



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

TEMA:

**Implementación de escenarios de simulación de sistemas
OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem**

AUTOR:

Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido

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

REVISOR:

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

18 de septiembre del 2020



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

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

M. Sc. Pacheco Bonórquez, Héctor Ignacio

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020



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

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Yo, **Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido**

DECLARÓ QUE:

El **componente práctico del examen complejo, Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem**, 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 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 18 días del mes de septiembre del año 2020

EL AUTOR

VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO

REPORTE DE URKUND

URKUND Fernando Palacios Meléndez (edwin_palacios)

Documento: [Vilela_Orlando_EC-2020A.docx.docx](#) (D79348183)

Presentado: 2020-09-17 16:34 (-05:00)

Presentado por: fernandopm23@hotmail.com

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

Mensaje: Revisión EC Orlando Vilela [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 15 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

Lista de fuentes	Bloques
<input type="checkbox"/>	Categoría
<input type="checkbox"/>	Enlace/nombre de archivo
<input type="checkbox"/>	Jorge_Ortega_TT_2018.docx
<input type="checkbox"/>	Jorge_Diaz_TT_2018.docx
<input checked="" type="checkbox"/>	8926-Rios Vasquez, Edhir Lino_.pdf
<input type="checkbox"/>	https://doi.org/10.1109/ICOCN.2019.8934433
<input type="checkbox"/>	Fuentes alternativas
<input type="checkbox"/>	TESIS NB.docx
<input type="checkbox"/>	DISEÑO Y EVALUACIÓN DE SUPERFICIES SEL

Reiniciar Exportar Compartir 0 Advertencias

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

TEMA:

Implementación de escenarios de simulación de sistemas
OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem

AUTOR: Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido

Componente práctico del examen complejo

previo a la obtención del grado de INGENIERO EN
TELECOMUNICACIONES

REVISOR: M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

10 de septiembre del 2020

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

DEDICATORIA

Dedico este trabajo investigativo a Dios por guiarme en este proceso, a mi familia en especial a mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes, a mis hermanos sobre todo a mi hermanita que siempre fui un ejemplo para ella, a mis amigos que me motivaron y confiaron en mí todos estos años.

EL AUTOR

VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO

AGRADECIMIENTO

Agradecer a Dios por permitir que viva este momento muy especial en mi vida quien con su bendición me lleno de fortalecer y sabiduría para seguir adelante, también agradecer a las personas que estuvieron conmigo desde el principio alentándome a seguir adelante como mi familia que en todo momento me apoyo.

De igual manera agradecer a la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, a la Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, a mis profesores que con sus conocimientos me enseñaron valores, ética profesional, hicieron que cada día crezca como profesional donde también encontré amigos, gracias a cada uno de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad.

Agradezco a mis amigos (Giovanny, Aaron, Klaus, la alianza, Kevin Añi, Chase y Carolina) que a pesar de todo confiaron en mí.

EL AUTOR

VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
AUTOMATISMO

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	X
Resumen	XIII
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 la tecnología OFDM.....	4
2.2. Principio de OFDM óptico coherente.....	5
2.3. Aplicación de OFDM en redes de acceso.....	7
Capítulo 3: Diseño y análisis de sistemas.....	9
3.1. Descripción general del componente práctico.....	9
3.2. Implementación del sistema CO-OFDM utilizando fibra monomodo.....	9
3.2.1. Resultados y discusión	11
3.3. CO-OFDM con fibra de compensación de dispersión (DCF).....	16
3.3.1. Resultados y discusión	18
3.4. Sistema DD-OFDM con configuración SMF.....	23
3.4.1. Resultados y discusión	25
3.5. Integración de WDM con CO-OFDM:.....	30
3.5.1. Resultados y discusión	32
Conclusiones.....	35
Recomendaciones.....	36
Bibliografía.....	37

Índice de Figuras

Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama del transmisor OFDM óptico coherente.	5
Figura 2. 2: Diagrama del receptor OFDM óptico coherente.	5
Figura 2. 3: Diagrama de bloque para la estimación de BER para la transmisión PDM OFDM óptico coherente.....	6
Figura 2. 4: Diagrama de bloque para el algoritmo basado en LSM.	8

Capítulo 3:

Figura 3. 1: Sistemas CO-OFDM con SMF de 100 km.	10
Figura 3. 2: Diagrama de constelación de 4-QAM en el transmisor CO-OFDM.	11
Figura 3. 3: Espectro RF de los componentes I/Q del sistema OFDM.	12
Figura 3. 4: Espectro OFDM óptico después de la modulación de 2 Mach-Zehnder.	13
Figura 3. 5: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM en el lado del receptor después de 100 km.....	13
Figura 3. 6: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 200 km.	14
Figura 3. 7: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 300 km.	14
Figura 3. 8: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 400 km.	15
Figura 3. 9: Relación señal/ruido óptico (OSNR) versus distancia (km)	15
Figura 3. 10: Diseño del sistema OFDM óptico coherente con SMF-DCF. ..	17
Figura 3. 11: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 600 km.....	19
Figura 3. 12: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 1800 km.....	19
Figura 3. 13: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 3000 km.....	20
Figura 3. 14: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 4200 km.....	21

Figura 3. 15: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 5400 km.....	21
Figura 3. 16: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 6600 km.....	22
Figura 3. 17: Tabla de distancia OSNR Vs.	23
Figura 3. 18: Diagrama de bloques del sistema DD-OFDM [56].	24
Figura 3. 19: Diagrama de constelación de 4-QAM en el transmisor DD-OFDM.	25
Figura 3. 20: Componentes RF OFDM Spectrum I / Q.	26
Figura 3. 21: ESP8266.	27
Figura 3. 22: Espectro OFDM óptico en el lado del receptor.	27
Figura 3. 23: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 100 km.....	28
Figura 3. 24: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 200 km.....	29
Figura 3. 25: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 300 km.....	29
Figura 3. 26: WDM CO-OFDM Diagrama de bloques del sistema con SMF.	31
Figura 3. 27: Componente I/Q del espectro RF OFDM en el transmisor CO-OFDM.	32
Figura 3. 28: Señal OFDM después de WDM MUX con 4 canales en el lado del transmisor.....	33
Figura 3. 29: Señal OFDM después de SMF con 4 canales en el lado del receptor.	33
Figura 3. 30: Diagrama de constelación de WDM CO-OFDM para un usuario en el lado del receptor después de 200 km.	34

Índice de Figuras

Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros globales de simulación	10
Tabla 3. 2: Parámetros SMF	18
Tabla 3. 3: Parámetros DCF	18
Tabla 3. 4: Parámetros globales	24

Resumen

Recientemente se ha propuesto OFDM óptico coherente (CO-OFDM) y los experimentos de transmisión de prueba de concepto han demostrado su extrema robustez frente a la dispersión cromática y la dispersión del modo de polarización. De acuerdo con esta motivación de CO-OFDM en este trabajo se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado “Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem”. En el capítulo 1, se introduce brevemente a las comunicaciones modernas, así como se define el objetivo general y se plantean los objetivos específicos. En el capítulo 2, se presenta la descripción teórica de los fundamentos de la tecnología de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), de sistemas ópticos coherentes, y de las aplicaciones de la tecnología OFDM en las redes de acceso óptico. En el capítulo 3, se diseñan los escenarios de simulación del sistema OFDM óptico coherente y se discuten los resultados obtenidos.

Palabras claves: COMUNICACIONES, FRECUENCIA, FIBRA, DISPERSIÓN, TRANSMISIÓN, REDES

Capítulo 1: Descripción del componente práctico

1.1. Introducción.

En los sistemas de comunicación modernos, es deseable una alta velocidad de transferencia de datos con una mayor tasa de bits. En general, hay dos enfoques disponibles en las redes ópticas modernas, es decir, la tasa de bits por canal ha aumentado rápidamente acercándose a los 100 Gbps y la implementación de una red reconfigurable dinámicamente debido al despliegue de multiplexores ópticos Add/Drop (OADM). (Sheetal et al., 2014)

Por ejemplo, OFDM óptico coherente (CO-OFDM) es un formato de modulación de alta eficiencia espectral capaz de eliminar virtualmente la interferencia entre símbolos (ISI) causada por la dispersión cromática de fibra (*Chromatic Dispersion, CD*) y la dispersión por modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion, PMD*). (Jarajreh et al., 2015; Zhang et al., 2019)

Un gran inconveniente de los sistemas CO-OFDM que hasta ahora permanece sin resolver es su vulnerabilidad a los efectos no lineales de la fibra debido a la alta relación de potencia pico a promedio (PAPR) de las señales OFDM. Aunque existen diversas investigaciones sobre técnicas de procesamiento de señales digitales (*Digital Signal Processing, DSP*) para la compensación de no linealidad. (Zhang et al., 2019)

Sin embargo, debido a la alta relación de potencia pico a promedio (PAPR) de CO-OFDM, se producirá la degradación dentro de la banda y la ampliación espectral, lo que dará como resultado efectos de diafonía no lineal intrínsecos (ICI) entre las subportadoras, como la modulación de autofase (*Self-Phase Modulation, SPM*), modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation, XPM*) y efecto de mezcla de cuatro ondas (*Four-Wave Mixing, FWM*). (Shieh et al., 2008)

1.2. Objetivo General.

Implementar escenarios de simulación de sistemas de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) ópticos coherentes sobre el software OptiSystem

1.3. Objetivos Específicos.

- a. Describir brevemente los principios básicos de los sistemas OFDM y sus aplicaciones.
- b. Diseñar los escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes y detección directa mediante fibra monomodo, fibra de compensación de dispersión
- c. Evaluar los diagramas de constelación y relación señal/ruido óptico (OSNR) para los escenarios de simulación propuestos.

