayer.es/85950030-Universidad...	▣
+		ALBAN_Titulacion.docx	▣
+		Jorge_Diaz_TT_2018.docx	▣
+		http://192.188.52.94:8080/bitstream/3317/1...	▣
+		http://dspace.ucv.edu.ec/bitstream/handl...	▣

Reiniciar Exportar Compartir

1 Advertencia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN
TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis

del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando
multiplexación por división de longitud de onda basadas en
redes ópticas pasivas (PON)

AUTOR: Ing. Blum Cárdenas, Juan Pablo

Trabajo de Titulación

previo a la obtención del Grado Académico de Magister en
Telecomunicaciones

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, Ecuador

11 de Diciembre del 2020

Dedicatoria

Antes, quisiera agradecer a aquel sin quien nada se puede hacer, te agradezco Dios mío por haberme dado el coraje, la ayuda, la paciencia para la realización de este modesto trabajo.

A mis padres, que pueden estar orgullosos y encontrar aquí el resultado de largos años de sacrificio y penuria para ayudarme a seguir adelante en la vida.; gracias por los nobles valores, la educación y el apoyo permanente de ustedes.

A mis amigos, compañeros y docentes de la Maestría en Telecomunicaciones de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

Blum Cárdenas, Juan Pablo

Agradecimientos

Al final de este trabajo, en el momento de las últimas relecturas con algo de retrospectiva, se observó todo lo que la presentación de este trabajo se debe al consejo de mi tutor Fernando Palacios. Que reciba aquí mi más sincero agradecimiento por la amabilidad, comprensión y paciencia con que nos ha enseñado el rigor intelectual y la tenacidad necesaria para la realización de esta obra.

Blum Cárdenas, Juan Pablo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 

M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO
TUTOR

f. 

M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO
REVISOR

f. 

M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NESTOR ARMANDO
REVISOR

f. 

M. Sc. ROMERO PAZ MANUEL DE JESÚS
DIRECTOR DEL PROGRAMA

ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas.....	XIII
Resumen	XIV
Abstract.....	XV
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Antecedentes.....	17
1.3. Definición del problema	18
1.4. Justificación del problema a investigar.	18
1.5. Objetivos.....	18
1.6. Hipótesis.....	19
1.7. Metodología de investigación.	19
Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.....	20
2.1. Introducción de las tecnologías de redes de acceso.	20
2.2. Redes XDSL y cable módem.....	21
2.3. Redes de acceso de fibra óptica.	22
2.4. Topologías de comunicaciones por fibra óptica.....	29
2.4.1. Topología en anillo.	29
2.4.2. Topología en estrella.....	30
2.4.3. Topología en bus.....	31
2.4.4. Topología en árbol.....	31
2.5. Técnicas de multiplexación en redes de acceso ópticos.	33
2.5.1. Multiplexación por división de tiempo (TDM).....	33
2.5.2. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)	34
2.6. Amplificadores ópticos.....	34
2.7. Amplificadores ópticos semiconductores (SOA).....	36
2.8. Extracción de parámetros del modelo para SOAs.....	40
2.8.1. Dispositivo bajo prueba (DUT).....	40

Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.	42
3.1. Descripción del modelado de simulación.....	42
3.2. Diseños experimentales de los escenarios de simulación.....	44
3.2.1. Escenario 1: Transmisión WiFi en el sistema WDM-PON	44
3.2.1.1. Caracterización de RSOA.	46
3.2.2. Escenario 2: Transmisión WiFi con enlaces descendentes OOK.	49
3.2.3. Análisis de resultados para el escenario 1.	51
3.2.4. Análisis de resultados para el escenario 1.	53
Conclusiones	59
Recomendaciones	60
Bibliografía	61

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Bandas espectrales en comunicaciones por fibra óptica.	24
Figura 2. 2: Arquitecturas básicas de PONs y AONs.....	25
Figura 2. 3: Esquemático de los inconvenientes en un sistema RoF.....	26
Figura 2. 4: Equipo del terminal de línea óptica (OLT).....	27
Figura 2. 5: Equipo del terminal de red óptica (ONT).....	28
Figura 2. 6: Equipo del divisor óptico o splitter.....	28
Figura 2. 7: Topología en anillo para redes de acceso por fibra óptica.....	30
Figura 2. 8: Topología en bus para redes de acceso por fibra óptica.	30
Figura 2. 9: Topología en bus para redes de acceso por fibra óptica.	31
Figura 2. 10: Topología en árbol para redes de acceso por fibra óptica.	31
Figura 2. 11: Arquitectura básica de la red de acceso FTTx.....	32
Figura 2. 12: Arquitectura de la técnica de multiplexación por división de tiempo (TDM).....	33
Figura 2. 13: Arquitectura de la técnica de multiplexación de división de longitud de onda (WDM).	34
Figura 2. 14: Arquitectura de la técnica de multiplexación de división de longitud de onda (WDM).	35
Figura 2. 15: Bandas de energía de un semiconductor	37
Figura 2. 16: Interacción de fotones de luz con los portadores denominados (a) absorción estimulada, (b) emisión espontánea, y (c) emisión estimulada.	38
Figura 2. 17: Especificaciones técnicas de la (a) potencia óptica de salida para diferentes corrientes de polarización, y (b) el ruido ASE espectral a 500 mA.	41

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques de la propuesta práctica para sistemas RoF.....	42
--	----

Figura 3. 2: Esquemas para enlaces descendentes y ascendentes del escenario 1.	43
Figura 3. 3: Esquemas para enlaces descendentes y ascendentes del escenario 2.	43
Figura 3. 4: Escenario 1 para implementación de la transmisión WiFi full dúplex.	45
Figura 3. 5: Medición del rango dinámico libre de espurios (SFDR) de RSOA en banda IF.	47
Figura 3. 6: Variación de EVM con respecto a (a) potencia de inyección y (b) voltaje de oscilación de RF.	48
Figura 3. 7: Espectro a diferentes corrientes de polarización (bias).	49
Figura 3. 8: Escenario 2 para implementación de la transmisión WiFi full dúplex con enlaces descendentes OOK.	50
Figura 3. 9: Espectro a diferentes corrientes de polarización (bias).	52
Figura 3. 10: Medición SFDR del RSOA.	53
Figura 3. 11: Respuesta de frecuencia del RSOA.	54
Figura 3. 12: Espectro UL y DL en el punto de observación 2 y 3.	55
Figura 3. 13: Espectro UL y DL en el punto de observación 1 y 2.	55
Figura 3. 14: EVM de señal WiFi OFDM para UL (2.452 GHz), DL (2.472 GHz); y constelaciones (UL y DL) para 20, 30 y 40 km (DL izquierda y UL derecha).	56
Figura 3. 15: Diagrama de ojo de la señal OOK DL a 20 km (izquierda) y 40 km (derecha).	57

Índice de Tablas

Capítulo 2:

Tabla 2. 1: Velocidades y alcance de la tecnología xDSL.	21
Tabla 2. 2: Versiones de la tecnología DOCSIS.	22
Tabla 2. 3: Relación de splitters ópticos y su respectiva atenuación.	29

Resumen

En este trabajo de examen complejo, se presenta un estudio de los sistemas de comunicación híbridos de fibra/inalámbricos conocidos también como sistemas de radio sobre fibra (RoF). El presente estudio trata el “Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)”. Primero, en el capítulo 1 se describe el principio de estos sistemas y se dispone los intereses del enfoque de fibra inalámbrica dual. Este enfoque permite beneficiarse de las ventajas de ambas tecnologías y, mediante un efecto cruzado, superar sus respectivos inconvenientes. En segundo lugar, en el capítulo 2 se da una visión general de los fundamentos teóricos de las redes de acceso y de las aplicaciones posibles para futuras implementaciones mediante simulación. Finalmente, en el capítulo 3 se presenta el diseño, simulación y análisis de resultados que se obtuvieron durante las pruebas según los parámetros de los dos escenarios propuestos en el presente documento.

Palabras claves: Radio, Fibra, Comunicaciones, Multiplexación, Simulación, Inalámbrico.

Abstract

In this complex review paper, a study of hybrid fiber / wireless communication systems also known as radio over fiber (RoF) systems is presented. This study deals with the "Analysis of the radio over fiber (RoF) system using wavelength division multiplexing based on passive optical networks (PON)". First, Chapter 1 describes the principle of these systems and sets out the interests of the dual wireless fiber approach. This approach makes it possible to benefit from the advantages of both technologies and, through a crossover effect, to overcome their respective drawbacks. Second, Chapter 2 gives an overview of the theoretical foundations of access networks and possible applications for future simulation implementations. Finally, chapter 3 presents the design, simulation and analysis of results obtained during the tests according to the parameters of the two scenarios proposed in this document.

Keywords: Radio, Fiber, Communications, Multiplexing, Simulation, Wireless.

Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.

1.1. Introducción.

El sistema de radio sobre fibra (*Radio-over-Fiber, RoF*) es una integración de redes ópticas y de microondas para acceso inalámbrico. Es una tecnología prometedora competente para proporcionar frontales de antena simples, mayor cobertura y capacidad de acceso inalámbrico. El sistema RoF ha dependido de una tecnología bien establecida para las señales de banda base, basada en la detección directa y enlaces de intensidad modulada, que permiten ofrecer una implementación de muy bajo costo. (Javed & Amin, 2016; Navarro V., 2015)

Esta comunicación óptica de banda base con procesamiento de señales digitales permite utilizar formatos de modulación avanzados. Las amplias ventajas de utilizar una fibra óptica, es su peso ligero, menos pérdidas, mayor ancho de banda, tamaño pequeño y bajo costo del cable, la hacen más adecuada para transportar señales de radio a sitios de antenas de manera eficiente, ubicadas remotamente en una red inalámbrica. (Novak et al., 2009)

El concepto de RoF significa transportar información por fibra óptica modulando la luz con la señal de radio. Esta modulación se puede realizar directamente con la señal de radio o en una frecuencia intermedia. 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 los diferentes sitios de la antena y la transparencia y escalabilidad. (Vyas & Agrawal, 2012)

Por ejemplo, en el caso de las redes metropolitanas y las de acceso soportan continuamente el tráfico de red de dos a tres veces (el tráfico solo se transmite en redes metropolitanas y las redes de acceso que pasa por alto los enlaces de largo alcance) en comparación con las redes de largo

alcance. El aumento del tráfico se debe principalmente a la creciente diversidad de aplicaciones (computación en la nube, almacenamiento, intercambio de archivos, web, datos, voz sobre IP (VoIP), video móvil y redes sociales, etc.) y la creciente proliferación de dispositivos inalámbricos (dispositivos portátiles, dispositivos de sensor inalámbrico, teléfonos inteligentes, tablets y computadoras portátiles, entre otros).

1.2. Antecedentes.

La red de área local (Local Area Network, LAN) celular e inalámbrica como dos tecnologías de acceso inalámbrico complementarias son clave para la interconexión de dispositivos inalámbricos de próxima generación. Se esperan velocidades de datos ultra altas de hasta 10 Gbps para dispositivos inalámbricos suscritos y tráfico emergente de máquina a máquina (M2M). La innovación tecnológica continua y la exploración de nuevos espectros aceleran el ritmo de la evolución de la tecnología inalámbrica en la próxima década.

En la evolución de los estándares celulares, como el caso de LTE (Long Term Evolution) Advanced utilizan de manera flexible el espectro disponible para mantener tasas de rendimiento superiores a 1 Gbps. La agregación de portadoras, la diversidad de MIMO (Multiple-input y Multiple-output) y las tecnologías de coordinación multipunto son abordadas para LTE-Advanced. (Morales S., 2015)

En la familia 802.11, basándose en la modulación OFDM (multiplexación por división de frecuencia ortogonal) de orden superior y la tecnología MIMO multiusuario, 802.11ac podría operar hasta 1300 Mbps en un canal de 80 MHz en la banda de 5 GHz. Mientras que 802.11ad define una nueva capa física para operar en el espectro milimétrico de 60 GHz para suministrar hasta decenas de Gigabit de capacidad.

La red heterogénea con densificación celular podría ser el prototipo de la futura red inalámbrica para mejorar la experiencia del usuario final. Las células pequeñas (femtoceldas, microceldas y picoceldas) como

complemento de las macroceldas proporcionan un mayor rendimiento en áreas de uso intensivo de usuarios y dejan intacta la infraestructura heredada. Mientras tanto, para la compatibilidad futura de ondas milimétricas, se necesitan celdas pequeñas debido a la alta pérdida de propagación de ondas milimétricas.

1.3. Definición del problema

Necesidad de implementar un sistema de radio sobre fibra (RoF), es decir, un sistema híbrido de comunicaciones, utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON).

1.4. Justificación del problema a investigar.

La demanda de ancho de banda de la LAN inalámbrica y celular estimula aún más la red de fronthaul/backhaul de alta capacidad. La fibra óptica es un medio de transmisión prometedor y adecuado para satisfacer los crecientes requisitos de capacidad. Aunque el microondas es ahora la tecnología de backhaul dominante en todo el mundo (60%), carece del soporte para la arquitectura de red futura. Con la necesidad de interconectar nodos de células pequeñas heterogéneas de gran capacidad distribuidas en un área grande con requisitos de baja latencia, las microondas pueden sufrir una gran pérdida y retraso en comparación con la fibra óptica.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Analizar el sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)

1.5.2. Objetivos específicos:

- ✓ Describir el estado del arte de las redes de acceso por fibra óptica y de amplificadores ópticos semiconductores.
- ✓ Diseñar los escenarios de simulación de la tecnología RoF utilizando redes ópticas pasivas multiplexadas por división de longitud de onda.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de los escenarios de simulación propuestos.

1.6. Hipótesis

Se comparan el rendimiento de RF e IF sobre fibra, debido a la alta eficiencia de conversión eléctrica a óptica, donde IF supera a la RF como solución para distribuir la señal WiFi. Finalmente, se realizan experimentos que demuestran su capacidad para transmitir de forma transparente señales WiFi de enlace ascendente y descendente en la misma frecuencia.

1.7. Metodología de investigación.

El método científico se utiliza en todas las ciencias, incluidas la química, la física, la geología y la psicología. Los científicos en estos campos hacen diferentes preguntas y realizan diferentes pruebas. Sin embargo, usan el mismo enfoque básico para encontrar respuestas lógicas y respaldadas por evidencia. Los procedimientos científicos se pueden clasificar desde diferentes puntos de vista. El tipo de procedimiento científico se diferencia en función del tipo de procedimiento científico predominante, es decir, si los métodos empíricos o teóricos prevalecen en el curso del procedimiento científico.