Capítulo 2: Fundamentación teórica.

2.1. Introducción a la tecnología OFDM.

La tecnología de la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM*) es una tecnología de modulación digital de múltiples portadoras desarrollada con la madurez de la tecnología de procesamiento de señales digitales (*Digital Signal Processing, DSP*). En comparación con otras tecnologías de multiplexación de múltiples portadoras, las señales OFDM satisfacen la ortogonalidad en los dominios de tiempo y frecuencia, y tienen una mayor eficiencia espectral y capacidad de interferencia anti-multitrayecto. (Luo, 2019)

Es fácil generar y demodular señales OFDM con la ayuda de chips DSP. La ecualización de canales y otras operaciones también son relativamente simples. Por lo tanto, la tecnología OFDM se ha utilizado ampliamente en comunicaciones inalámbricas, por cable (cobre y fibra óptica) y de radiodifusión.

Recientemente, se ha producido una convergencia mundial para el uso de OFDM como una tecnología emergente para altas velocidades de datos. En particular, muchos estándares inalámbricos (Wi-Max, IEEE802.11a, LTE, DVB) han adoptado la tecnología OFDM como un medio para aumentar dramáticamente las comunicaciones inalámbricas futuras. OFDM es una forma particular de transmisión de múltiples portadoras y es adecuada para canales de frecuencia selectiva y altas velocidades de datos. (Debbah, 2020)

Esta técnica transforma un canal de banda ancha con selección de frecuencia en un grupo de canales de banda estrecha no selectivos, lo que lo hace robusto contra grandes extensiones de retardo al preservar la ortogonalidad en el dominio de la frecuencia. Además, la ingeniosa introducción de la redundancia cíclica en el transmisor reduce la complejidad a solo el procesamiento FFT y la ecualización escalar de un toque en el receptor.

2.2. Principio de OFDM óptico coherente

Debido a su extrema resistencia a la dispersión del canal, OFDM se ha explorado activamente para aplicaciones en el dominio óptico. El supuesto más crítico para OFDM es la linealidad en la modulación, transmisión y demodulación. En consecuencia, una transformación lineal es el objetivo clave para la implementación de OFDM. Un sistema OFDM óptico genérico se puede dividir en cinco bloques funcionales que incluyen: (Shieh et al., 2008)

- (1) transmisor OFDM de radiofrecuencia (RF-OFDM),
- (2) convertidor ascendente de RF a óptico (RTO),
- (3) canal óptico,
- (4) convertidor descendente óptico a RF (OTR) y
- (5) receptor OFDM de radiofrecuencia (RF-OFDM).

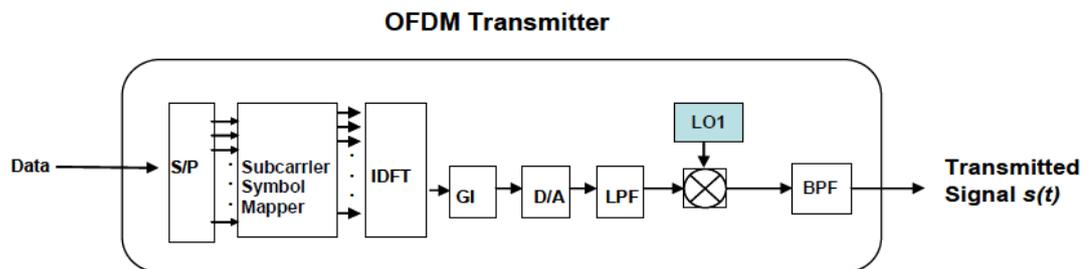


Figura 2. 1: Diagrama del transmisor OFDM óptico coherente.
Fuente: (Shieh et al., 2008)

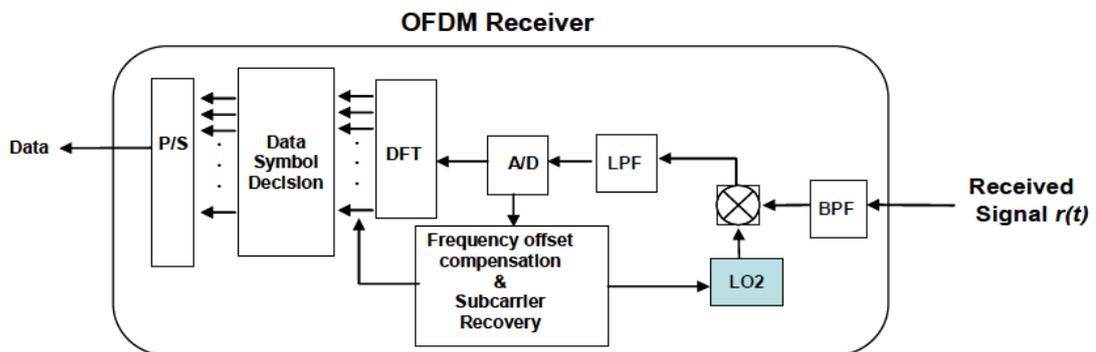


Figura 2. 2: Diagrama del receptor OFDM óptico coherente.
Fuente: (Shieh et al., 2008)

La arquitectura detallada del transmisor/receptor RF OFDM se muestran en las figuras 2.1 y 2.2 que genera/recupera las señales OFDM en banda base o en banda RF. Suponiendo por ahora un canal de fibra óptica lineal donde no se considera la no linealidad de la fibra. Es evidente que los desafíos para

la implementación de OFDM óptico coherente (Coherent Optical OFDM, CO-OFDM) son obtener un convertidor ascendente RTO lineal y un convertidor descendente OTR lineal. Se ha propuesto y analizado que polarizando los moduladores Mach-Zehnder (MZM) en el punto nulo, se puede lograr una conversión lineal entre la señal de RF y la señal de campo óptico.

El sistema CO-OFDM puede compensar y estimar eficazmente la PMD en fibras ópticas. Para mejorar la capacidad del sistema, es necesario introducir la tecnología de multiplexación por división de polarización (PDM) en el sistema CO-OFDM, que no solo puede cumplir con los requisitos básicos del sistema para cada componente, sino que también mejora aún más la velocidad de transmisión. Por lo tanto, el sistema PDM CO-OFDM se ha convertido en una solución importante para los futuros sistemas de transmisión de ultra gran capacidad, ultra alta velocidad y ultra larga distancia. Los SMF suelen tener dos modos de polarización y la transmisión de señales ópticas se ve afectada por los efectos de la pérdida dependiente de la polarización (PDL), la PMD y la dispersión cromática.

Por ejemplo, (Le et al., 2014) desarrolló una aplicación de métodos de estimación de la tasa de error de bits para la transmisión QPSK CO-OFDM, y en la figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques del transmisor PDM OFDM óptico coherente.

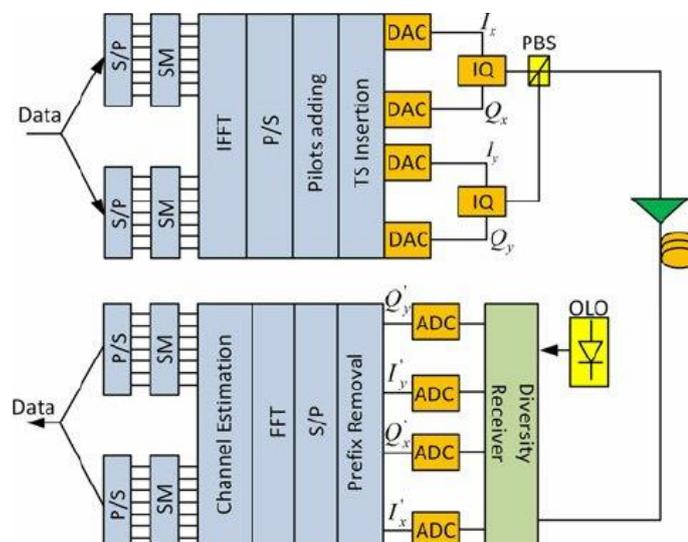


Figura 2. 3: Diagrama de bloque para la estimación de BER para la transmisión PDM OFDM óptico coherente.

Fuente: (Le et al., 2014)

2.3. Aplicación de OFDM en redes de acceso.

En las redes de acceso, es necesario asignar varios servicios a varios usuarios al mismo tiempo. Las arquitecturas de redes ópticas pasivas Ethernet (*Ethernet Passive Optical Network, EPON*) y de alta capacidad (*Gigabit-capable PON, GPON*) actuales requieren complejos algoritmos de programación y técnicas de estructura para admitir varios servicios. El rendimiento de las redes ópticas pasivas de modulación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing PON, TDM-PON*) es sensible al retardo de la transmisión de paquetes y es vulnerable a otro tráfico de datos que pasa por el mismo enlace. (Luo, 2019)

Además, las redes ópticas pasivas de multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing-PON, WDM-PON*) puede distribuir de forma transparente una variedad de servicios, porque cada servicio puede utilizar una longitud de onda dedicada. Sin embargo, las longitudes de onda múltiples pueden requerir múltiples transceptores y rejillas de guía de ondas (*Arrayed Waveguide Gratings, AWG*) o filtros ópticos para distribuir la longitud de onda a los receptores correspondientes, aumentando así los costos del sistema. Además, WDM PON carece de flexibilidad para asignar dinámicamente recursos entre diferentes servicios. La aplicación de la tecnología OFDM en PON puede reducir efectivamente el costo de una WDM - PON.

Una aplicación de OFDM es lo realizado por Bharti, (2020) donde propone un algoritmo basado en mínimos cuadrados medios (LMS) para la estimación del ruido de fase. Usando este algoritmo propuesto, se evita el principal problema de la ambigüedad de fase causada por el deslizamiento del ciclo y se mejora enormemente la tasa de errores de bits. Además, no es necesario modificar la estructura de la trama de OFDM utilizando este algoritmo. Se utiliza un sistema CO-OFDM con la técnica 8-PSK para implementar el algoritmo en cuestión. Además, el algoritmo, que utiliza la técnica de modulación 8-PSK, se analiza y compara con la técnica QPSK existente y con otros algoritmos. Las investigaciones revelaron que la

modulación 8-PSK supera a los algoritmos LMS existentes utilizando y con esto reducir significativamente la tasa de error de bit (BER).

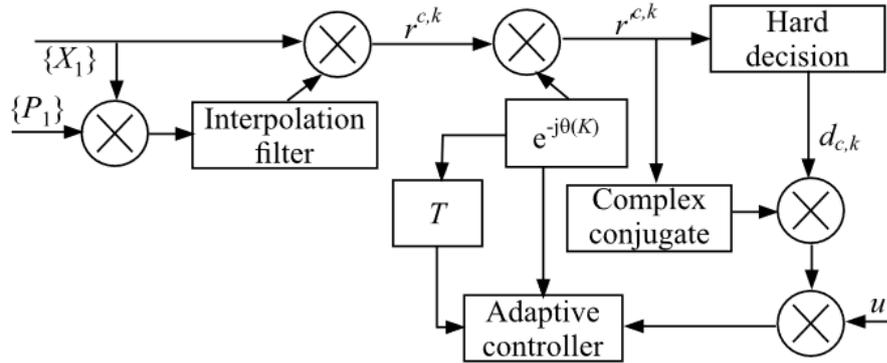


Figura 2. 4: Diagrama de bloque para el algoritmo basado en LSM.
Fuente: (Bharti, 2020)

Capítulo 3: Diseño y análisis de sistemas.

3.1. Descripción general del componente práctico.

El sistema de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM) óptico coherente llamado CO-OFDM, está diseñado utilizando la modulación 4-QAM para transmisiones de larga distancia. El sistema CO-OFDM fue completamente diseñado y simulado mediante el software de simulación OptiSystem V.13. El entorno de simulación OptiSystem es un paquete completo de diseño de software que permite a los usuarios planificar, probar y simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de las redes ópticas modernas; también puede ser utilizado por empresas de telecomunicaciones de todo el mundo para planificar e implementar una red óptica completa, cuyo enfoque es de bajo costo y ahorro de tiempo, y los investigadores pueden utilizarlo para trabajar de manera muy eficaz.

3.2. Implementación del sistema CO-OFDM utilizando fibra monomodo.

El sistema CO-OFDM consta de la parte transmisora, el enlace de fibra óptica y el receptor. La figura 3.1 muestra el diagrama de bloques general de un sistema CO-OFDM utilizando fibra monomodo (*Single-Mode Fiber, SMF*) de longitud 100 Km. El transmisor CO-OFDM está construido con una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS) que genera una secuencia de bits que se aproxima a las características de los datos aleatorios, y un modulador 4-QAM (2 bits por símbolo) que funciona como codificador. La señal 4-QAM está vinculada a un modulador OFDM con 512 subportadoras y el número de puntos FFT (Transformada Rápida de Fourier) es 1024.

La señal resultante del modulador OFDM se separará en dos fases, en la fase (I) y la cuadratura (Q) para ingresar al convertidor de radiofrecuencia (RF) a óptico ascendente llamado RTO que consta de dos moduladores Mach-Zehnder (MZM). El MZM modula la señal eléctrica desde el modulador OFDM a la portadora óptica con una frecuencia de fuente láser 193.5 THz con potencia -5 dBm . La señal óptica resultante se transmite luego sobre SMF con una atenuación de 0.2 dB/km , una dispersión de (16 ps/nm/km) , con una pendiente de dispersión de $(0.08 \text{ ps/nm}^2/\text{km})$ y un coeficiente de no

linealidad (2.6×10^{20}). Se utiliza un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) para amplificar la señal óptica y compensar la pérdida.

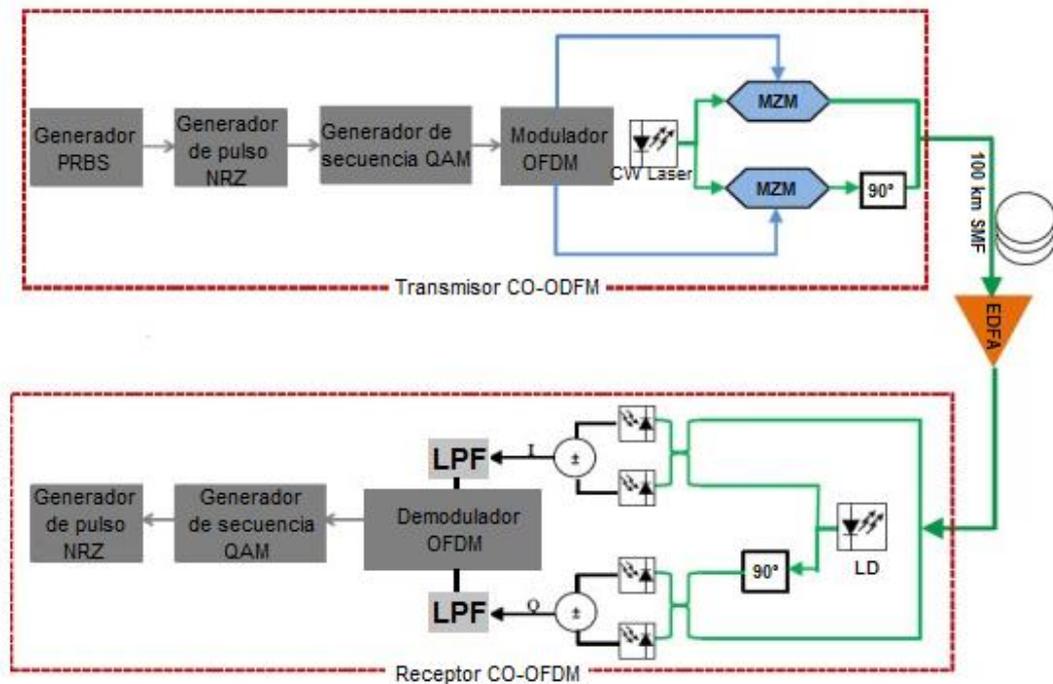


Figura 3. 1: Sistemas CO-OFDM con SMF de 100 km.
Elaborado por: Autor.

En el lado del receptor, la señal óptica es detectada por dos pares idénticos de detectores coherentes balanceados con un oscilador local (LO) para completar la conversión I/Q óptica a eléctrica y también para cancelar el ruido. Cada detector coherente consta de dos detectores PIN y dos acopladores. El fotodetector PIN tiene una corriente oscura de 10 nA, una respuesta de 1AW, una densidad de potencia térmica de ($100 \times 10^{-23} W/Hz$) y una frecuencia central de 193.5 THz. Después de esta etapa, la señal ahora está lista para ingresar a la etapa del demodulador OFDM que es similar en parámetros al modulador OFDM y se elimina el intervalo de guarda. Por último, la señal resultante se alimenta al decodificador 4-QAM para construir la señal binaria. Los parámetros globales que se utilizan en el sistema se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Parámetros globales de simulación

Longitud de la secuencia	16384 bits
Muestras por bit	8
Número de muestras	131072

Elaborado por: Autor.

3.2.1. Resultados y discusión

En esta sección se presentan y discuten los resultados de la simulación del CO-OFDM de largo alcance para diferentes longitudes de transmisión desde 100 km hasta 400 km. La figura 3.2 muestra un diagrama de constelación claro del modulador 4-QAM en el lado del transmisor. En QAM, los puntos de la constelación suelen estar dispuestos en una cuadrícula con el mismo espaciado vertical y horizontal.

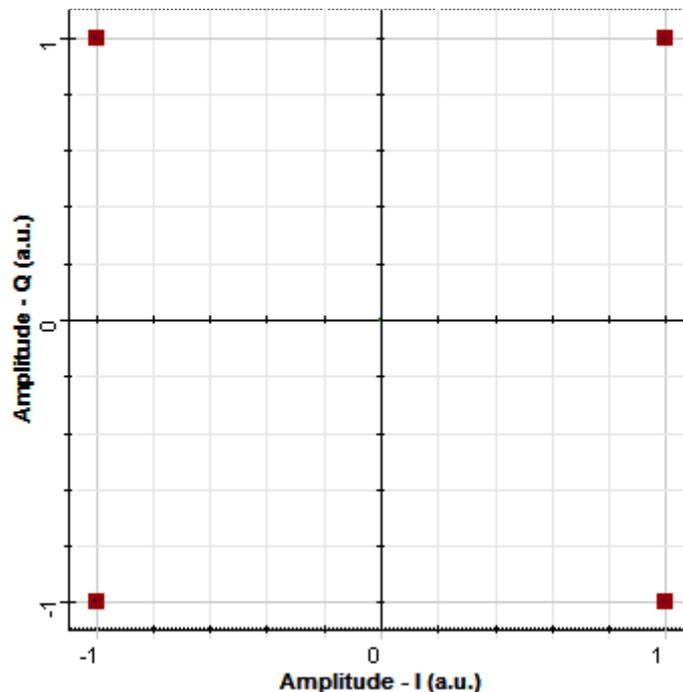


Figura 3. 2: Diagrama de constelación de 4-QAM en el transmisor CO-OFDM.
Elaborado por: Autor.

Dado que en las telecomunicaciones digitales los datos suelen ser binarios, el número de puntos en la cuadrícula suele ser una potencia de 2. El valor de la relación señal/ruido óptico (*Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR*) es 57.064 dB. El diagrama de constelación muestra la señal modulada como un diagrama de dispersión bidimensional que ayuda a estudiar la distorsión y la interferencia que se producirán en la señal.