Otra posible clasificación se basa en la forma de explicación o interpretación del tema tratado respectivamente. Con base en este criterio, se diferencian los llamados tipos de métodos científicos. Entre ellos, existen métodos de explicación e interpretación. La explicación procede de lo general a lo individual. La relación general significa familiar (por ejemplo, en forma de una "ley científica"); lo específico son los fenómenos que se explican y que se incluyen en una relación general. La interpretación es un procedimiento diferente.

Capítulo 2: Fundamentos Teóricos.

2.1. Introducción de las tecnologías de redes de acceso.

El presente capítulo se describirán las tecnologías existentes en las redes ópticas pasivas estandarizadas, además, serán descritas brevemente las principales arquitecturas de redes ópticas pasivas (*Passive Optical Network, PON*) y empleo de extensores para redes ópticas de acceso pasivas. La creciente demanda de ancho de banda debido a los nuevos servicios, la saturación del ancho de banda y la limitación de los servicios de las redes de cobre y la competitividad por la calidad y entrega de estos servicios están llevando a los operadores a desplegar y operar redes de fibra óptica.

Entre las redes que utilizan sistemas de transmisión óptica para redes de acceso y redes locales, tales como, la (a) red óptica gigabit pasiva (Gigabit Passive Optical Network, GPON), (b) red óptica ethernet pasiva (Ethernet Passive Optical Network, EPON), (c) red óptica pasiva 10 gigabit (Red óptica pasiva de 10 Gigabit - XGPON), (d) red óptica pasiva por dominio de tiempo y multiplexación por división de longitud de onda (*Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network, TWDM-PON*) y (e) red óptica pasiva basada en multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network, WDM-PON*). (Camino C., 2018)

Aunque, en la actualidad aún existen otras tecnologías que funcionan en las redes de acceso y que ofrecen servicios de Triple Play (Internet de alta velocidad, Televisión y Telefonía), ya sean cableadas o inalámbricas. Por ejemplo, las tecnologías utilizadas en redes cableadas se encuentran las redes (a) híbrida fibra-coaxial (*Hybrid Fiber-Coaxial, HFC*), (b) línea digital del suscriptor (*Digital Subscriber Line, DSL*), incluyendo DSL asimétrico (*Asymmetric DSL, ADSL*), ADSL2, ADSL2 +, DSL de muy alta velocidad (*Very high-bit-rate DSL, VDSL*), DSL basado en la red digital de servicios integrados (Isdn DSL, ISDN) , DSL de alta velocidad de un solo par (*Single-*

pair High-speed DSL, SHDSL) y DSL simétrico (*Symmetric DSL, SDSL*), (c) red óptica pasiva (PON) y ethernet, y puede haber combinaciones entre ellos.

2.2. Redes XDSL y cable módem.

La línea de abonado digital (xDSL), es una tecnología en la que los cables de cobre de las líneas telefónicas tradicionales se conectan a los usuarios domésticos y comerciales a través de la central telefónica. De esta manera, las compañías telefónicas brindan acceso de banda ancha a sus usuarios utilizando parte del espectro que no utilizado en la transmisión de voz.

La tecnología xDSL utiliza el protocolo punto a punto (*Point-to-Point Protocol, PPP*) y su principal limitación es el ruido resultante de la diafonía entre cables metálicos. Su ancho de banda depende del nivel de ruido que, a su vez, depende de la longitud del enlace de cobre. En la tabla 2.1 se resumen las tasas de velocidades (downstream y upstream) y alcance de algunas tecnologías xDSL, tales como ADSL, VDSL, IDSL, SHDSL y SDSL.

Tabla 2. 1: Velocidades y alcance de la tecnología xDSL.

	Downstream (Mbps)	Upstream (Mbps)	Alcance (km)
ADSL	1.5 a 8	0.640 a 1	5.5
VDSL	13 a 55	1.6 a 2.3	0.3 a 1.5
IDSL	0.144	0.144	5.5
SHDSL	0.192 a 2.3	0.192 a 2.3	8.52
SDSL	1.168	1.168	3.65

Fuente: (Söğüt et al., 2017)

Al igual que las empresas telefónicas (por ejemplo, CNT-EP), las empresas de televisión por cable (TV Cable y Claro TV) ofrecen acceso de banda ancha a sus usuarios a través de la tecnología de cable módem conocida como especificación de interfaz de servicio de datos por cable (Data Over Cable Service Interface Specification, DOCSIS).

Esta tecnología utiliza canales de radiofrecuencia (RF) en la infraestructura de transmisión de los televisores por suscripción. Para reducir las pérdidas en los cables coaxiales y la necesidad de muchos amplificadores en serie, las empresas comenzaron a utilizar fibra óptica en las troncales de distribución, es decir, en la parte más cercana al centro de servicio.

En el área de distribución a abonados se continuó utilizando cables coaxiales, esta tecnología de diseño mixto se denomina red HFC. A diferencia de DSL, donde la arquitectura física de los cables de cobre es punto a punto, la tecnología de cable módem comparte el medio de transmisión, por lo que el ancho de banda se divide entre todos los usuarios de la red.

La tecnología DOCSIS establece las tasas de flujo descendente y ascendente (véase la Tabla 2.2). Al compartir el ancho de banda entre cientos de usuarios, la tasa individual es relativamente baja (menos de 1 Mbps). Esta red fue construida principalmente para ofrecer servicios de transmisión, lo que dificulta el modelo de comunicación bidireccional de una red de acceso.

Tabla 2. 2: Versiones de la tecnología DOCSIS.

DOCSIS	Downstream (Mbps)	Upstream (Mbps)
1.x	38	9
2.0	38	27
3.0 – 4 canales	>152	>108
3.0 – 8 canales	>304	>108

Fuente: (Xiao, 2016)

2.3. Redes de acceso de fibra óptica.

La transmisión a través de fibra óptica ofrece un gran ancho de banda en comparación con las redes de comunicación que utilizan pares metálicos,

siendo considerada la solución final para brindar acceso de banda ancha a la última milla (término utilizado para referenciar accesos a la red de los usuarios), donde es el principal punto de limitación para atender servicios que demandan alta velocidad de transmisión. Las tecnologías como xDSL pueden aumentar el ancho de banda disponible en la infraestructura de cobre existente, sin embargo, necesitan nuevas infraestructuras de red para adaptarse a la demanda de nuevas aplicaciones. En estas infraestructuras, se debe ampliar el ancho de banda, con garantía de calidad de servicio (Quality of Service - QoS) y a un costo reducido.

Existen cinco bandas espectrales (véase la figura 2.1) las cuales se utilizan para definir las características de la fibra óptica y los equipos destinados a la implementación del sistema de comunicaciones ópticas (amplificadores, multiplexores, etc.), las bandas de transmisión son la banda original (O-Band): definida entre 1260 hasta 1360 nm, banda extendida (E-Band): definida entre 1360 a 1460 nm, banda corta S (S-Band): definida entre 1530 a 1565 nm, y banda larga (L-Band): definida entre 1565 a 1625 nm.

Los primeros sistemas desarrollados comprendían longitudes de onda de 800 a 900 nm, lo que puede considerarse como la primera ventaja de la fibra óptica, sin embargo, las pérdidas en esta región son altas y limitantes de transmisión en distancias cortas. El estándar ITU G.694.2 especifica 18 longitudes de onda espaciadas desde 20 nm entre 1270 nm y 1610 nm, inclusive, como se muestra en la Figura 2.1. Este trabajo se centra en la banda operativa de la red GPON, que son las bandas O y S.

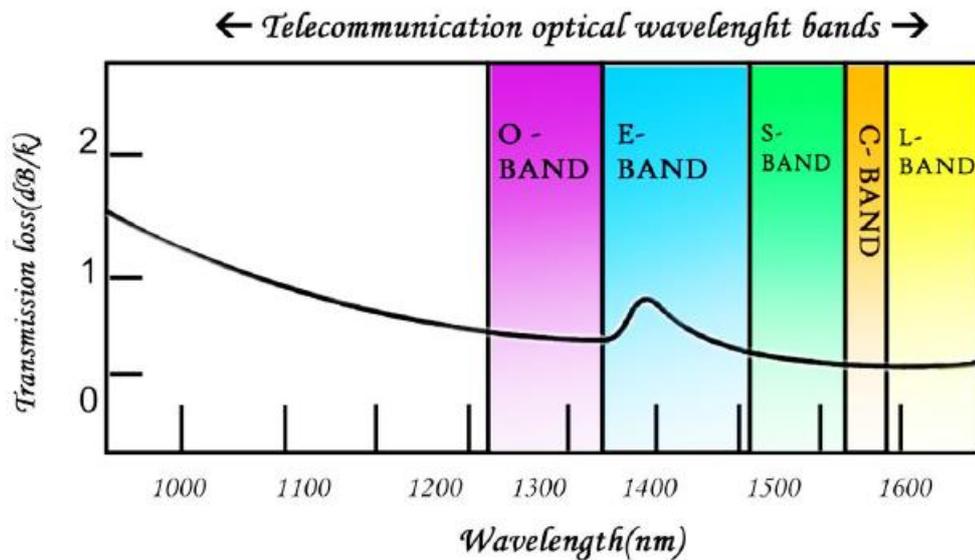


Figura 2. 1: Bandas espectrales en comunicaciones por fibra óptica.
Fuente: (Irshad A. & Sathish K., 2019)

Las redes de acceso de fibra óptica se pueden clasificar en dos categorías según la arquitectura de distribución de cables ópticos: punto a punto y punto a multipunto. En la topología física punto a punto, el número de fibras es igual al número de usuarios, lo que hace que la red sea menos flexible en términos de instalación y mantenimiento, por lo que se limita al servicio masivo de usuarios. En la arquitectura punto a multipunto, varios usuarios comparten una fibra hasta un nodo remoto (*Remote Node, RN*), desde el cual cada cliente tiene su propio enlace óptico.

Una RN puede ser pasivo o activo, según sea alimentado eléctricamente o no. Si requiere fuente de alimentación, la arquitectura se denomina red óptica activa (*Active Optical Network, AON*), caso contrario, la arquitectura se denomina red óptica pasiva (PON). Las PONs se desarrollaron inicialmente en la década de los años 80 como un método viable de compartir infraestructura de fibra para proporcionar telefonía a las empresas telefónicas fijas. La figura 2.2 muestra la arquitectura básica de PONs versus AONs.

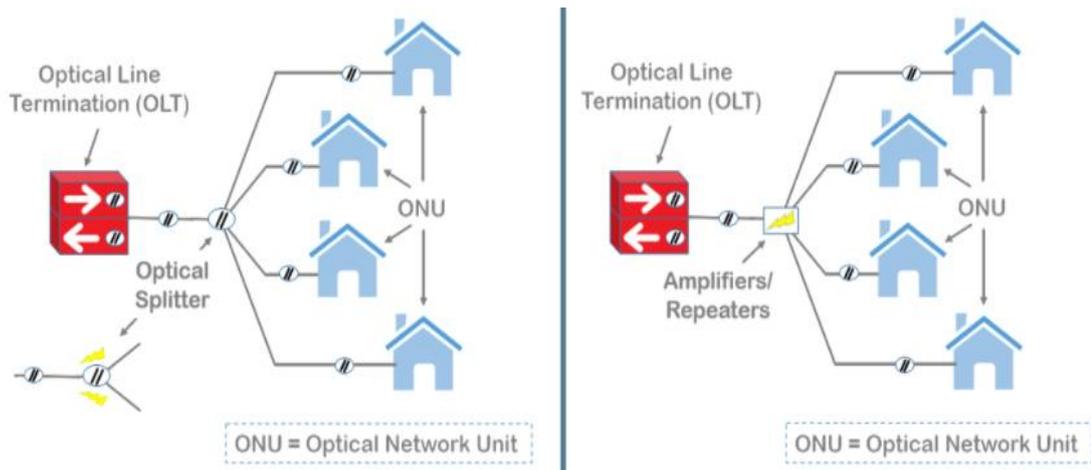


Figura 2. 2: Arquitecturas básicas de PONs y AONs.

Fuente: (Kornegay, 2019)

Las PONs son más ventajosas que las AONs en términos de instalación, operación, mantenimiento y posibilidad de evolución de la red. La planta externa de una PON tiene un costo menor, ya que no requieren componentes eléctricos, tales como, interruptores o amplificadores Ethernet. Los costos operativos también se reducen en las PON's, dado que no se requieren de operadores para que monitoreen la parte eléctrica o dar mantenimiento a las baterías de respaldo. Además, otra desventaja de AON's es que los componentes eléctricos suelen fallar, lo que requiere mayor mantenimiento de la red.

En las PONs (véase la figura 2.3) el terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal, OLT*), ubicado en la oficina central (*Central Office, CO*) del proveedor de servicios, que está conectado a varias unidades de red óptica (*Optical Network Unidades - ONUs*) o terminales de redes ópticas (*Optical Network Terminal - ONTs*) a través de uno o más divisores ópticos (splitters), que se ubican dentro de la RN, superando en gran medida las limitaciones impuestas por las redes xDSL.

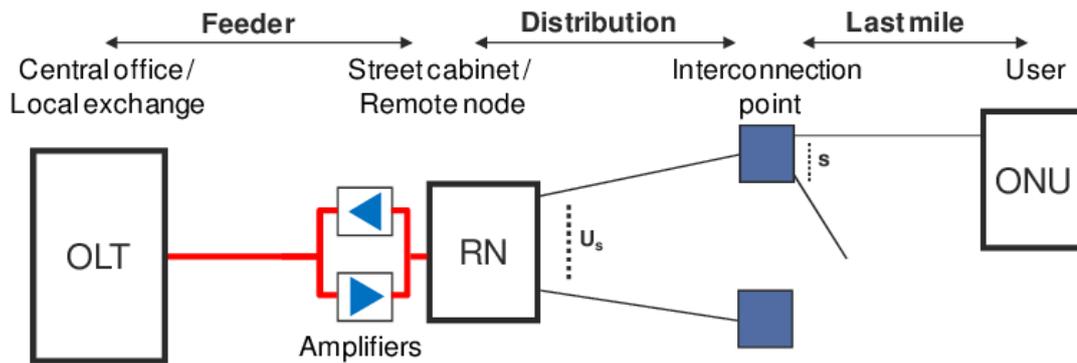


Figura 2. 3: Esquemático de los inconvenientes en un sistema RoF.
Fuente: (Lannoo et al., 2010)

Antes de detallar las topologías aplicadas a las redes ópticas pasivas, es importante mencionar cada elemento que conforma la PON, a continuación:

a) Terminal de Línea Óptica (OLT):

Es un elemento de red instalado en la oficina central (CO) del proveedor de servicio de telecomunicaciones. La OLT es el elemento de la red responsable de la gestión del sistema, pudiendo estar físicamente en la central o de forma remota en un armario o punto de presencia del operador. La señal óptica es transmitida por la OLT a través de la red de distribución óptica. Es responsable de agregar y enrutar todo el tráfico proveniente de los clientes y reenviarlo a la red de servicio.

Además, el elemento OLT se encarga de procesar las señales GPON, y de la sincronización entre ONUs y realizar controles de seguridad. Tiene interfaces para comunicarse con los conmutadores hacia el núcleo de la red e interfaces ópticas GPON para comunicarse con los suscriptores, tal como se muestra en la figura 2.4 (Saliou, 2010). Normalmente la distancia de alcance de una OLT para encontrarse con la ONT/ONU es de 20 km y puede controlar un total de hasta 128 ONTs dependiendo de la distancia y topología adoptada.



Figura 2. 4: Equipo del terminal de línea óptica (OLT).
Fuente: (Saliou, 2010)

b) Terminal de red óptica (ONT) o unidad de red óptica (ONU):

La ONT/ONU es el elemento de la red que se instala en el usuario y proporciona la conexión efectiva a la red de datos. Sus principales funciones son procesar los datos recibidos de la OLT y proporcionar interfaces para servicios de comunicación de datos, telefonía, televisión. Cuando el equipo se instala cerca del usuario, se denomina ONU. Además de la ONU, se instala toda una infraestructura de protección física (para evitar vandalismo y como protección climática) y batería de respaldo para posibles cortes de energía.

A partir de ahí se tiene un ejemplo de red FTTx, donde el servicio a los usuarios se puede realizar mediante cable par metálico (xDSL), cable coaxial, conexión de fibra óptica independiente o incluso conexión inalámbrica. Cuando el equipo se instala en el domicilio del usuario, se denomina ONT, tal como se muestra en la figura 2.5.



Figura 2. 5: Equipo del terminal de red óptica (ONT).
Fuente: (Telefeccient, 2020)

c) Divisor Óptico Pasivo (Splitter):

El splitter es el elemento de la red encargado de dividir o combinar la señal de fibra óptica. En la dirección descendente (downstream), la señal de entrada se divide y se envía a todos los puertos de salida, mientras que, en la dirección ascendente (upstream), las señales de todas las ONU/ONT se combinan y transmiten a la OLT. El splitter permite dividir la señal en 1x4, 1x8, 1x16, 1x32, 1x64 y 1x128, por lo que una sola fibra es capaz de tener hasta 128 fibras de salida para servir a los usuarios, tal como se muestra en la figura 2.6.



Figura 2. 6: Equipo del divisor óptico o splitter.
Fuente: (Optytech, 2020)

La tabla 2.3 muestra la pérdida de potencia (atenuación) en la señal de salida en relación con la señal de entrada para los distintos coeficientes del splitter óptico. Cuanto mayor sea la relación de división, menor será la potencia de salida en cada puerto, por ejemplo, si en un splitter óptico la relación 1: 2, es decir, una entrada y dos salidas, idealmente cada salida sería 3 dB menos que la potencia de entrada. Una vez que se conocen los elementos principales de la red óptica pasiva, es importante conocer las diversas topologías de red que se pueden aplicar a una red óptica pasiva (PON).

Tabla 2. 3: Relación de splitters ópticos y su respectiva atenuación.

Splitter	Atenuación (dB)
1:2	3
1:4	6
1:8	9
1:16	12
1:32	15
1:64	18
1:128	21

Elaborado por: Autor.

El tipo de topología de la red xPON viene determinado por la forma en que la señal llega al usuario. La topología más adecuada para un servicio determinado es fundamental para minimizar los costes, garantizar la calidad del servicio y el presupuesto energético.

La adecuada definición de la topología tiene una fuerte influencia en la planificación de la red óptica, algunos factores que influyen en la definición de la topología son: la distribución geográfica de los usuarios y los costos de mantenimiento y operación de la red. Existen varias topologías que se pueden aplicar, tales como: anillo, estrella, bus y árbol cada uno con sus ventajas y desventajas. Las topologías comúnmente utilizadas en las redes PON son aquellas donde la mayor parte de la sección física para la transmisión de datos ocurre a través del enlace de fibra óptica, llegando lo más cerca posible a las terminales de usuario.

2.4. Topologías de comunicaciones por fibra óptica.

En esta sección se describen cada una de las topologías de redes empleadas en comunicaciones ópticas.

2.4.1. Topología en anillo.

En la topología en anillo, generalmente utilizada en redes metropolitanas, los terminales de la red óptica (Optical Network Terminal -

ONTs) se interconectan en serie formando un anillo con la OLT, tal como se muestra en la figura 2.7. En este tipo de topología es posible enviar y recibir señales en ambos sentidos del anillo. La gran ventaja de esta topología es la redundancia, ya que, si la red se interrumpe en un punto determinado, existe otra ruta de transmisión distinta para la OLT, que mantiene la señal. en caso de interrupción. Como desventaja se puede mencionar su capacidad para ofrecer un número limitado de enlaces.

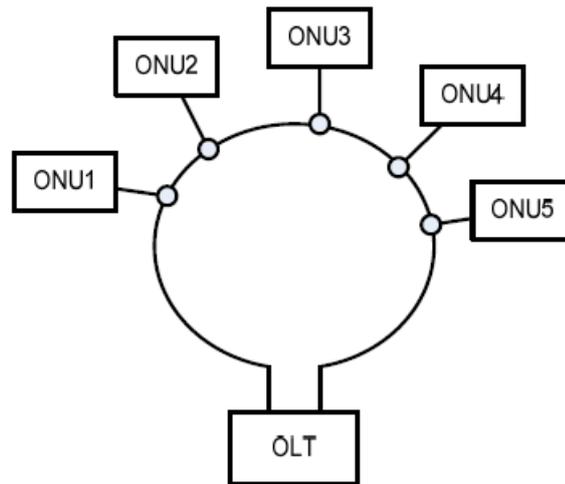


Figura 2. 7: Topología en anillo para redes de acceso por fibra óptica.
Fuente: (Kramer & Pesavento, 2002; Maamoun & Mouftah, 2011)

2.4.2. Topología en estrella.

La figura 2.8 muestra la topología en estrella, está implementa conectividad punto a punto entre la OLT y la ONT. Tiene la ventaja de poder ofrecer un gran ancho de banda dedicado a los usuarios finales y también tiene un bajo costo de operación, administración y mantenimiento.

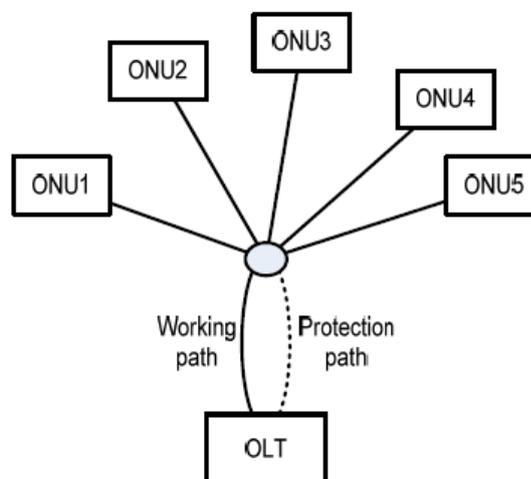


Figura 2. 8: Topología en bus para redes de acceso por fibra óptica.
Fuente: (Kramer & Pesavento, 2002; Maamoun & Mouftah, 2011)

2.4.3. Topología en bus.

La figura 2.9 muestra la topología en bus, está utiliza una fibra óptica para interconectar OLT y ONT, donde, a lo largo de la ruta de servicio, se agregan divisores en una secuencia que se denomina "cascada" para dar servicio a los ONT. Tiene la ventaja de la flexibilidad de la red para servir a los usuarios. Como desventaja esta topología se encuentra con distancias cortas debido a las pérdidas de los divisores.

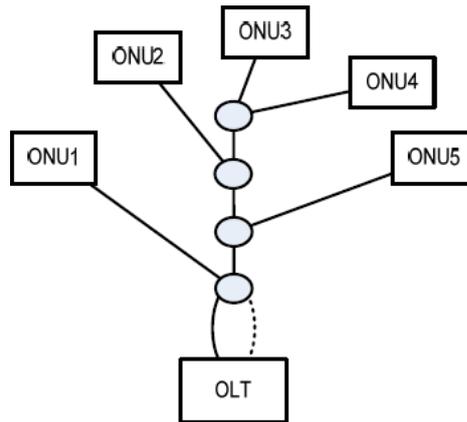


Figura 2. 9: Topología en bus para redes de acceso por fibra óptica.
Fuente: (Kramer & Pesavento, 2002; Maamoun & Mouftah, 2011)

2.4.4. Topología en árbol.

La figura 2.10 muestra la topología en árbol, está es la más utilizada en las redes de acceso. Esta topología programa la arquitectura de puntos multipunto y tiene la ventaja de compartir la infraestructura entre todos los usuarios, además de reducir los costos de mantenimiento en la red de acceso. Se utiliza una sola fibra óptica para conectar los OLT a través de un solo divisor, que se interconecta con usuarios geográficamente dispersos.

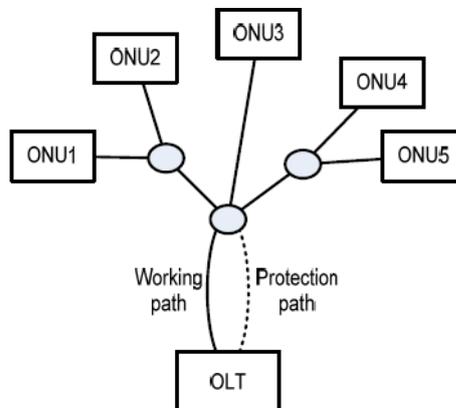


Figura 2. 10: Topología en árbol para redes de acceso por fibra óptica.
Fuente: (Kramer & Pesavento, 2002; Maamoun & Mouftah, 2011)

Una red óptica de abonados también se puede clasificar con relación al punto de servicio del usuario, es decir, en llevar la fibra óptica al punto “x” (Fibra hasta la x, FTTx), donde la “x” hace referencia a una ubicación de terminación de red óptica. Una red FTTx es una red de acceso basada en fibra que conecta una gran cantidad de usuarios a un punto central, conocido como nodo de acceso, dependiendo de la ubicación de la terminación de la red óptica, la "x" puede referirse a:

- ❖ Fibra al edificio (Fiber To The Building, FTTB),
- ❖ Fibra al centro de conmutación (Fiber To The Exchange, FTTEEx),
- ❖ Fibra a un gabinete de distribución de la calle (Fiber To The Cabinet, FTTCab),
- ❖ Fibra a un gabinete ubicado en el bloque del usuario (Fiber To The Curb, FTTC)
- ❖ Fibra hasta que se establezca un usuario, o fibra hasta el hogar (Fiber To The Home, FTTH).

En la figura 2.11 se muestra tres de las cinco arquitecturas de FTTx ya descritas. El concepto de FTTx surgió para satisfacer la creciente demanda de servicios de alta capacidad por parte de los usuarios. Entre las redes PON existentes, la red óptica pasiva basada en multiplexación por división de tiempo es la tecnología más utilizada en la actualidad, que se describe en la siguiente sección.

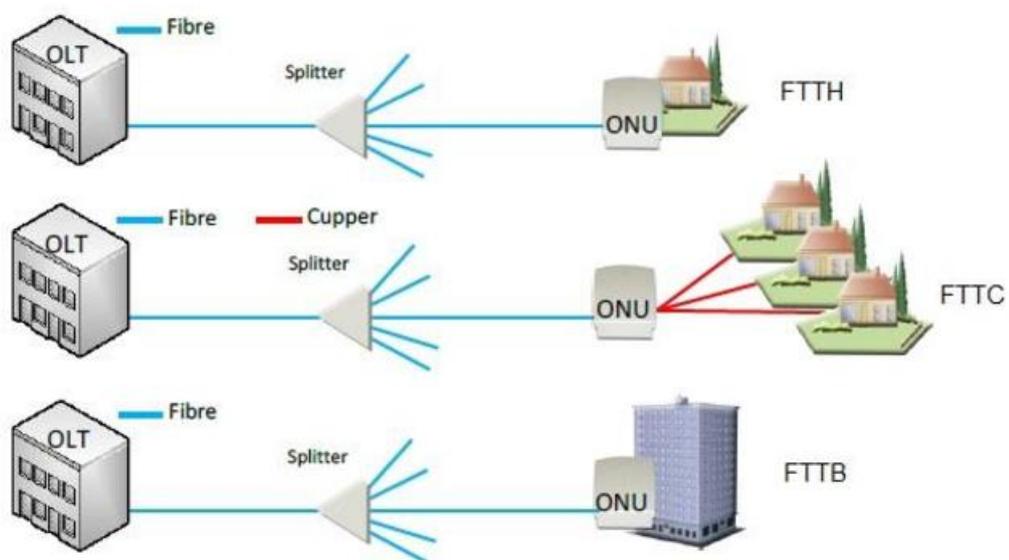


Figura 2. 11: Arquitectura básica de la red de acceso FTTx.
Fuente: (Jasim Kadhim & Abdul-Rahman Hussain, 2013)

2.5. Técnicas de multiplexación en redes de acceso ópticos.

Como ya se explicó, las PONs son redes de acceso de fibra óptica que no tienen elementos activos a lo largo de la planta externa, es decir, los elementos que componen la red no requieren energía eléctrica para su funcionamiento. Como resultado, las PONs tienen una gran ventaja sobre las AONs, ya que su administración y mantenimiento son más simples que los asociados con redes activas.

En principio, para que cada usuario pueda utilizar algún servicio de comunicación ofrecido, es necesario que tenga un enlace "directo", es decir, una red punto a punto con el proveedor de dicho servicio. Sin embargo, a través de las técnicas de multiplexación, no es necesario que cada usuario tenga una fibra óptica del conmutador para cada usuario. Los dos tipos principales de multiplexación utilizados en ambas redes se describen en las subsecciones siguientes.

2.5.1. Multiplexación por división de tiempo (TDM).

Como varias unidades de unidades de red óptica (ONU) serán atendidas por el mismo terminal de línea óptica (OLT), una técnica que está bastante extendida hoy en día es la multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*) para acceso ascendente o upstream el acceso múltiple por división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*). TDM consiste en la división temporal del ancho de banda disponible entre usuarios conectados a la misma estructura de red, asignando ventanas de tiempo a cada usuario. La figura 2.12 muestra, esquemáticamente, el funcionamiento de un sistema TDM.