En la figura 3.3 se muestra el espectro de RF para el componente I/Q del sistema transmisor OFDM óptico coherente, en la que se puede ver que la potencia de RF es de aproximadamente -7 dBm.

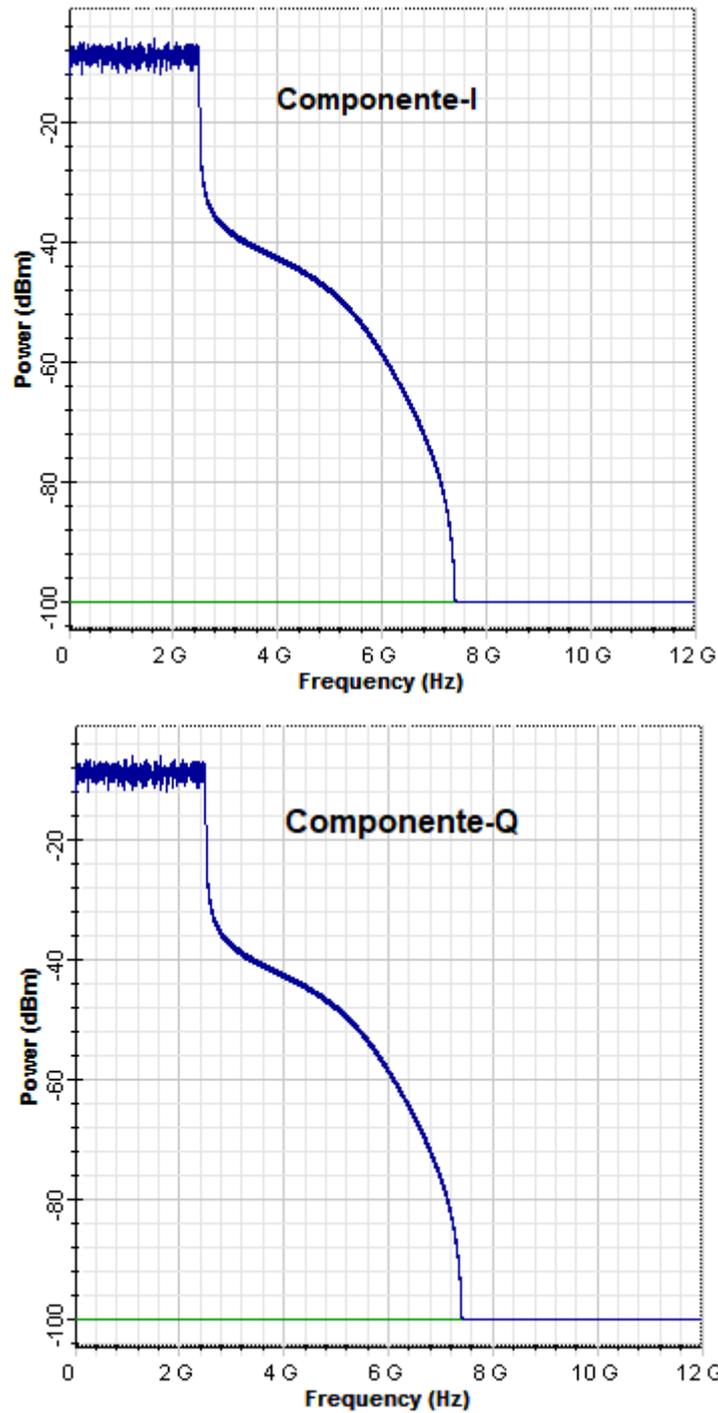


Figura 3. 3: Espectro RF de los componentes I/Q del sistema OFDM.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.4 muestra el espectro de la señal óptica, después de modular la señal eléctrica con la portadora óptica utilizando dos moduladores Mach-Zehnder (MZM).

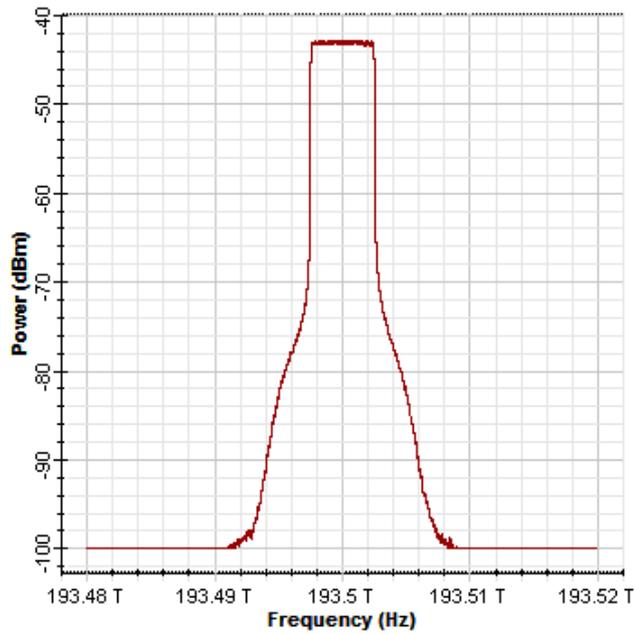


Figura 3. 4: Espectro OFDM óptico después de la modulación de 2 Mach-Zehnder.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.5 muestra el diagrama de constelación del sistema después de 100 km de fibra monomodo (SMF) con amplificador óptico EDFA de 25 dB en el lado del receptor. En comparación con la figura 3.2, la señal parece no ser clara y la relación señal/ruido óptico (OSNR) se degrada a 24.4 dB, debido a tres factores, atenuación, dispersión cromática y ruido en la fibra. Los puntos azules representan el ruido térmico y de disparo, el ruido de disparo de la fuente láser, y el ruido térmico de los fotodetectores y la dispersión de la fibra.

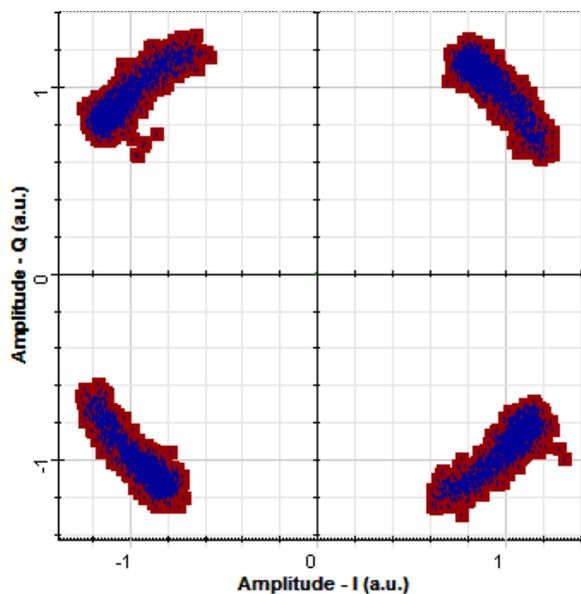


Figura 3. 5: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM en el lado del receptor después de 100 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.6 muestra el diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 200 km de fibra monomodo (SMF) en el lado del receptor. También muestra cierta distorsión en la señal, al comparar con los resultados de la figura 3.5 para una SMF de 100 Km. En este escenario, la distorsión aumenta y la OSNR se degrada a 23.7 dB.

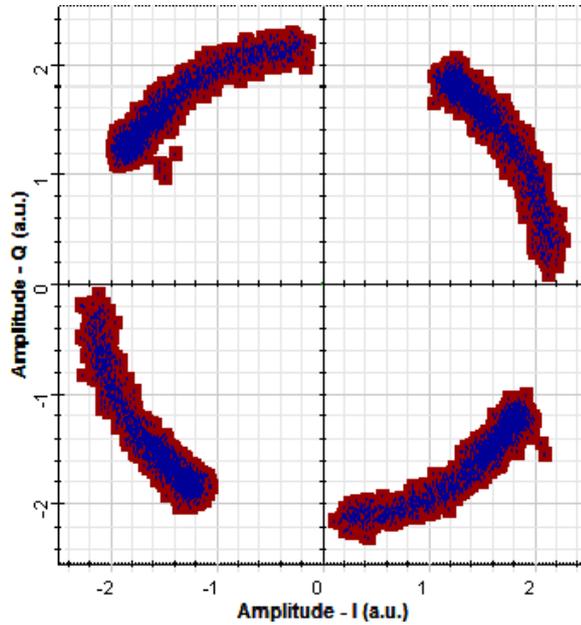


Figura 3. 6: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 200 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 muestra el diagrama de constelación después de 300 Km, parece que el sistema no detectará fácilmente la señal y la OSNR se degradará a 23.4 dB.

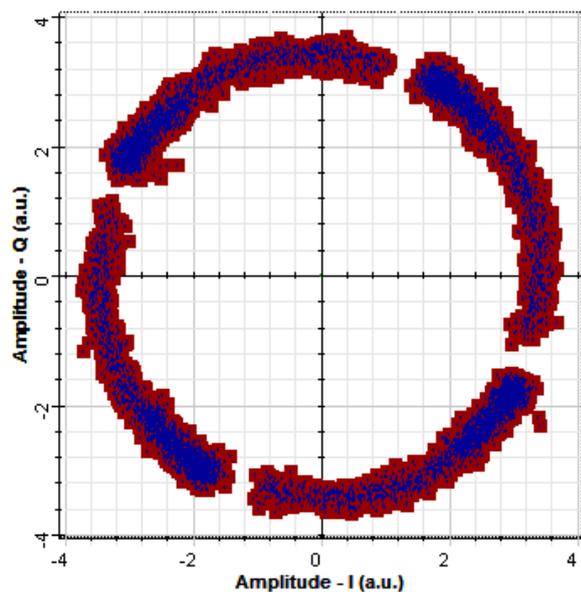


Figura 3. 7: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 300 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.8 muestra el diagrama de constelación después de 400 Km. Se puede ver que la señal está distorsionada y totalmente corrompida. Como se mencionó anteriormente, la dispersión cromática provoca el ensanchamiento de la señal después de largas distancias y aumenta la atenuación.

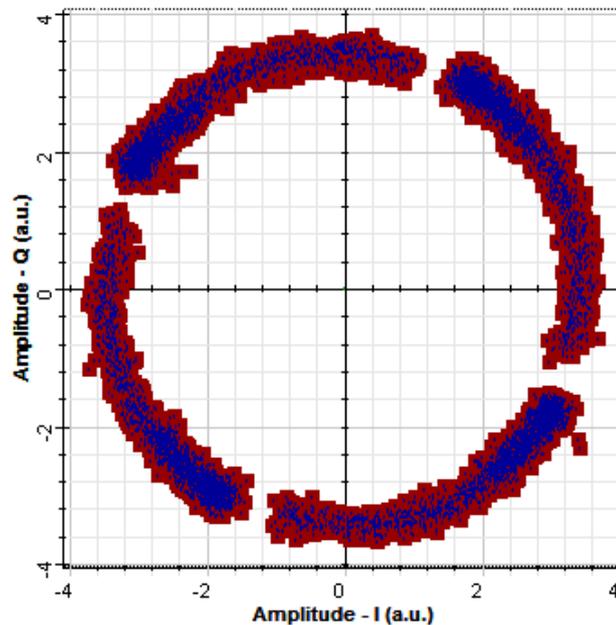


Figura 3. 8: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 400 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.9 muestra la relación entre los valores de la OSNR y los valores de distancia, se puede observar que el valor de la OSNR en el lado del receptor se degrada con respecto al aumento de la distancia.

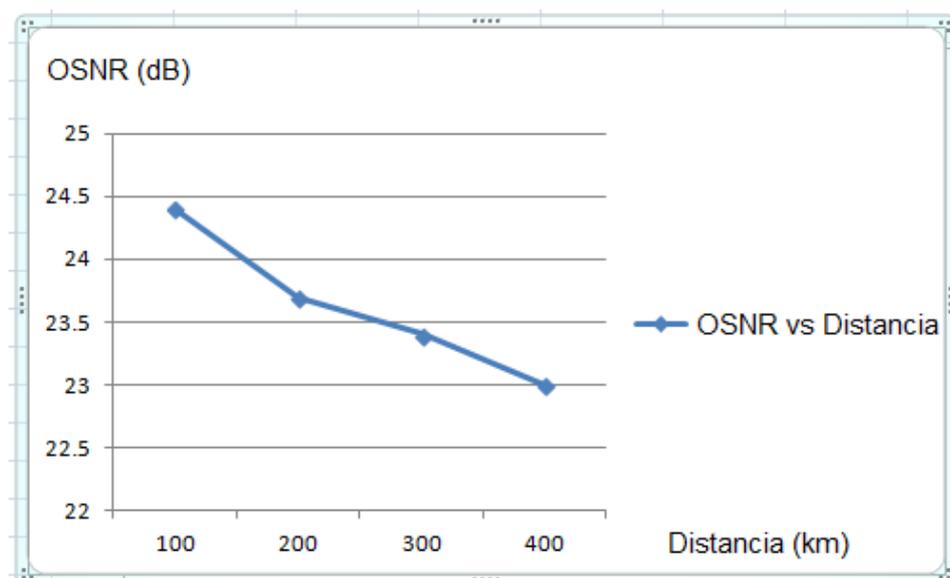


Figura 3. 9: Relación señal/ruido óptico (OSNR) versus distancia (km)
Elaborado por: Autor.

De todos los diagramas de constelaciones anteriores, el sistema no puede detectar la señal a largas distancias. Para resolver este problema, se puede aumentar la potencia del amplificador EDFA con límites, porque el amplificador EDFA funciona de manera efectiva cuando la señal tiene poca pérdida de potencia. Pero, cuando aumenta la longitud de transmisión, la OSNR disminuye y la señal es débil, incluso al aumentar la potencia del amplificador EDFA, la señal no mejorará.

En la siguiente sección, se propone una fibra de compensación de dispersión (DCF) como una solución para ayudar a mejorar la calidad de la señal y aumentar la distancia de transmisión sin la necesidad de aumentar la potencia del amplificador EDFA.

3.3. CO-OFDM con fibra de compensación de dispersión (DCF).

La figura 3.10 muestra el diseño del sistema OFDM óptico coherente (CO-OFDM) con dos tramos de fibra, tal como, SMF y DCF. La fibra de compensación de dispersión (DCF) compensará la dispersión de la SMF y aumentará la distancia de transmisión. El transmisor CO-OFDM está construido con una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS), para generar una secuencia de bits que se aproxima a las características de los datos aleatorios, y un codificador 4-QAM (2 bits por símbolo). La señal 4-QAM está conectada a un modulador OFDM con una subportadora (512) y puntos FFT (1024).

La fase (I) y la cuadratura (Q) de la señal resultante del modulador OFDM se transmite al modulador óptico I/Q directo. El modulador I/Q directo consta de dos moduladores Mach-Zehnder (MZM) de niobato de litio (LiNb) y modulará la señal eléctrica del modulador OFDM a la portadora óptica con una fuente láser de 193.5 THz y una potencia de la fuente láser de -5 dBm.

La señal óptica resultante de los dos MZM LiNb se transmite luego a través del sistema de fibra monomodo y compensación de dispersión (SMF-DCF). La atenuación SMF es 0.2 dB/km y la atenuación DCF es $0,4 \text{ dB/km}$. La dispersión SMF es 16 ps/nm/km para 100 km. La SMF producirá una

dispersión de $16 \times 100 = 1600 \text{ ps/nm}$. Por lo tanto, para compensar la dispersión de la SMF de 100 km, se necesita una DCF de 20 km de largo con una dispersión de -80 ps/nm/km . Esto producirá una dispersión de $-80 \times 20 = -1600 \text{ ps/nm}$, que será negativa para cancelar la dispersión positiva de la SMF.

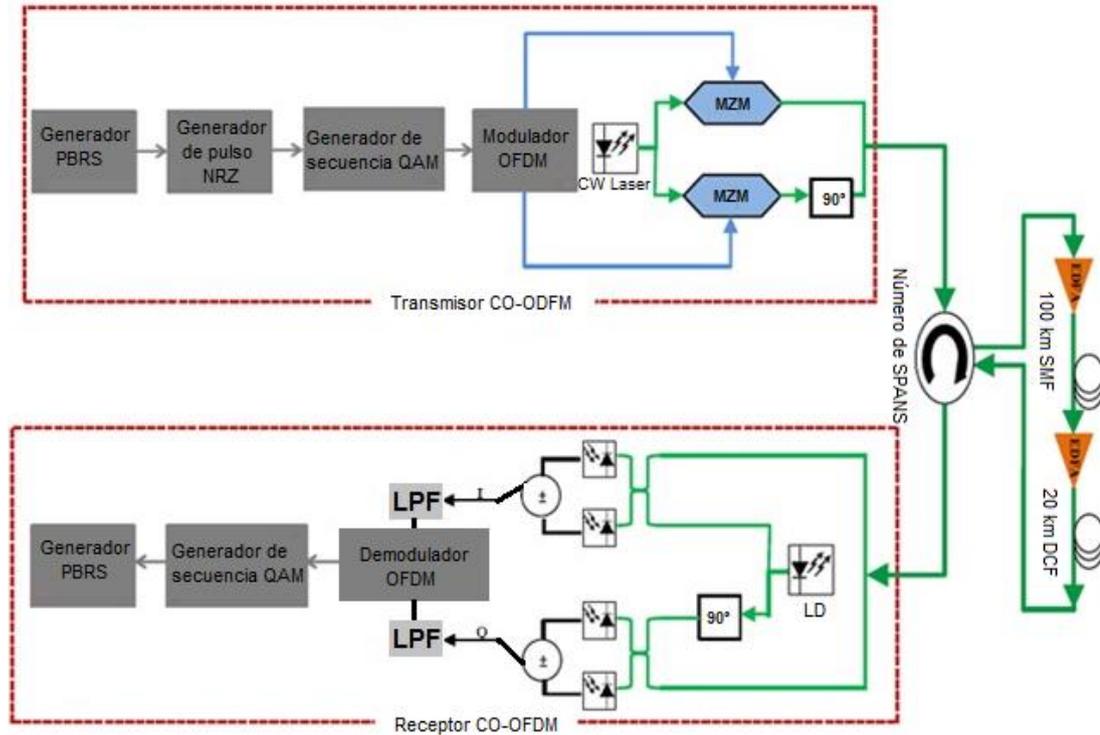


Figura 3. 10: Diseño del sistema OFDM óptico coherente con SMF-DCF.
Elaborado por: Autor.

Se utilizan dos amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA), el primer amplificador EDFA con ganancia de 15 dB para amplificar la señal y para compensar la pérdida con figura de ruido 2 dB, el segundo amplificador EDFA con ganancia y figura de ruido de 13 dB de 2 dB para amplificar la señal que sale de la DCF.