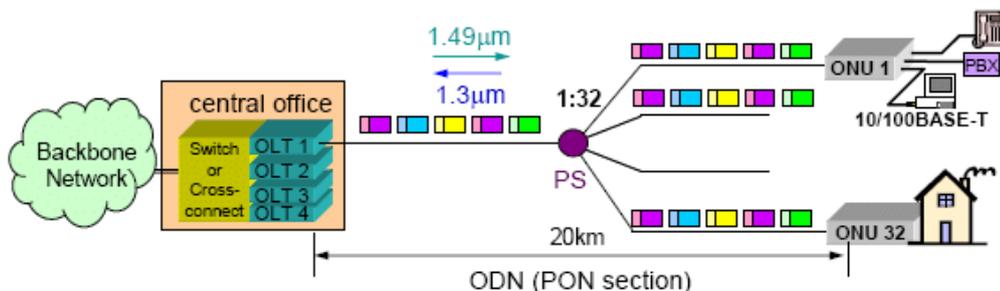


Figura 2. 12: Arquitectura de la técnica de multiplexación por división de tiempo (TDM).

Fuente: (Giacoumidis, 2011)

2.5.2. Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

Una forma de aumentar el número de usuarios atendidos, así como el ancho de banda, es proporcionar acceso a través de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*), en la que se asignan longitudes a cada usuario, es decir, formas de onda específicas, para realizar tráfico descendente o downstream (del operador al usuario) y para la transmisión ascendente o upstream (del usuario al operador).

La figura 2.13 muestra la arquitectura de la técnica de multiplexación de longitud de onda (WDM). Es importante señalar que las ONUs pueden transmitir su información en cualquier momento, ya que la multiplexación se realiza en la frecuencia óptica, a diferencia de la multiplexación en el dominio del tiempo.

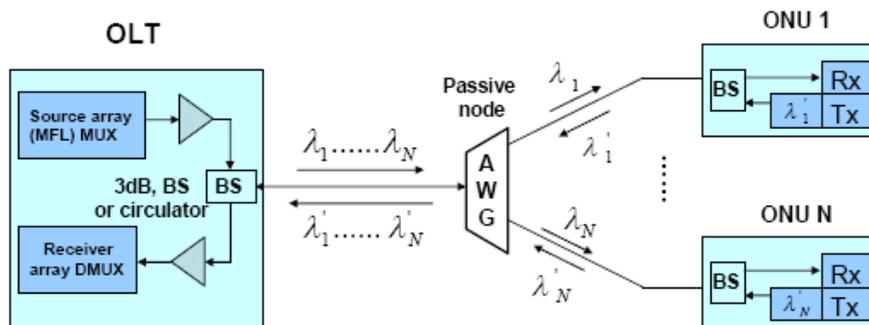


Figura 2. 13: Arquitectura de la técnica de multiplexación de división de longitud de onda (WDM).

Fuente: (Giacoumidis, 2011)

2.6. Amplificadores ópticos.

En diseño de sistemas es de interés desarrollar una herramienta numérica o analítica que permita estimar de forma rápida, tanto la calidad de la señal recibida en términos de la relación señal a ruido óptico (*Optical Signal Noise Ratio, OSNR*), como las no linealidades. Una buena aproximación de estos parámetros permitirá calcular el potencial de un enlace óptico sin la necesidad de desplegar todo el sistema. Además, también ofrece la posibilidad de optimizarlo de una forma más eficiente. Esto no solo reduce el tiempo, sino también los costos, porque ni siquiera hay necesidad de invertir en los componentes físicos requeridos.

La figura 2.14 muestra un enlace básico de transmisión por fibra óptica, que consiste en varios tramos de fibra óptica seguidos de amplificadores ópticos. El propósito de los amplificadores ópticos es recuperar la potencia óptica inicial después de las pérdidas a lo largo del tramo. Los sistemas tradicionales utilizan amplificadores, siendo el más común el amplificador de fibra dopados con erbio (*Erbium-Doped Fibre Amplifiers, EDFAs*). La alta vida útil de la portadora de este tipo de amplificador, del orden de milisegundos, hace que esta tecnología sea completamente robusta en términos de no linealidades.

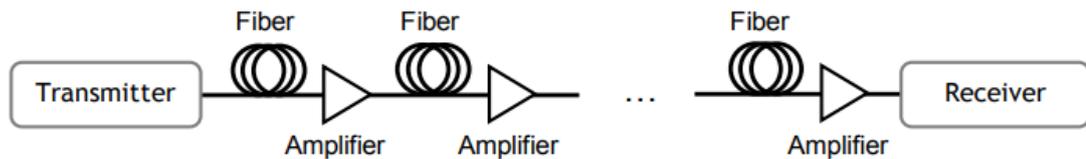


Figura 2. 14: Arquitectura de la técnica de multiplexación de división de longitud de onda (WDM).

Fuente: (Giacoumidis, 2011)

Como los EDFAs generan muy pocas no linealidades, la principal complejidad de las simulaciones solía centrarse en la propagación de la luz a lo largo de la fibra óptica. Este problema se resuelve utilizando el método de Fourier de paso dividido (*Split-Step Fourier Method, SSFM*), que calcula la ecuación de Schrödinger de no linealidad (ver ecuación de abajo) con métodos numéricos. De hecho, la única degradación añadida por los amplificadores EDFA que normalmente se consideran mediante simulaciones numéricas es el ruido ASE que corrompe progresivamente la OSNR.

$$\frac{\partial E}{\partial z} = \underbrace{-\frac{\alpha}{2} E}_{\text{atenuación}} - \underbrace{\frac{j}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2}}_{\text{dispersión}} + \underbrace{\frac{1}{6} \beta_3 \frac{\partial^3 E}{\partial T^3}}_{\text{pendiente de dispersión}} + \underbrace{j\gamma |E|^2 E}_{\text{no linealidades de Kerr}}$$

El uso de los amplificadores ópticos de semiconductores (*Semiconductor Optical Amplifiers, SOAs*) para amplificar las señales ópticas en un sistema de transmisión cambia por completo el paradigma actual, porque la vida útil de la portadora suele ser del orden de cientos de picosegundos. Significa que la simulación de un sistema óptico debe tener

en cuenta también las no linealidades del amplificador óptico, ya que los SOAs son sensibles a las variaciones de envolventes. Este problema se traduce en la adición de algunas no linealidades agrupadas a la señal óptica que corrompen la señal.

En el pasado, se han publicado varios modelos en la literatura con el objetivo de modelar un amplificador óptico semiconductor. El más reconocido es el modelo introducido por Connelly, que es capaz de modelar con precisión el comportamiento de los SOAs en régimen no lineal, pero que requiere tiempos de cálculo elevados incluso para simular una función de un solo paso. Este hecho hace que sea poco práctico para simular el rendimiento de un sistema de transmisión óptica debido tanto a su alta complejidad computacional como a la gran cantidad de parámetros a manejar.

Las cosas se vuelven aún más desafiantes si se considera un sistema WDM completamente cargado. En el análisis de sistemas WDM, el compromiso entre precisión y complejidad es primordial, y la necesidad de encontrar un modelo para simular el rendimiento de una transmisión óptica WDM en un tiempo de cálculo razonable es obligatoria.

2.7. Amplificadores ópticos semiconductores (SOA).

Los amplificadores ópticos semiconductores están hechos de cristales semiconductores compuestos del grupo III-V como GaAs / AlGaAs, InP / InGaAs, InP / InGaAsP e InP / InAlGaAs. Las propiedades ópticas de los SOAs se pueden analizar mediante el estudio de las bandas de energía de los semiconductores. Por naturaleza, los portadores tienden a moverse a los estados menos energéticos (véase la figura 2.15) por lo que, en equilibrio térmico se puede diferenciar dos tipos de bandas, que son: (a) las bandas donde tienden a colocarse los portadores, que se denominan bandas llenas, y (b) los que tienden a estar vacíos, las bandas sin relleno. Estos dos tipos de bandas están delimitados por el nivel de Fermi.

El nivel de Fermi se define como la energía requerida para agregar otra portadora al semiconductor. Se definen tanto la banda de valencia (*Valence Band, VB*) y la banda de conducción (*Conduction Band, CB*) como las bandas más cercanas al nivel de Fermi. Por simplicidad, solo se consideran los efectos que ocurren entre estas dos bandas. En consecuencia, se va a considerar que los portadores se llaman electrones en CB y huecos en VB.

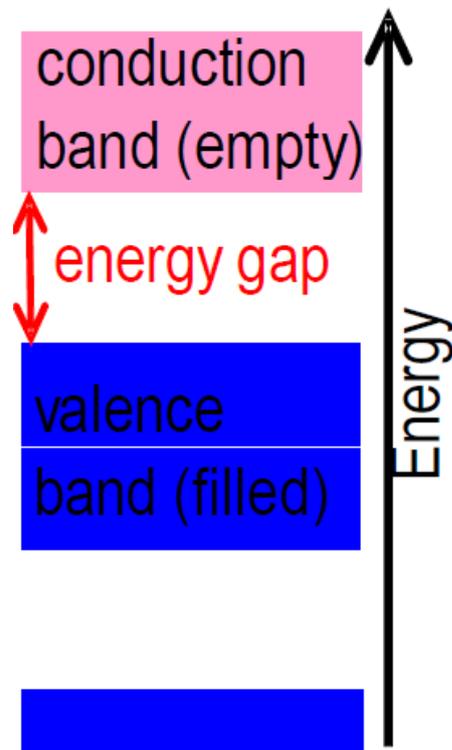


Figura 2. 15: Bandas de energía de un semiconductor
Fuente: (Arulsamy, 2017)

Los fotones de luz interactúan con los portadores a través de diferentes procesos, siendo los más importantes: la absorción estimulada, la emisión espontánea y la emisión estimulada. En la figura 2.16 (a) a (c) se muestran estos procesos. Por ejemplo, un fotón incidente puede interactuar con un agujero en el VB y, si la energía del fotón es suficiente, el agujero puede absorber esta energía y subir al CB. Por tanto, a este proceso se lo llama absorción estimulada (véase la figura 2.16 a).

Como se dijo antes, los portadores tienden a moverse hacia bandas de energía más bajas. Un electrón después de cierto tiempo en el CB puede descender espontáneamente al VB. Este electrón genera un fotón con

frecuencia y fase arbitrarias. Consecuentemente, a este proceso se lo llama emisión espontánea (véase la figura 2.16 b). Finalmente, un fotón incidente puede interactuar con un electrón en CB moviéndolo a VB. El resultado de esta interacción es un nuevo fotón con las mismas propiedades que el original. Finalmente, a este proceso se llama emisión estimulada (véase la figura 2.16 c).

Para fines de amplificación de luz, solo se está interesado en la emisión estimulada de radiación. Esta operación se puede realizar en cascada durante el paso de los fotones por la cavidad generando cada vez más fotones, amplificando así la señal de entrada. Por otro lado, la emisión espontánea de radiación genera fotones con frecuencia y fase aleatorias que inducen el conocido ruido ASE que contamina la señal óptica.

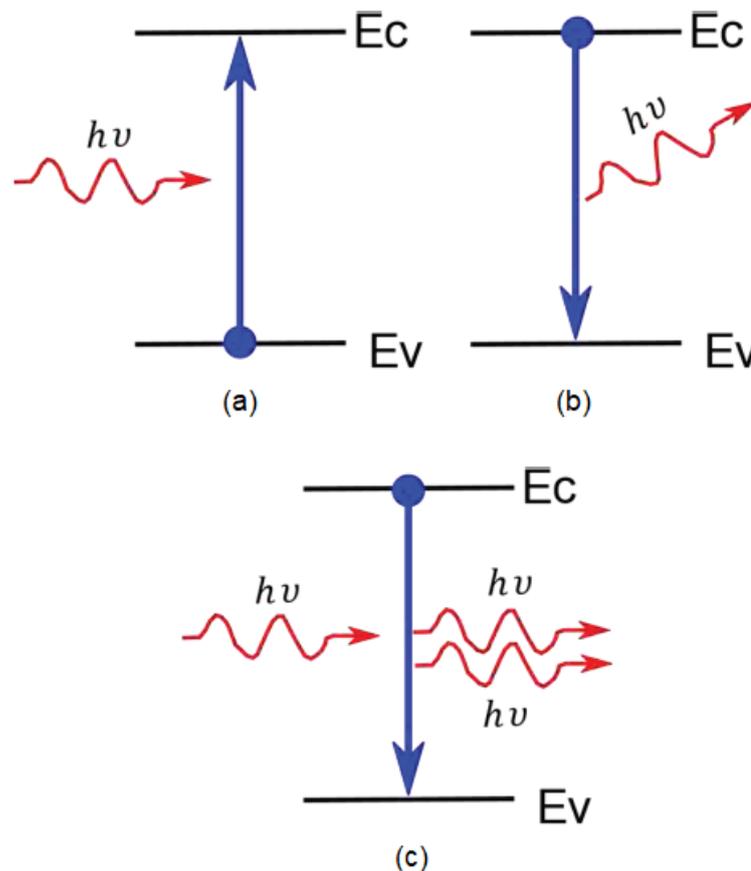


Figura 2. 16: Interacción de fotones de luz con los portadores denominados (a) absorción estimulada, (b) emisión espontánea, y (c) emisión estimulada.

Fuente: (Sivadasan, 2017)

Elaborado por: Autor.

En equilibrio térmico, la distribución de portadores no es la más favorable para la emisión estimulada de radiación. En este estado, los huecos en el VB dominan frente a los electrones en el CB y la emisión espontánea domina frente a la emisión estimulada. Se puede resolver este problema aumentando la densidad de electrones en el CB, lo que se llama inversión de población (cuando la densidad de portadores es mayor en el nivel superior), bombeando eléctricamente el semiconductor. Con la inversión de la población, domina la emisión estimulada y hay ganancia en la cavidad.

Para modelar esta ganancia, se debe considerar que la ganancia aumenta linealmente con N , el número de electrones en el CB, como se expresa en la siguiente ecuación.

$$g(N) = \sigma_g(N - N_0)$$

Donde, N_0 es el valor de transparencia, definido como el valor mínimo de electrones necesarios en el CB para garantizar la población y σ_g es la ganancia diferencial. Aunque, también se puede expresar matemáticamente las diferentes fórmulas que rigen la dinámica básica de los SOAs, como, por ejemplo:

$$\frac{dP_h}{dt} = gP_h + R_{sp} - \frac{P_h}{\tau_p}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \frac{N}{\tau_c} - gP_h$$

Donde, P_h es el número de fotones dentro de la cavidad, R_{sp} se refiere al término de emisión espontánea, I es la corriente de polarización para forzar la inversión de la población, q es la carga de un electrón ($1.602 \times 10^{-19}C$). Finalmente, τ_p y τ_c se refieren a lo que se llama vida útil de fotones y portadores. También, se lo define como el tiempo medio que un fotón o un electrón, respectivamente, necesita para recombinarse.

Las últimas dos ecuaciones están muy relacionadas entre sí y representan la evolución de fotones y electrones dentro de la cavidad. Se puede interpretar de forma intuitiva. Se observa que el término gP_h está presente en ambas ecuaciones, representa la emisión estimulada de radiación. Cuando se produce una emisión estimulada de radiación, se generan nuevos fotones a partir de los electrones en el CB que se mueven hacia el VB.

La emisión espontánea representada por R_{sp} genera nuevos fotones. Los dos términos que los contienen en las ecuaciones representan, respectivamente, la pérdida de fotones debido a la absorción de la cavidad y la pérdida de portadores debido a la emisión espontánea o la recombinación no radiativo.

Finalmente, el término $\frac{I}{q}$ se refiere al bombeo eléctrico de electrones donde I es la corriente de polarización y q es la carga de un electrón. Nótese que todos los efectos comentados en la figura 2.16 se han tenido en cuenta en la definición de estas ecuaciones. Estas ecuaciones son las mismas que se utilizan para modelar un láser semiconductor. De hecho, un SOA puede verse como un láser, pero sin reflectividad en las facetas de las cavidades.

2.8. Extracción de parámetros del modelo para SOAs.

En esta sección se describen los parámetros de los amplificadores ópticos semiconductores.

2.8.1. Dispositivo bajo prueba (DUT).

En esta sección se extrae experimentalmente los diferentes parámetros como ganancia, potencia de saturación, figura de ruido que son necesarios para evaluar el modelo descrito anteriormente. Como dispositivo bajo prueba (*Device Under Test, DUT*) se ha seleccionado una SOA de última generación. Por ejemplo, el SOA, comercializada por Thorlabs, ha sido optimizada para trabajar en banda C (según sus especificaciones de 1528 a 1562 nm).

Se decide analizar este SOA estándar de pozo multi-cuántico para evitar posibles efectos adicionales asociados a una SOA de banda ultra ancha. Efectivamente, el hecho de utilizar una SOA de última generación en este capítulo nos permite caracterizar en el próximo capítulo los SOA reflectivos conocidos como RSOA. En la figura 2.17 se muestra las especificaciones del DUT proporcionadas por Thorlabs. En la figura 2.17 a se observa la potencia óptica de salida y el voltaje directo en función de la corriente de polarización. Tenga en cuenta que $g(N) = \sigma_g(N - N_0)$, la SOA tiene una corriente de transparencia. Por debajo de este valor no se logra la inversión de la población y la potencia de salida es baja. Para esta SOA de última generación, la corriente de transparencia es de alrededor de 100 mA. La potencia de salida aumenta gradualmente con la corriente. Se selecciona una corriente base de 500 mA, que se considera la corriente de funcionamiento.

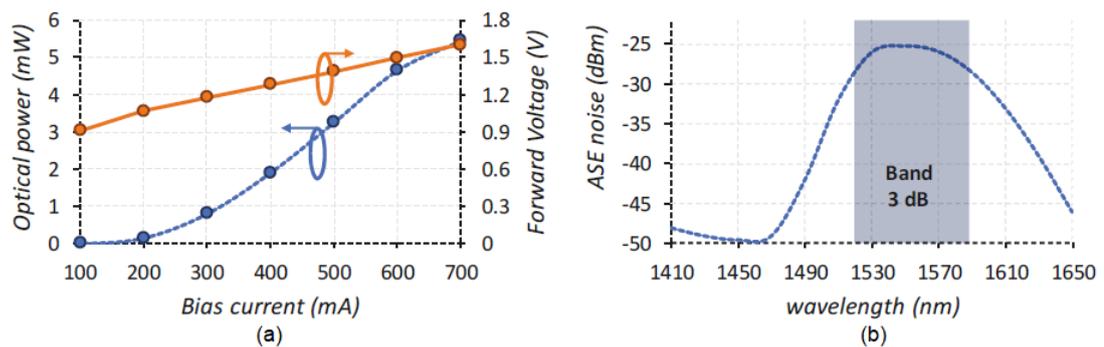


Figura 2. 17: Especificaciones técnicas de la (a) potencia óptica de salida para diferentes corrientes de polarización, y (b) el ruido ASE espectral a 500 mA.
Fuente: (Sivadasan, 2017)

Capítulo 3: Diseño y análisis de resultados.

3.1. Descripción del modelado de simulación.

El objetivo general del componente práctico del examen complejo se muestra en la figura 3.1. Las soluciones propuestas se resumen con características comunes y configuraciones de variación también descritas en la figura 3.1. Para las diferentes configuraciones de experimentos, se aplican diferentes soluciones de multiplexación de subportadoras (*Sub-Carrier Multiplexing, SCM*) para dar cabida a la señal WiFi utilizando amplificadores ópticos semiconductor reflectante (*Reflective Semiconductor Optical Amplifier, RSOA*).

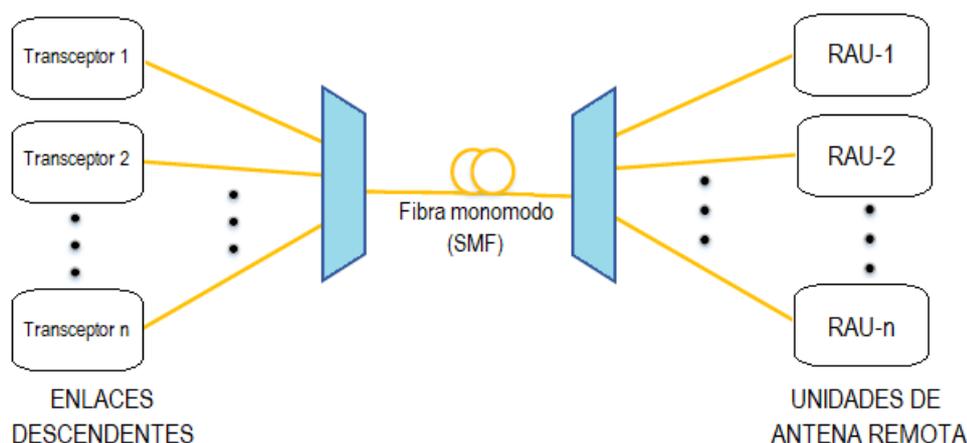


Figura 3. 1: Diagrama de bloques de la propuesta práctica para sistemas RoF.
Elaborado por: Autor.

Se diseñan dos escenarios de simulación, que son:

- Escenario 1:

Se evalúa el rendimiento de RSOA como interfaz inalámbrica óptica. En la figura 3.2 se muestra la asignación de espectro de enlace ascendente (uplink) y descendente (downlink). El rango dinámico libre de espurios (*Spur Free Dynamic Range, SFDR*) del RSOA será medido experimentalmente. La relación entre la potencia de inyección, la corriente de polarización del RSOA y la magnitud del vector de error (*Error Vector Magnitude, EVM*) de la señal WiFi de enlace ascendente se caracteriza experimentalmente. No hay transmisión de señal OOK en uplink y downlink. Solo se evalúa la transmisión de señales WiFi full-dúplex tanto en el uplink como downlink.

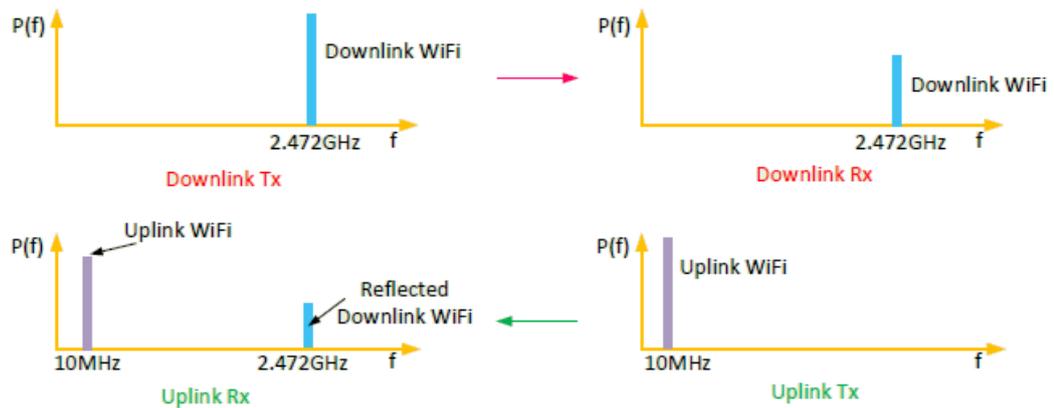


Figura 3. 2: Esquemas para enlaces descendentes y ascendentes del escenario 1.
Elaborado por: Autor.

- Escenario 2:

Para un diseño simplificado de la unidad de antena remota (*Remote Antenna Unit, RAU*), se desea que la RAU interactúe con la señal WiFi sin ninguna traducción de frecuencia. Esa es la motivación para la configuración del experimento en la figura 3.3. La señal downlink se compone de señal OOK y WiFi (en el operador inalámbrico RF-1). No hay señal OOK en la dirección de uplink. La señal WiFi de uplink se coloca en el operador inalámbrico RF-2. Tanto la calidad de la señal OOK como la WiFi se evalúan con diferentes longitudes de fibra.

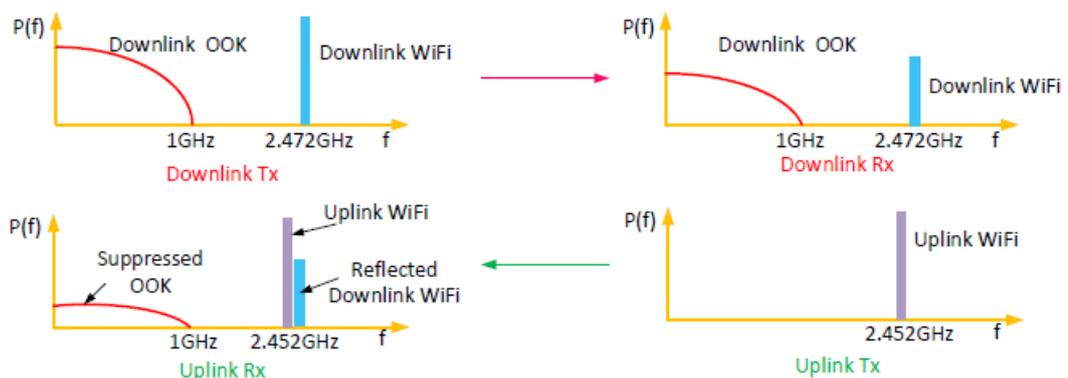


Figura 3. 3: Esquemas para enlaces descendentes y ascendentes del escenario 2.
Elaborado por: Autor.

Dado que el control de acceso al medio (*Media Access Control, MAC*) de WiFi opera principalmente en modo TDD, se puede esperar un problema incompatible en la configuración de la figura 3.3. La señal de downlink reflejada llegará al receptor de uplink antes que la señal de uplink que

violaría el protocolo MAC. El problema de la incompatibilidad se origina en el esquema de modulación de la capa óptica. Para resolver el problema de incompatibilidad de la capa óptica se introduce un mezclador en el RAU y la planta externa (CO).

3.2. Diseños experimentales de los escenarios de simulación.

En esta sección se presenta el diseño de los escenarios de simulación para el sistema RoF.

3.2.1. Escenario 1: Transmisión WiFi en el sistema WDM-PON

En este escenario se propone una arquitectura WDM-PON basada en RSOA para admitir la tecnología RoF. Utilizando el efecto de saturación de RSOA, se logra demostrar que una señal de enlace ascendente WiFi OFDM analógica de uno o varios servicios se puede transmitir en full-dúplex con una señal de enlace descendente OOK controlada adecuadamente a más de 80 km y una longitud de fibra monomodo (*Single Mode Fiber, SMF*) de 20 km, respectivamente. Las tasas de error de bit (BER) de la señal de enlace descendente y de enlace ascendente se encuentran por debajo de 1×10^{-9} para la señal OOK, y por debajo del nivel de corrección de error previo al reenvío (pre-FEC) de 1×10^{-3} para la señal OFDM.

La configuración experimental se muestra en la figura 3.4, en la cual una onda continua generada por un láser sintonizable de alta potencia es modulada primero por el modulador Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator, MZM*) impulsado por una señal RF WiFi OFDM de 2.4 GHz. La potencia del láser se ajusta en 15 dBm con una longitud de onda de 1550 nm. Se establece el sesgo del MZM en 0.5 V para que se pueda lanzar una potencia de RF de enlace descendente más alta sin distorsión de no linealidad.

En esta condición, la potencia lanzada promedio es de 7 dBm después del MZM. Luego, la señal óptica de enlace descendente se alimenta a la SMF a través de un circulador. Después de propagarse en la fibra, se utiliza un filtro óptico para emular el componente WDM MUX/DEMUX con un

espaciado de 100 GHz que permite filtrar el ruido fuera de banda y enrutar la señal de enlace descendente a la RAU de destino.

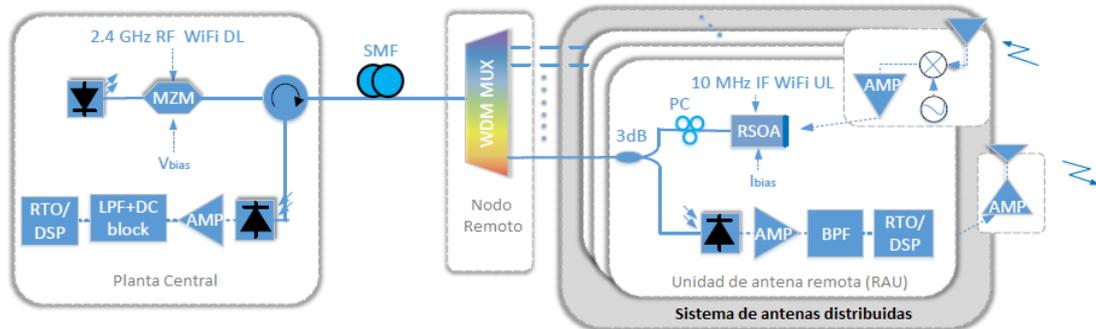


Figura 3. 4: Escenario 1 para implementación de la transmisión WiFi full dúplex.
Elaborado por: Autor.

Un splitter (divisor) de 3 dB en cada RAU divide la señal entrante en dos rutas. Una ruta va al receptor que consta de un fotodiodo PIN de 10 GHz, un amplificador eléctrico, un filtro pasa banda (*Band Pass Filter, BPF*) de 2.4 GHz y un osciloscopio en tiempo real (*Real Time Oscilloscope, RTO*) de 10 GHz y 40 GSa/s utilizado en la captura de datos para el procesamiento online de EVM y de la BER. La otra ruta conduce a un controlador de polarización antes de inyectar al RSOA. El controlador de polarización maximiza la potencia de entrada al RSOA ya que es sensible a la polarización (20 dB).

La señal de luz del enlace descendente se modula de nuevo en el RSOA con la señal WiFi OFDM del enlace ascendente a 10 MHz de IF y se transmite al CO en la misma fibra. Cuando la señal de enlace ascendente alcanza el CO (Planta Central), se utiliza un RTO de 3 GHz 8 GSa/s después de fotodetector PIN, amplificador eléctrico, filtro de paso bajo de 2 MHz y bloque de DC para adquirir solo los componentes de AC de la señal de enlace ascendente.