En el lado del receptor, la señal óptica entrante es detectada por dos pares idénticos de detectores coherentes balanceados con un oscilador local (LO) para realizar la conversión I/Q óptica a eléctrica y cancelar el ruido. Cada detector consta de dos acopladores y dos fotodetectores PIN. Cada fotodetector PIN tiene una corriente oscura de 10 nA, una capacidad de respuesta de 1 A/W , un ruido térmico de $100 \times 10^{-23} \text{ W/Hz}$ y una frecuencia

central de 193.5 THz. Después de detectar la señal por los detectores balanceados, la señal se envía al demodulador OFDM. El demodulador OFDM tiene parámetros similares al modulador OFDM y luego se elimina el intervalo de guarda. Finalmente, la señal resultante se alimenta a un decodificador 4-QAM para crear una señal binaria.

Tabla 3. 2: Parámetros SMF

Parámetros SMF	
Dispersión	$16ps/nm/km$
Pendiente de dispersión	$0.08ps/nm^2/Km$
Coefficiente PMD	$0.2ps/km$
Area efectiva	$80\mu m^2$
Coefficiente de no linealidad	2.6×10^{-20}
Atenuación	$0.2dB/km$

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3: Parámetros DCF

Parámetros SMF	
Dispersión	$-80ps/nm/km$
Pendiente de dispersión	$0.08ps/nm^2/Km$
Coefficiente PMD	$0.5ps/km$
Area efectiva	$22\mu m^2$
Coefficiente de no linealidad	2.6×10^{-20}
Atenuación	$0.5dB/km$

Elaborado por: Autor.

3.3.1. Resultados y discusión

Los resultados de la simulación del CO-OFDM de largo alcance con DCF para diferentes longitudes de transmisión desde 600 km hasta 6600 km se presentan y discuten en esta sección. La figura 3.11 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO-OFDM después de 600 km de longitud de fibra utilizando 5 tramos tanto para el SMF de 100 km como para el DCF de 20 km. Las ganancias de los dos amplificadores EDFA están en el mismo orden de parámetros de 15 dB y 13 dB respectivamente, y el valor OSNR degradado de 57.06 dB a 15.97 dB.

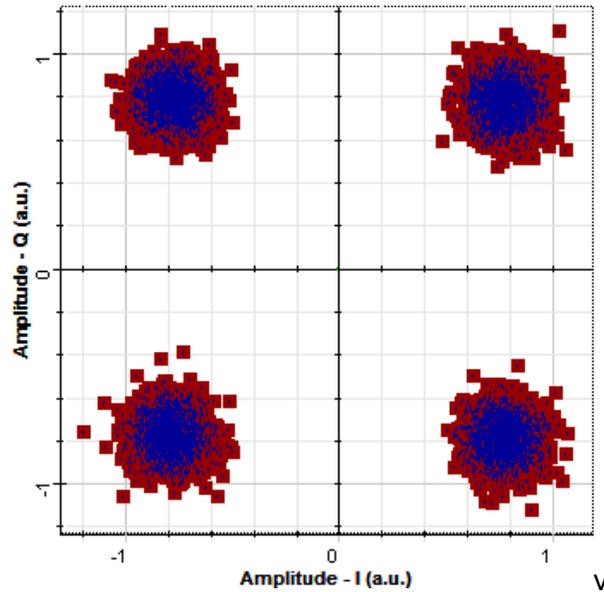


Figura 3. 11: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 600 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.12 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO OFDM después de 1800 km de longitud de fibra usando 15 tramos tanto para fibra monomodo (SMF) de 100 km como para la fibra de compensación de dispersión (DCF) de 20 km. Las potencias de los dos amplificadores EDFA están en el mismo orden de parámetros de 15 dB y 13 dB. La señal ahora sufre de poca dispersión a medida que aumenta la longitud, aumenta la dispersión y la OSNR se degrada a 11.35 dB.

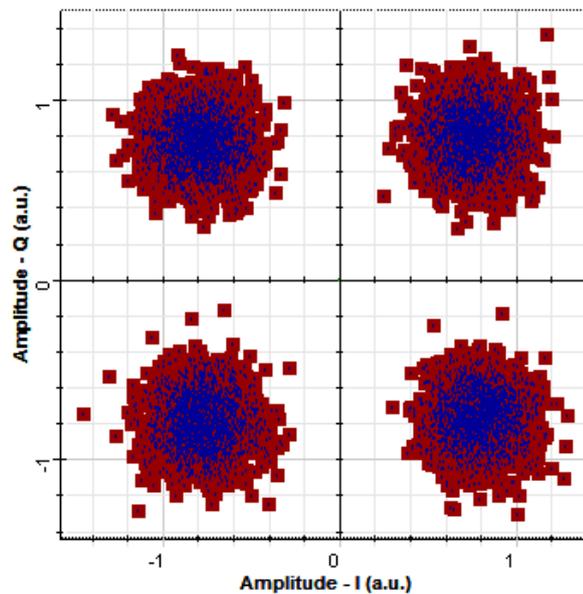


Figura 3. 12: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 1800 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.13 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO OFDM después de 3000 km usando 25 tramos tanto para el SMF de 100 km como para el DCF de 20 km. Se puede ver que la señal aún se detecta y la dispersión es directamente proporcional a la longitud, y el OSNR se degrada a 9.15 dB.

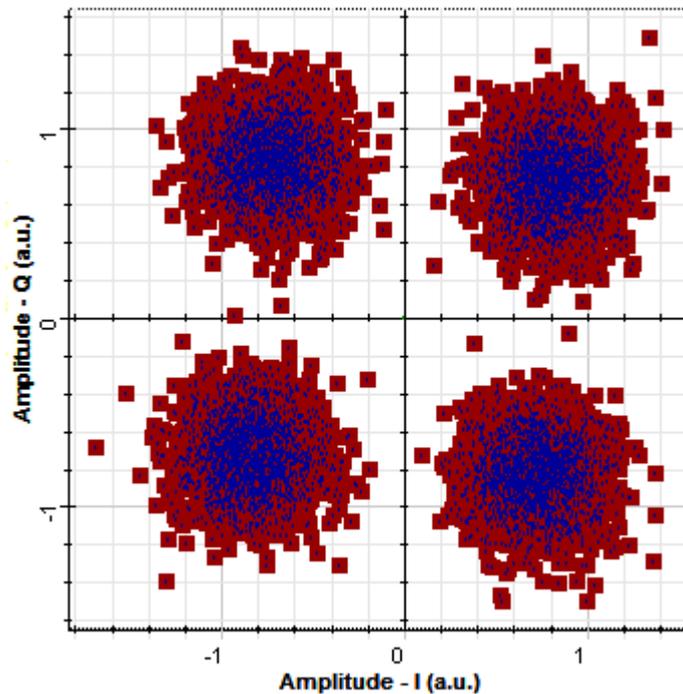


Figura 3. 13: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 3000 km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.14 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO OFDM después de 4200 km usando 35 tramos tanto para el SMF de 100 km como para el DCF de 20 km. La señal aún se detecta, aunque la dispersión sigue aumentando con la longitud y el OSNR se degrada a (7,69 dB).

La figura 3.15 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO OFDM después de 5400 km usando 45 tramos tanto para el SMF de 100 km como para el DCF de 20 km. La señal sufre demasiada distorsión, pero aún puede detectarse con la posibilidad de errores y el OSNR se degrada a 6.59 dB.

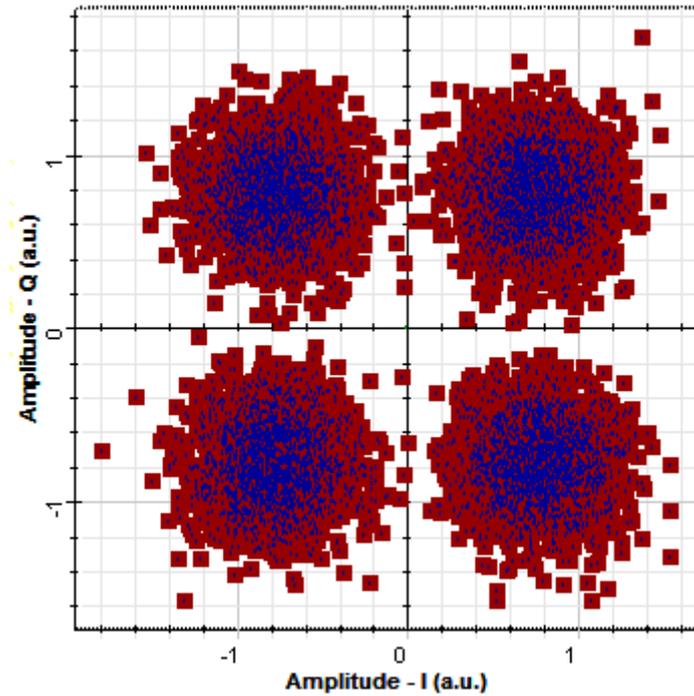


Figura 3. 14: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 4200 km.

Elaborado por: Autor.

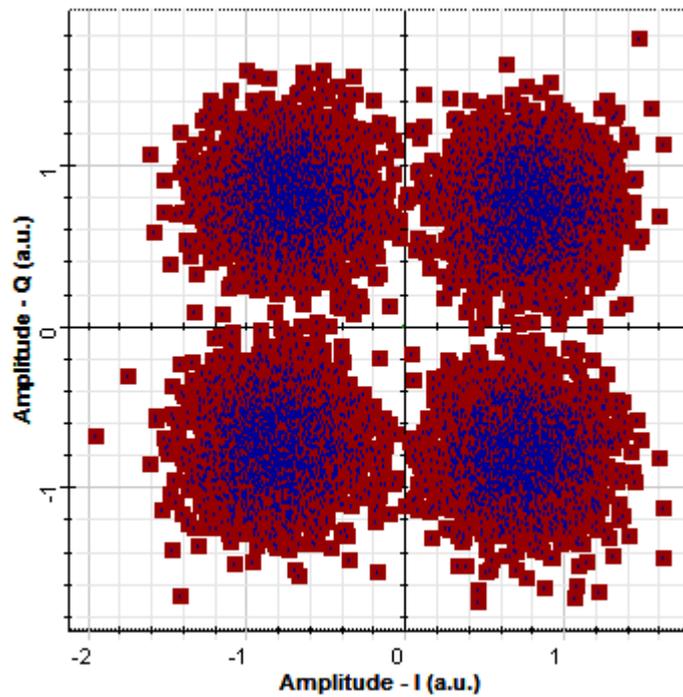


Figura 3. 15: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 5400 km.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.16 muestra el diagrama de constelación del sistema en el lado del receptor CO OFDM después de 6600 km usando 55 tramos tanto para el SMF de 100 km como para el DCF de 20 km. La señal sufre demasiada

distorsión y es difícil detectar la señal con los mismos parámetros debido a la gran cantidad de ruido y atenuación causada por la larga distancia que debilita la señal y el OSNR degradado a 5.75 dB.