La señal WiFi OFDM utiliza la estructura de trama del estándar IEEE 802.11a con el formato de modulación deseado, ya sea QPSK, 16QAM o 64QAM. No se utiliza la corrección de errores forward (*Forward Error Correction, FEC*) para la carga útil de datos, debido a la disponibilidad del equipo, para lo cual se utiliza un generador de señales vectoriales (*Vector*

Signal Generator, VSG) que permite la generación de cada señal RF. La señal WiFi se creó offline con una portadora de 10 MHz y se cargó en el VSG. La señal de enlace ascendente de RF se emitió a través del convertidor digital/analógico (*Digital to Analog Converter, DAC*) VSG a 100 MSa/s. Para el enlace descendente, la señal se enruta al mezclador VSG interno para la conversión ascendente a 2.4 GHz. No se hizo ningún esfuerzo para sincronizar las dos señales temporalmente o en frecuencia; naturalmente, estaban desincronizados por el mezclador interno y el cableado dispar.

3.2.1.1. Caracterización de RSOA.

Como la mayor parte de la no linealidad en el sistema RoF proviene del modulador óptico, se investiga la tolerancia no lineal cuando se utiliza un RSOA como interfaz inalámbrica/óptica. Se demuestra que el SFDR del RSOA es compatible con señales WiFi. Debido al canal inalámbrico, se requiere un gran rango dinámico lineal en el enlace RoF, especialmente en el enlace ascendente. Porque la simple regla de diseño RAU solo es responsable de la conversión eléctrica a óptica (*Electrical to Optical, E/O*) sin ninguna función de procesamiento.

Se ha observado que las señales de radio en las pico-células interiores pueden fluctuar entre 40 y 50 dB y en las micro-células exteriores, esta fluctuación puede estar entre 80 y 90 dB. Primero se examina el carácter SFDR del RSOA que actúa como modulador E/O en el RAU. Un segundo efecto preocupante es el borrado de la señal RoF del enlace descendente por parte de RSOA y la re-modulación de la portadora del enlace descendente con una nueva señal RoF. Para la medición del EVM se requieren conocer los siguientes factores: (a) la corriente de polarización RSOA, (b) la potencia de inyección y el voltaje de oscilación de RF se varían de forma independiente.

El SFDR se mide utilizando dos tonos sinusoidales espaciados a 1 MHz para la modulación de banda base del RSOA utilizado en el presente escenario de simulación. La potencia de intermodulación de tercer orden se

mide y se representa en la figura 4.2. Ahora, extrapolando los datos medidos, se determina que el SFDR es 91.7 dB por encima de nuestro umbral de ruido de medición, que es comparable con el requisito de 91 dB de las señales inalámbricas.

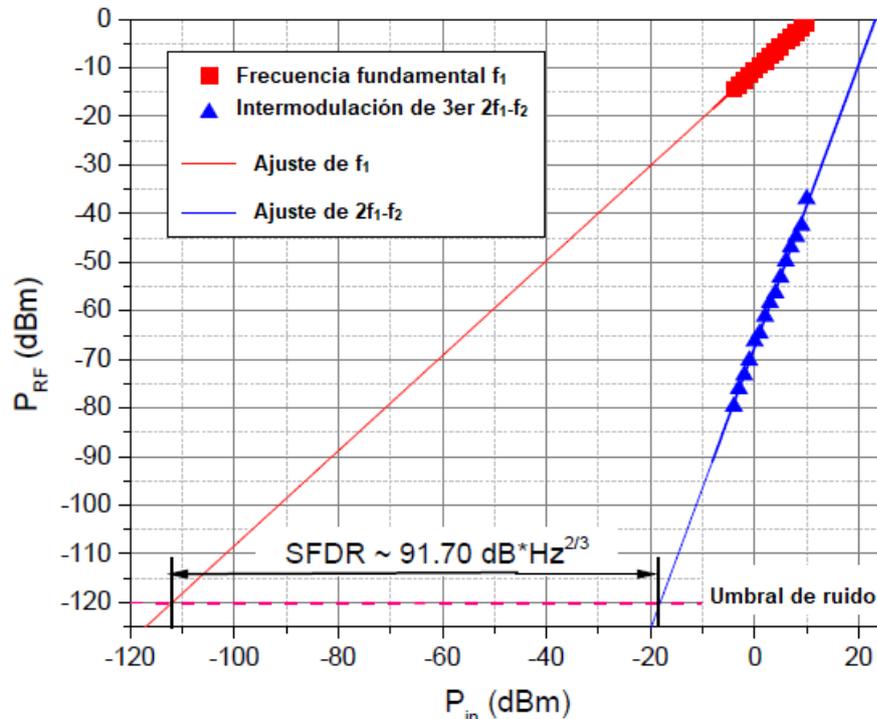


Figura 3. 5: Medición del rango dinámico libre de espurios (SFDR) de RSOA en banda IF.

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.4 para una oscilación de RF fijada en $V_{pp}=7.24$ V, se observa el rendimiento de EVM al variar la potencia de inyección RSOA (véase la figura 3.6 a). Claramente, EVM es mejor con mayor potencia inyectada, cuando se tiene la saturación más profunda y, por lo tanto, el mejor borrado de la señal de enlace descendente. La zona gris tiene saturación insuficiente. Una mayor corriente de polarización proporciona el mejor EVM fuera de la zona gris.

Por ejemplo, a 80 mA, aunque la ganancia es mayor, el ruido ASE del RSOA también aumenta, lo que explica el EVM más pobre en comparación con 70 mA fuera del área gris. A continuación, se fija la potencia de inyección en -5 dBm y se varía el V_{pp} (véase la figura 3.6 b). La zona gris

muestra una mayor tolerancia a un voltaje de oscilación de RF mayor polarizado a 80 mA en lugar de 50 mA, es decir, mayor rango dinámico.

La figura 3.7 muestra la relación señal/ruido óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR*) a una corriente de polarización de 50 mA y 80 mA con una inyección de potencia de -25 dBm. La variación de la ganancia de la señal está limitada a 1 dB, sin embargo, el piso de ruido sube 6 dB y provoca un deterioro de 5 dB en la OSNR, lo cual cumple con el comportamiento observado en la figura 3.6 (zona gris).

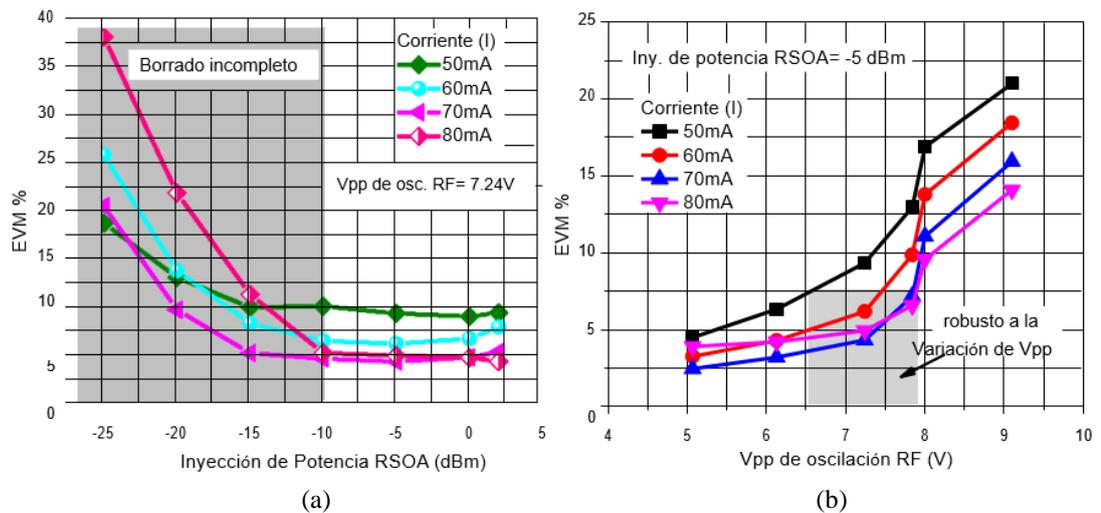


Figura 3. 6: Variación de EVM con respecto a (a) potencia de inyección y (b) voltaje de oscilación de RF.
Elaborado por: Autor.

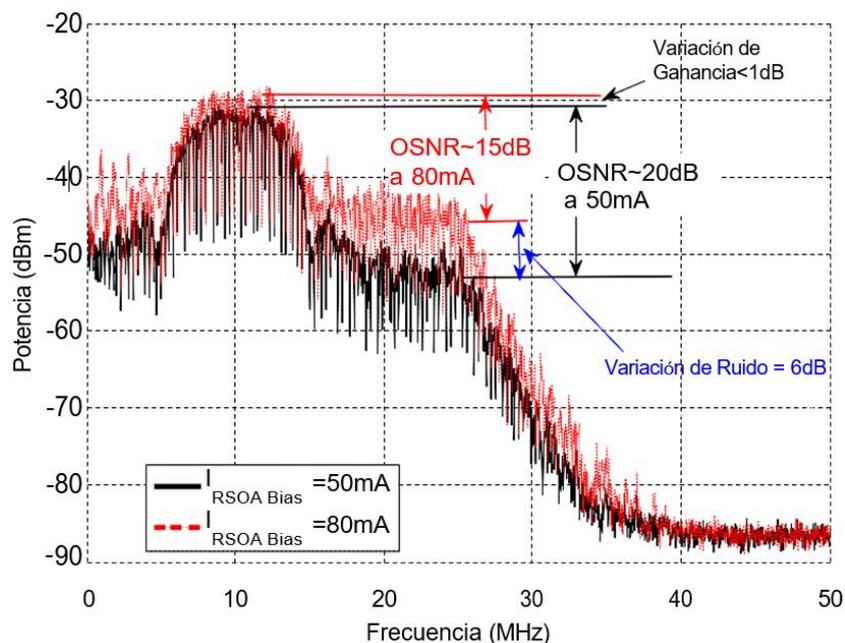


Figura 3. 7: Espectro a diferentes corrientes de polarización (bias).
Elaborado por: Autor.

3.2.2. Escenario 2: Transmisión WiFi con enlaces descendentes OOK.

En esta sección, se demuestra experimentalmente la transmisión de señales WiFi-analógicas bidireccionales (full-dúplex) en un sistema digital PON-WDM. Esta solución es compatible con un solo alimentador óptico de fibra y unidades en las instalaciones del cliente que emplean RSOA.

La portadora óptica de enlace descendente se modula con datos OOK de banda base de 1 Gbps y una señal WiFi en la banda de 2.4 GHz. La señal óptica se divide, una parte va a la recepción y la otra se refleja en el RSOA y se modula con una señal WiFi de enlace ascendente. En la sección 3.2.1 debido al ancho de banda limitado de RSOA de 1.2 GHz, se propuso la conversión descendente para convertir la señal inalámbrica estándar de su portadora de RF a una IF antes de la transmisión de enlace ascendente.

Para reducir la complejidad del sistema, especialmente en las RAU, se propone modular directamente el RSOA con la señal analógica de banda de paso. La señal WiFi de enlace ascendente está en la banda de 2.4 GHz (sin traducción de frecuencia). En el umbral de BER de 2×10^{-3} antes de FEC, se logra el enlace de transmisión hasta 20 km (64-QAM), 30 km (16-QAM) y 40 km (QPSK). En todos los casos, la señal de enlace descendente digital de 1 Gbps está libre de errores.

La figura 3.8 muestra la configuración experimental. Hay algunas modificaciones basadas en la configuración de la figura 3.4. En la planta u oficina central (CO), el modulador Mach-Zehnder (MZM) modula una luz de onda continua de un láser sintonizable operado a 1550 nm con una potencia óptica de 15 dBm. La señal eléctrica descendente (DL) que impulsa el MZM se genera combinando la señal OOK sin retorno a cero (NRZ) de 1 Gbps desde un generador de patrones de bits con una señal WiFi de un generador de señales vectoriales programables.

La señal OOK transporta datos aleatorios de un patrón de secuencia binaria pseudoaleatoria de $2^{31} - 1$ bits, y su espectro está conformado por un filtro pasa bajo (LPF) de 980 MHz. La señal WiFi OFDM de enlace descendente cubre un ancho de banda de 10 MHz centrado en 2.472 GHz. Un circulador óptico enruta las señales DL hacia la fibra y dirige la señal UL desde la fibra al receptor.

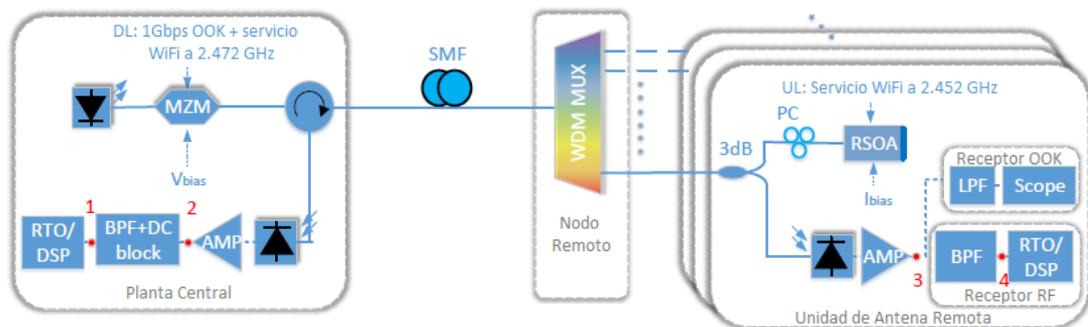


Figura 3. 8: Escenario 2 para implementación de la transmisión WiFi full dúplex con enlaces descendentes OOK.
Elaborado por: Autor.

La señal DL se propaga a través del SMF y llega al demultiplexor WDM que actúa como un nodo de distribución. En el receptor (Rx), la señal DL se convierte en señal eléctrica mediante un PIN de 10 GHz, amplificada por un amplificador de impedancia trans y filtrada para una recepción adecuada. La señal OOK-DL se filtra mediante un filtro de pasa bajo de 1.5 GHz y se captura con un osciloscopio de muestreo de 10 GHz. La señal WiFi-DL se filtra mediante un filtro pasa banda (BPF) de 22 MHz a 2.472 GHz y se adquiere mediante un RTO de 40 GSa/s y se pasa por un procesador de señal digital (DSP) fuera de línea realizado con MATLAB. La señal óptica que va al RSOA se refleja, se amplifica y se utiliza como portadora de la señal WiFi-DL.

El RSOA es impulsado por una corriente de polarización de 70 mA y modulado por una señal WiFi-UL de 10 MHz que tiene una variación de voltaje de 4 Vpp. La señal WiFi-UL se encuentra en 2.452 GHz. Para resaltar la operación full-dúplex, se asume que la transmisión WiFi está en modo de duplexación por división de frecuencia (FDD) donde las señales UL y DL ocupan diferentes canales. En la práctica, para el estándar WiFi en

particular, normalmente utiliza duplexación por división de tiempo (TDD), pero para conveniencia experimental se emplea FDD. A continuación, se analiza cómo el rendimiento del sistema en modo TDD debería ser superior a nuestros resultados. La señal óptica UL se propaga hacia el CO y es dirigida al Rx por el circulador óptico. Allí se captura y procesa de la misma manera que el WiFi-DL, con el filtrado pasa banda (BPF) y procesador digital de señales (DSP) adecuados.

El punto de funcionamiento del Tx el modulador Mach-Zehnder (MZM) juega un papel clave en la determinación del rendimiento de WiFi-UL. El RSOA suprime la modulación DL cuando está saturado, limpiando así el carácter reflejado y mejorando la relación señal-ruido para la señal UL. Sin embargo, la saturación está controlada por la potencia de entrada óptica promedio ya que la corriente de excitación es fija. La potencia óptica de salida en el CO, donde el MZM variará al cambiar el punto de polarización; afectando así la potencia de entrada de RSOA.

Se puede aumentar el punto de polarización para reducir la oscilación OOK para tener una alta potencia óptica. Se sacrifica el rendimiento de OOK-DL (a un límite aceptable) para admitir la transmisión WiFi-UL a más de 80 km de SMF. En el caso de señales mixtas OOK y WiFi para DL, no se puede hacer lo mismo. Se variaron tres factores (voltaje de polarización, oscilación de OOK y oscilación de WiFi) para encontrar una combinación que admita la transmisión WiFi-UL. Los cambios de voltaje de las señales OOK y WiFi son 1.4 y 0.8 Vpp respectivamente. Como el parámetro V_{π} del MZM es de aproximadamente 5 V, y el punto de polarización se controla en el punto de cuadratura, el voltaje combinado de la señal OOK y WiFi cae directamente dentro de la región lineal del MZM. En esta condición, la potencia óptica promedio después del MZM es de 5 dBm.

3.2.3. Análisis de resultados para el escenario 1.

Se analiza experimentalmente la transmisión de enlace ascendente y descendente WiFi analógico full-dúplex a IF de 10 MHz y RF de 2,4 GHz, respectivamente. La BER está por debajo del umbral FEC para el esquema de modulación 64-QAM para transmisiones de fibra monomodo de hasta 20

km. Se realizan iteraciones en la transmisión cambiando las longitudes de las fibras y los formatos de modulación (ver figura 3.4).

El RSOA está polarizado a 70 mA con modulación de RF de 7.24 V, lo que proporciona la mejor compensación según las caracterizaciones anteriores. La EVM se representa en la figura 3.9 con estimaciones de BER (más de 106 bits) escritas junto a los marcadores; las líneas discontinuas son para el enlace ascendente y las continuas para el enlace descendente. Los umbrales de FEC se indican para cada formato de modulación.

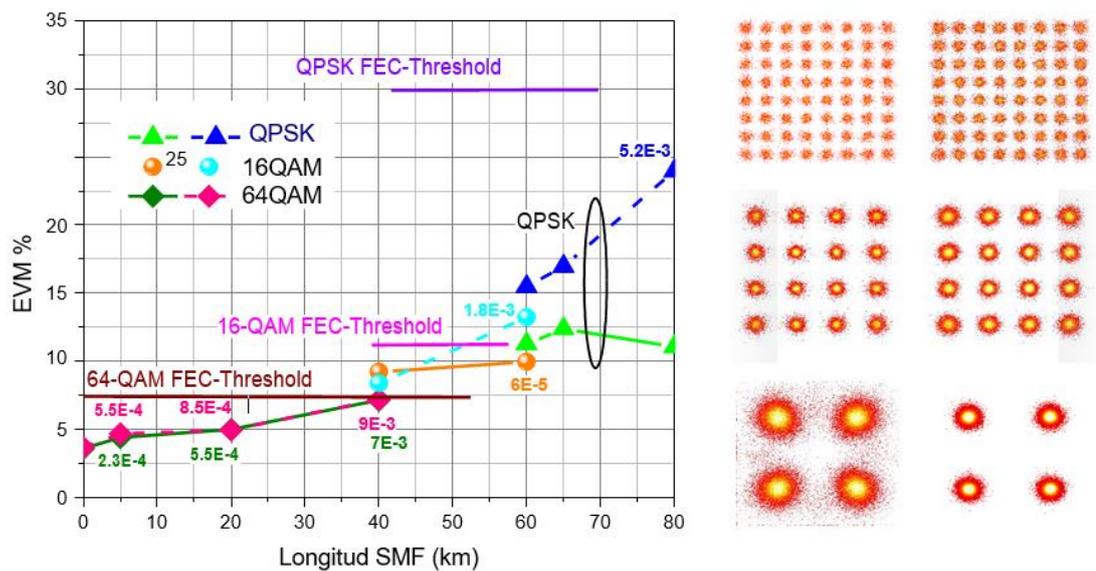


Figura 3. 9: Espectro a diferentes corrientes de polarización (bias).
Elaborado por: Autor.

Para longitudes de fibra entre 20 km y 40 km, se puede lograr una potencia de inyección de 5 dBm a 10 dBm aumentando la potencia lanzada en el CO. Por lo tanto, el enlace descendente y el enlace ascendente por debajo de 40 km tienen un rendimiento comparable. Sin embargo, más allá de los 40 km, la atenuación no se puede compensar por completo. Para la modulación 64-QAM (marcadores de diamante), las transmisiones por debajo de 20 km respetan el umbral FEC; hay que tener en cuenta que las curvas de enlace ascendente y descendente están superpuestas. En la modulación 16-QAM, se pueden alcanzar 50 km, mientras que QPSK tiene un buen rendimiento incluso más allá de los 80 km. A la derecha de la figura 3.9, se presentan las constelaciones recibidas de enlace ascendente

(columna izquierda) y enlace descendente (columna derecha) para las longitudes de fibra indicadas.

3.2.4. Análisis de resultados para el escenario 1.

Para asegurar la transmisión WiFi-UL, se realiza una medición SFDR para el RSOA en la banda de 2 GHz. El generador de señales vectoriales genera dos tonos sinusoidales a 2 GHz y 2.01 GHz, y se barre la potencia de RF de salida. Se conectó el RSOA a un acoplador 1x2 de 3 dB en el que una entrada recibe una portadora óptica de onda continua y la otra está conectada a un fotodiodo para recibir la señal óptica reflejada. La señal convertida O-E se mide con un analizador de espectro eléctrico y se registran las componentes fundamentales y de tercer orden. La figura 3.10 muestra la evolución de las potencias de los dos tonos; el SFDR medido es $92 \text{ dB}\times\text{Hz}^{-2/3}$, cerca del requisito para la transmisión WiFi ($94 \text{ dB}\times\text{Hz}^{-2/3}$).

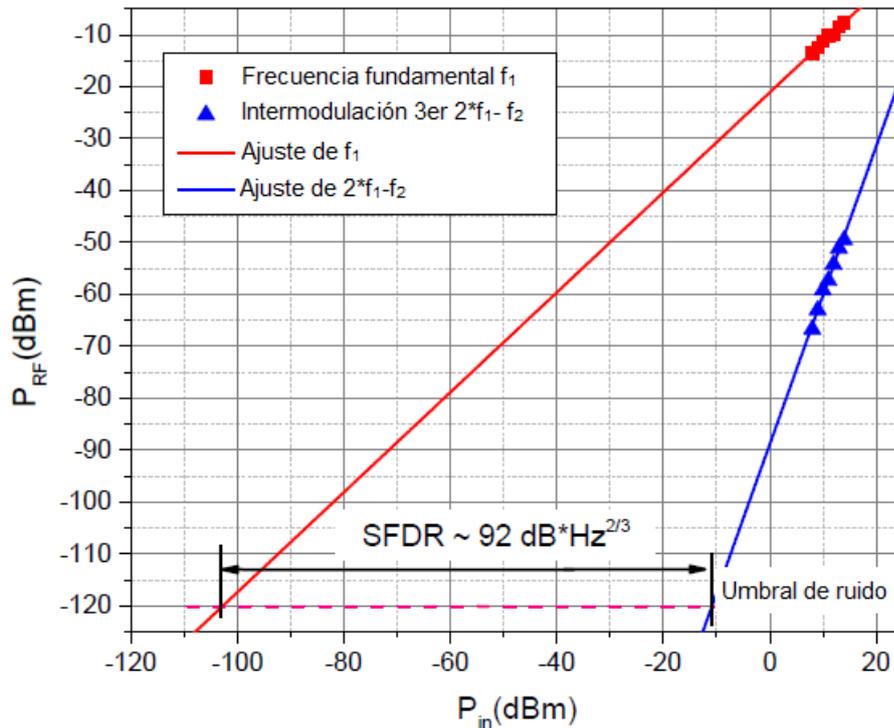


Figura 3. 10: Medición SFDR del RSOA.
Elaborado por: Autor.

Como la respuesta de frecuencia eléctrica del RSOA está limitada alrededor de 1.2 GHz, la señal WiFi-UL tiene su potencia eléctrica reducida por el efecto de filtrado de pasa bajo, lo que resulta en una baja eficacia de conversión E-O. Además, se utiliza un analizador de redes vectoriales de

señal mixta para medir la respuesta de frecuencia del RSOA, presentado en la figura 3.11. La señal WiFi-UL puede sufrir una atenuación de hasta 8 dB cuando se encuentra en la banda de 2.4 GHz en comparación con la modulación de banda base (10 MHz).

Los espectros eléctricos de las señales DL y UL se muestran en la figura 3.12. El espectro DL (rojo) muestra la señal OOK de 1 Gbps y la señal WiFi a 2.472 GHz, mientras que el espectro UL (verde) muestra una señal OOK suprimida y dos señales WiFi a 2.572 y 2.452 GHz respectivamente. El RSOA es bien conocido por su filtro pasa alto que borra la modulación DL de banda base cuya frecuencia de corte es 500 MHz. Mientras que la modulación OOK-DL se suprime de forma bastante eficaz, el WiFi-DL permanece claramente visible. La figura 3.13 muestra un espectro UL ampliado en el que son visibles WiFi-DL y WiFi-UL. El espectro WiFi-UL filtrado (negro) está normalizado para facilitar la visualización con el espectro UL completo (verde).

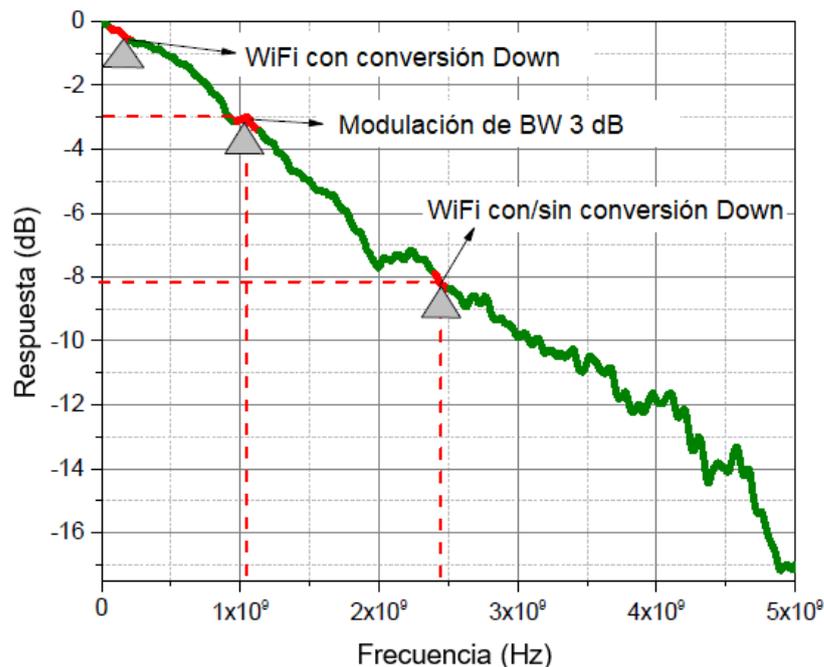


Figura 3. 11: Respuesta de frecuencia del RSOA.
Elaborado por: Autor.

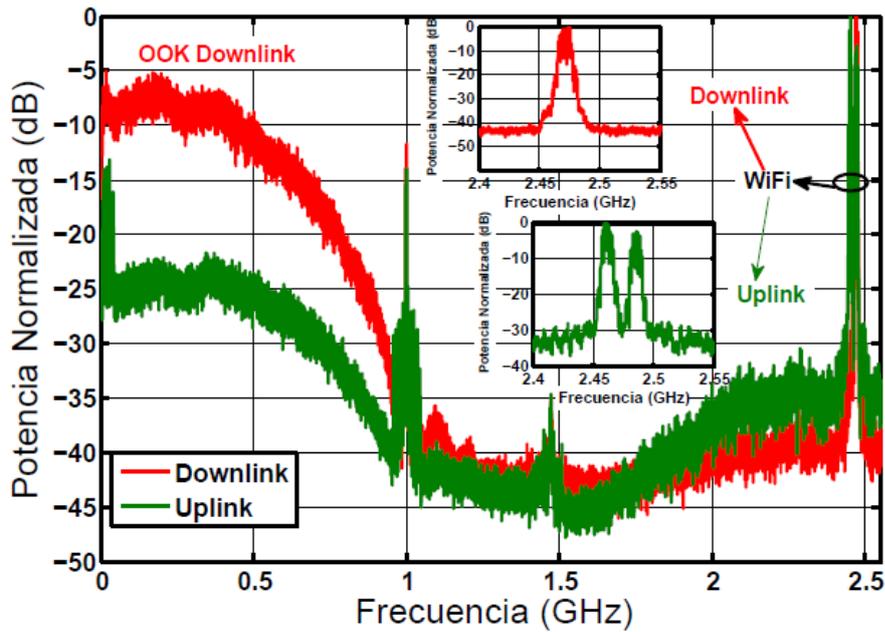


Figura 3. 12: Espectro UL y DL en el punto de observación 2 y 3.
Elaborado por: Autor.