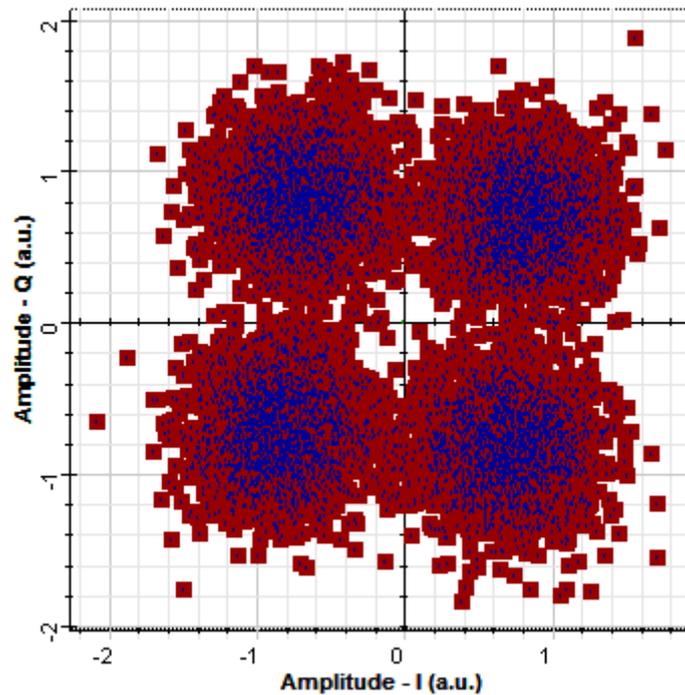


Figura 3. 16: Diagrama de constelación del sistema CO-OFDM después de 6600 km.

Elaborado por: Autor.

Al aplicar los mismos parámetros de simulación con el aumento del número de tramos, la señal se corrompe por completo y no se puede recuperar debido a la gran cantidad de ruido y atenuación causados por la larga distancia. La figura 3.17 muestra la relación entre los valores de OSNR y los valores de distancia, se puede observar que el valor de OSNR en el lado del receptor se degrada con respecto al aumento de la distancia.

Una de las soluciones para aumentar la distancia de transmisión en esta configuración es aumentar la ganancia de EDFA. Como resultado, si se aumenta la potencia de EDFA, la señal se optimizará durante cientos de kilómetros y luego se corromperá, debido a la larga distancia de transmisión y al aumento de los efectos no lineales debido al alto aumento de la ganancia de EDFA.

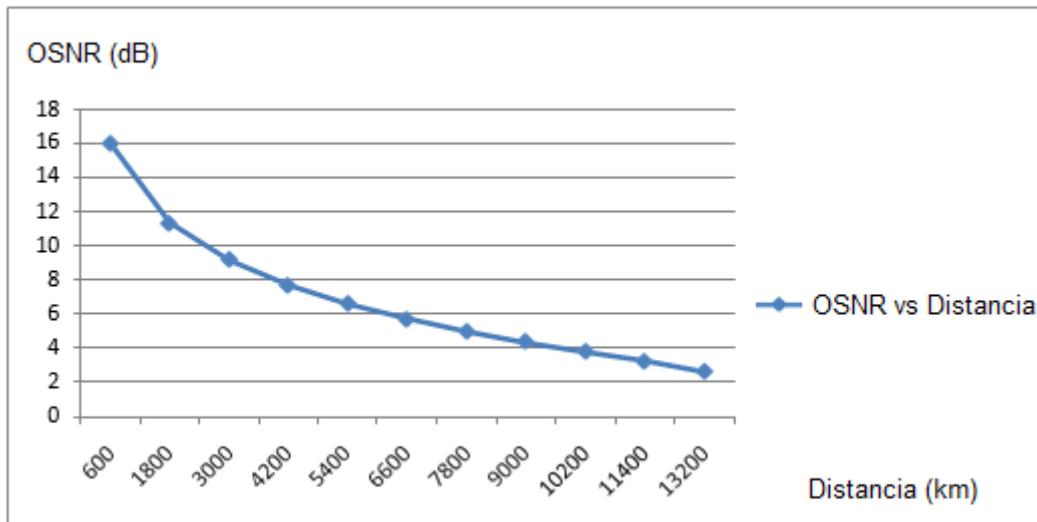


Figura 3. 17: Relación señal/ruido óptico (OSNR) versus distancia (km)
Elaborado por: Autor.

3.4. Sistema DD-OFDM con configuración SMF.

El sistema OFDM de detección directa (DD-OFDM) consta de la parte transmisora, el enlace de fibra óptica y el receptor. La figura 3.18 muestra el diagrama de bloques del sistema DD-OFDM con fibra monomodo (SMF). El transmisor DD-OFDM está construido con una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS) que genera una secuencia de bits que se aproxima a las características de los datos aleatorios, y una 4-QAM (2 bits por símbolo) funciona como codificador. La señal 4-QAM está vinculada a un modulador OFDM con subportadora (512) y el número de puntos FFT es (1024).

La señal resultante del modulador OFDM separará en dos fases en la fase (I) y la cuadratura (Q) para ingresar al filtro de caída de coseno para ingresar al modulador en cuadratura con frecuencia de 7.5 GHz, luego de eso la señal ingresará a la RF al convertidor óptico ascendente (RTO) que consta de un modulador Mach-Zehnder (MZM).

El (MZM) modulará la señal eléctrica del modulador OFDM a la portadora óptica con frecuencia láser (193.5) THz y potencia de -5 dBm. La señal óptica resultante se transmite luego sobre SMF con atenuación (0,2 dB/Km), una dispersión de 16 ps/nm/km, una pendiente de dispersión de 0,08 ps/nm²/km y un coeficiente de no linealidad de $2,6 \times 10^{-20}$. Se utiliza un amplificador de

fibra dopada con erbio (EDFA) para amplificar la señal óptica y compensar la pérdida.

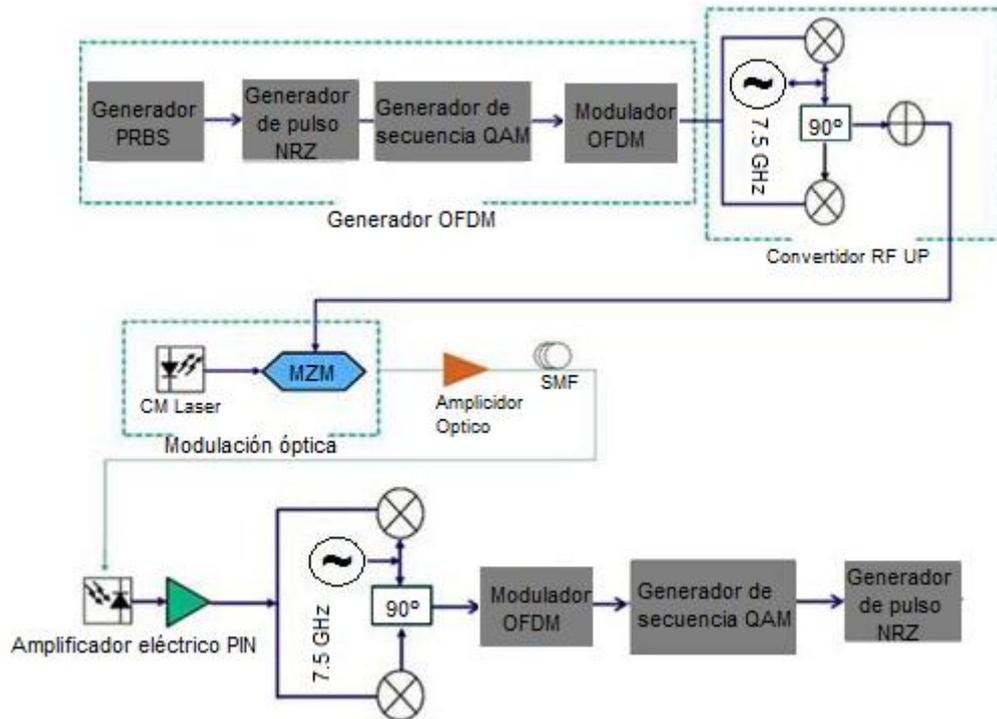


Figura 3. 18: Diagrama de bloques del sistema OFDM de detección directa.
Elaborado por: Autor.

En la parte del receptor, la señal óptica es detectada por el detector PIN y el amplificador eléctrico. El fotodetector PIN tiene una corriente oscura de 10 nA, una respuesta de $1A/W$, una densidad de potencia térmica ($15 \times 10^{-23} W/Hz$), y una frecuencia central de 193,5 THz. El amplificador eléctrico tiene una ganancia de 16 dB y una potencia de ruido de -50 dBm, después de esta etapa, la señal ahora está lista para ingresar a la etapa del demodulador OFDM, que es similar en parámetros al modulador OFDM y se elimina el intervalo de guarda. la señal resultante se alimenta al decodificador 4-QAM para construir la señal binaria.