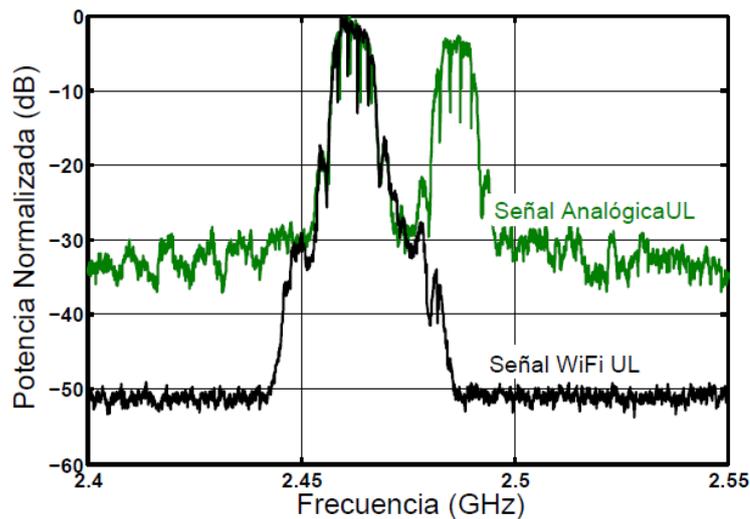


Figura 3. 13: Espectro UL y DL en el punto de observación 1 y 2.
Elaborado por: Autor.

Tener en cuenta que el espectro WiFi-UL es alrededor de 5 dB más alto que el del WiFi-DL. En la planta externa (CO), la señal WiFi-DL no modula la portadora óptica al 100% de profundidad de modulación; para lo cual se eligió un nivel que permite que la señal WiFi-UL explote una modulación más profunda, mejorando así su relación señal a ruido (SNR). No obstante, el rendimiento de WiFi-UL es peor que el de la señal WiFi-DL. La señal WiFi-UL sufre de una portadora mucho más ruidosa; además, la fotocorriente recibida se comparte con la señal WiFi-DL reflejada. Con la aplicación de la capa MAC de la señalización TDD, WiFi-UL y WiFi-DL

compartirían la misma frecuencia, pero nunca estarían presentes simultáneamente.

En este caso, el rendimiento de WiFi-UL mejoraría debido al portador óptico más puro y la potencia eléctrica recibida más fuerte. Sin embargo, se espera un problema potencial con el modo TDD debido al hecho de que el RSOA refleja la señal DL antes de que se transmita la señal UL, y eso puede causar un malentendido por parte del CO. Afortunadamente, la longitud de la fibra normalmente es fija, el tiempo de ida y vuelta se conoce de antemano. Por lo tanto, con una gestión de retardo de tiempo adecuada, el CO puede ignorar la señal DL reflejada.

Los resultados del experimento de transmisión se presentan en la figura 3.14. Las señales WiFi (UL o DL) son capturadas por una banda ancha RTO usando una técnica de muestreo de banda de paso a una frecuencia de muestreo de 200 MSa/s. Se utiliza el procedimiento DSP estándar para la recuperación de datos: conversión descendente de banda base, muestreo descendente, filtrado, sincronización de tramas, rechazo de desplazamiento de frecuencia, estimación/ecualización de canal y finalmente demodulación. El EVM se calcula a partir de la constelación ecualizada y la tasa de error de bits (BER) se cuenta a partir de los datos demodulados.

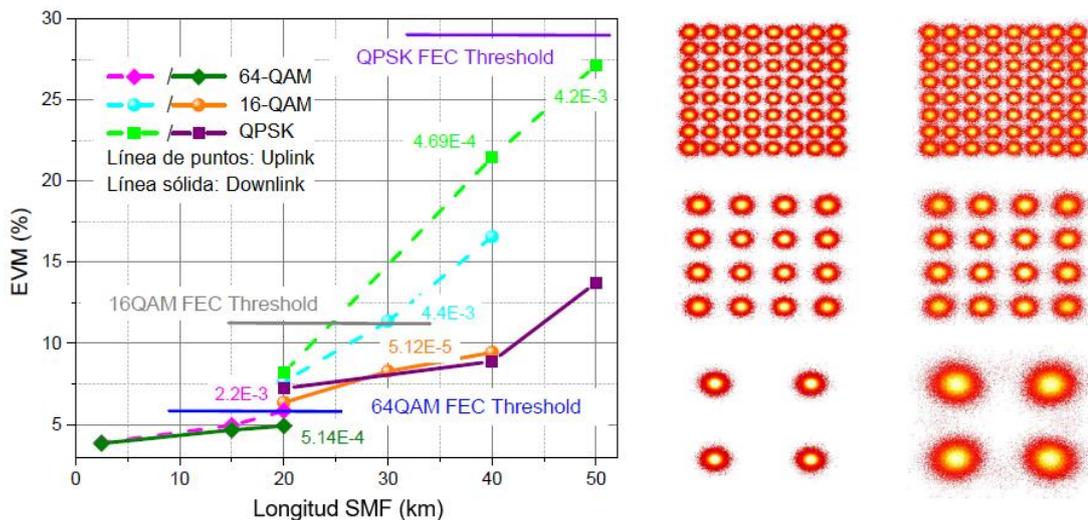


Figura 3. 14: EVM de señal WiFi OFDM para UL (2.452 GHz), DL (2.472 GHz); y constelaciones (UL y DL) para 20, 30 y 40 km (DL izquierda y UL derecha).
Elaborado por: Autor.

La señal WiFi se genera según el estándar IEEE 802.11a. Suponiendo que el código convolucional (171,133) de tasa 2/3 se utiliza para codificar los datos, y el esquema de decodificación de Viterbi de decisión suave se utiliza para la recuperación. Con ese supuesto, se define una BER pre-FEC de alrededor de 3×10^{-3} como el umbral de aceptación para el rendimiento de las señales WiFi. A distancias inferiores a 20 km, el rendimiento de WiFi DL y UL es similar.

A distancias más largas, el rendimiento de WiFi-UL se degrada muy rápidamente. La distancia máxima alcanzable para 64-QAM es de unos 20 km. Para los modos de modulación 16-QAM y QPSK, la distancia de transmisión es de 30 km y 40 km respectivamente. En la figura 3.14 (derecha), también se muestran constelaciones de ejemplo de la señal WiFi-UL (izquierda) y la señal WiFi-DL (derecha) para 64-QAM (20 km), 16-QAM (30 km) y QPSK (40 km).

A diferencia de los diagramas de constelación de DL-WiFi, que son bastante uniformes en todos los símbolos, los diagramas de constelación de WiFi-UL muestran una distribución de ruido no lineal. Esto puede deberse a la combinación de no linealidad RSOA, diafonía DL en una portadora ruidosa e interferencia de la señal WiFi-DL debido a un filtrado imperfecto. Estas degradaciones podrían mitigarse en gran medida empleando un RSOA lineal mejorado de banda ancha.

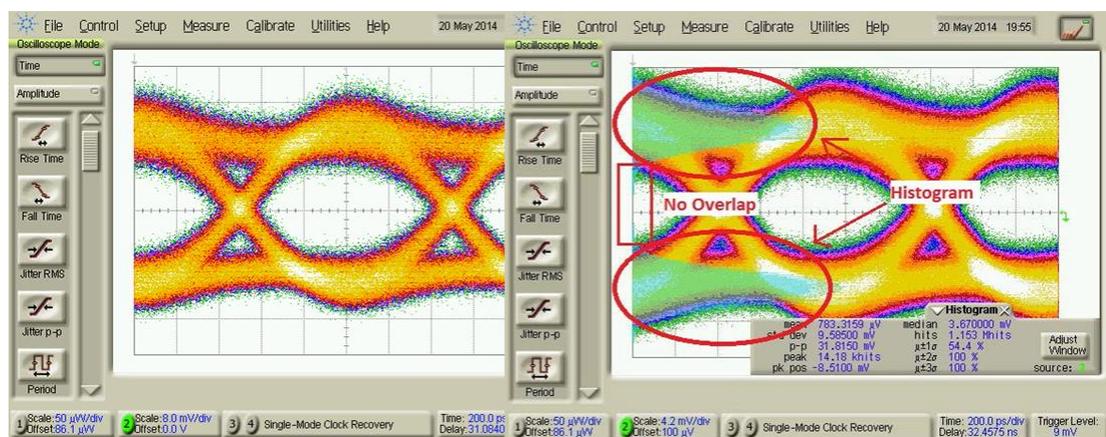


Figura 3. 15: Diagrama de ojo de la señal OOK DL a 20 km (izquierda) y 40 km (derecha).

Elaborado por: Autor.

En todos los casos, la señal OOK-DL está libre de errores. En la figura 3.15 se muestra el diagrama de ojo y el histograma de los niveles "1" y "0" de la señal OOK-DL después de 40 km de transmisión. Se logra un ojo bien abierto y el histograma acumulado de 3 minutos no muestra superposición entre el nivel "1" y "0", lo que indica un rendimiento sin errores.

Conclusiones

1. La radio sobre fibra (RoF) es una técnica flexible y rentable que permite múltiples funcionalidades requeridas para el soporte de sistemas de acceso inalámbrico.
2. La técnica RoF está reduciendo la atenuación, la dispersión, que puede mejorar la tasa de error de bits (BER) y el ancho de banda.
3. Las técnicas RoF se fusionan sin problemas con redes ópticas de acceso de banda ancha como WDM lo que permite una convergencia flexible de la alta capacidad de la fibra óptica y la flexibilidad del acceso inalámbrico

Recomendaciones

1. Implementar escenarios de simulación de RoF con redes ópticas de acceso de banda ancha como SCM y OFM-DWM.
2. Evaluar el rendimiento del sistema RoF utilizando modulación QPSK sobre MatLab/Simulink.

Bibliografía

- Arulsamy, A. D. (2017). *Solid State Electronics: Artificial Intelligence (Part 1)*. Institute of Interdisciplinary Science.
- Camino C., A. V. (2018). *Evaluación del modelado de una red GPON/FTTH con multiplexación por división de longitud de onda utilizando OptiSystem* [Trabajo de Titulación de Maestría]. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Giacoumidis, E. (2011). *Adaptive Optical OFDM for Local and Access Networks*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11292.69763>
- Irshad A., M., & Sathish K., K. (2019). Studies on Cu₂SnS₃ quantum dots for O-band wavelength detection. *Materials Science-Poland*, 37(2), 225–229. <https://doi.org/10.2478/msp-2019-0022>
- Jasim Kadhim, D., & Abdul-Rahman Hussain, N. (2013). Design and Implementation of a Practical FTTH Network. *International Journal of Computer Applications*, 72(12), 50–56. <https://doi.org/10.5120/12550-9273>
- Javed, T., & Amin, F. (2016). Radio over Fiber Technology. *International Journal Of Scientific & Engineering Research*, 7(7), 377–380.
- Kornegay, J. (2019). The Importance of Simulating PON Networks Before Deployment. *M2 Optics*. <https://www.m2optics.com/blog/passive-optical-networks-pons-why-its-important-to-test-them-before-deployment>
- Kramer, G., & Pesavento, G. (2002). Ethernet passive optical network (EPON): Building a next-generation optical access network. *IEEE*

Communications Magazine, 40(2), 66–73.
<https://doi.org/10.1109/35.983910>

Lannoo, B., Das, G., De Groote, M., Colle, D., Pickavet, M., & Demeester, P. (2010). Techno-economic feasibility study of different WDM/TDM PON architectures. *2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICTON.2010.5549343>

Maamoun, K. M., & Mouftah, H. T. (2011). Survivability models for radio-over-fiber passive optical networks (RoF-PON)/PON. *2011 seventh International Computer Engineering Conference (ICENCO'2011)*, 13–18. <https://doi.org/10.1109/ICENCO.2011.6153926>

Morales S., J. G. (2015). *Estudio de la evolución y tendencia de la tecnología RoF*. [Trabajo de Titulación de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/3245>

Navarro V., J. C. (2015). *Simulación de señales distribuidas en RoF para redes WiMAX a través de la modulación OFDM y 64-QAM*. [Trabajo de Titulación de Maestría, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/4329>

Novak, D., Nirmalathas, A., Lim, C., & Waterhouse, R. (2009). Fibre Radio Technology. En S. Iezekiel (Ed.), *Microwave Photonics* (pp. 169–190). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470744857.ch7>

Optytech. (2020). *Spliters de fibra óptica*. <https://www.optytech.com.ec/fibra-optica/splitters-de-fibra-optica.html>

Saliou, F. (2010). *Study of solutions to extend the reach of optical access networks* [Tesis Doctoral]. Institut Polytechnique de Paris.

- Sivadasan, A. K. (2017). *Optical Properties of AlGaIn Nanostructures*.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12642.53445>
- Söğüt, E., Oyucu, S., Erdem, A., & Polat, H. (2017). Recommendations for xDSL Technologies and Applications. *ICENS*. International Conference on Engineering and Natural Science, Budapest, Hungary.
- Telefficient. (2020). *GPON ONT for Residential Deployment*.
http://telefficient.ca/?page_id=58
- Vyas, A. K., & Agrawal, N. (2012). Radio over Fiber: Future Technology of Communication. *International Journal of Emerging Trends & Technology in Computer Science*, 1(2), 233–237.
- Xiao, Y. (2016). Timing Recovery for DOCSIS 3.1 Upstream OFDMA Signals. *Computer Science*.

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Blum Cárdenas, Juan Pablo** C.C: # 092238063-9 autor del trabajo de titulación: Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON), previo a la obtención del título de **Magister 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, 1 de diciembre del 2021

f. 

Nombre: **Blum Cárdenas, Juan Pablo**

C.C: 092238063-9

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)		
AUTOR(ES)	Blum Cárdenas, Juan Pablo		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio; M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Sistema de Posgrado		
PROGRAMA:	Maestría en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Magister en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	Guayaquil, 1 de diciembre del 2021	No. DE PÁGINAS:	63
ÁREAS TEMÁTICAS:	Comunicaciones Ópticas, Sistemas de Transmisión		
PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:	Radio, Fibra, Comunicaciones, Multiplexación, Simulación, Inalámbrico.		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>En este trabajo de examen complejo, se presenta un estudio de los sistemas de comunicación híbridos de fibra/inalámbricos conocidos también como sistemas de radio sobre fibra (RoF). El presente estudio trata el “Análisis del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando multiplexación por división de longitud de onda basadas en redes ópticas pasivas (PON)”. Primero, en el capítulo 1 se describe el principio de estos sistemas y se dispone los intereses del enfoque de fibra inalámbrica dual. Este enfoque permite beneficiarse de las ventajas de ambas tecnologías y, mediante un efecto cruzado, superar sus respectivos inconvenientes. En segundo lugar, en el capítulo 2 se da una visión general de los fundamentos teóricos de las redes de acceso y de las aplicaciones posibles para futuras implementaciones mediante simulación. Finalmente, en el capítulo 3 se presenta el diseño, simulación y análisis de resultados que se obtuvieron durante las pruebas según los parámetros de los dos escenarios propuestos en el presente documento.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593991147721	E-mail: ingblum@hotmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):	Nombre: Manuel Romero Paz		
	Teléfono: 0994606932		
	E-mail: mromeropaz@yahoo.com		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			