Tabla 3. 4: Parámetros globales

Parámetros globales	
longitud de la secuencia	16384 bits
muestras por bit	8
Número de muestras	131072

Elaborado por: Autor.

3.4.1. Resultados y discusión

En esta sección se presentan y comentan los resultados de la simulación del DD-OFDM de largo alcance para diferentes longitudes de transmisión desde 100 km hasta 300 km.

La figura 3.19 muestra un diagrama de constelación claro del modulador 4-QAM en el lado del transmisor. El valor de OSNR es (40,54 dB). El diagrama de constelación muestra la señal modulada como un diagrama de dispersión bidimensional que ayuda a estudiar la distorsión y la interferencia que se produce en la señal.

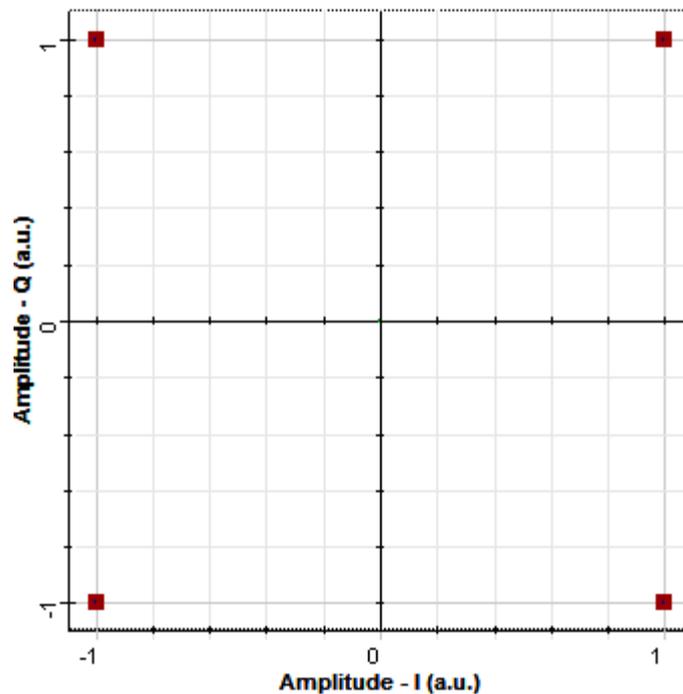


Figura 3. 19: Diagrama de constelación de 4-QAM en el transmisor DD-OFDM.
Elaborado por: Autor.

La Figura 3.20 muestra el espectro de RF para el componente I/Q del sistema en el transmisor DD-OFDM. La potencia de RF se mide a casi (-8,5 dBm).

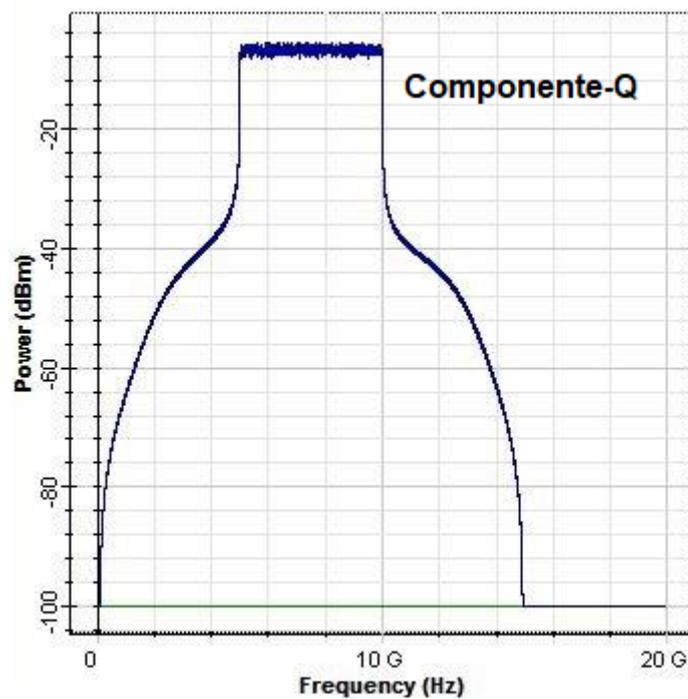
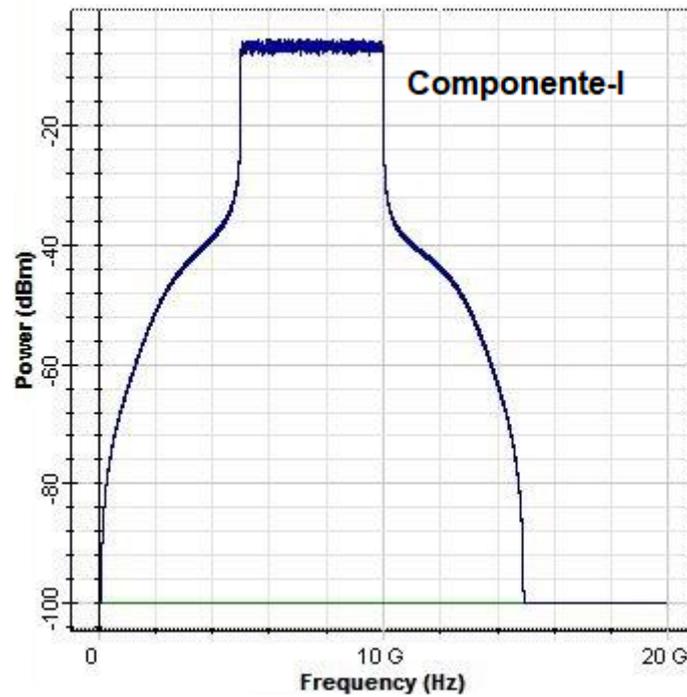


Figura 3. 20: Espectro RF de los componentes I/Q del sistema DD-OFDM.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.21 muestra el espectro OFDM óptico después del modulador MZM. La potencia del espectro óptico se mide (2 dBm) después del amplificador óptico.

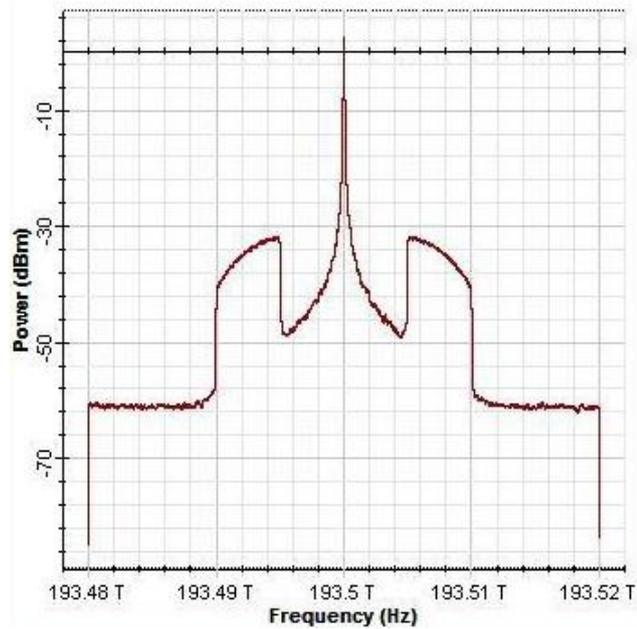


Figura 3. 21: Espectro óptico del sistema OFDM después del modulador MZM.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.22 muestra el espectro óptico del sistema OFDM en el lado del receptor, la potencia del espectro óptico es (6 dBm), la potencia disminuyó debido a la atenuación de la fibra, el ruido y la dispersión cromática.

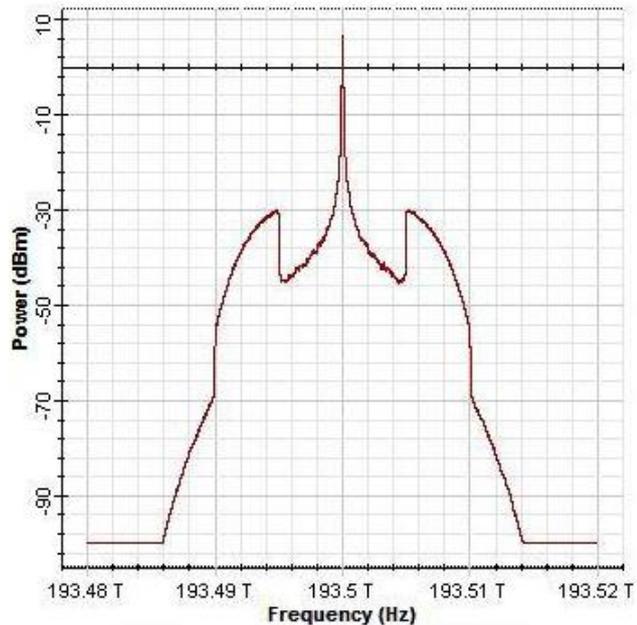


Figura 3. 22: Espectro óptico del sistema OFDM en el lado del receptor.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.23 muestra el diagrama de constelación del sistema después de 100 km SMF con amplificador EDFA de 12 dB en el lado del receptor. Comparando con el diagrama de constelación del transmisor en la figura 3.19,

la señal parece no ser clara y la OSNR es 38.11 dB debido a la atenuación, la dispersión cromática y el ruido, los puntos azules representan el ruido térmico y de disparo, el ruido de disparo de la fuente láser, y el ruido térmico de los fotodetectores y la dispersión de la fibra. Además, al comparar el diagrama de constelación DD-OFDM con el de CO-OFDM con la misma distancia (ver figura 3.5), se puede notar que la señal en DD-OFDM está distorsionada y parece desplazarse hacia el centro.

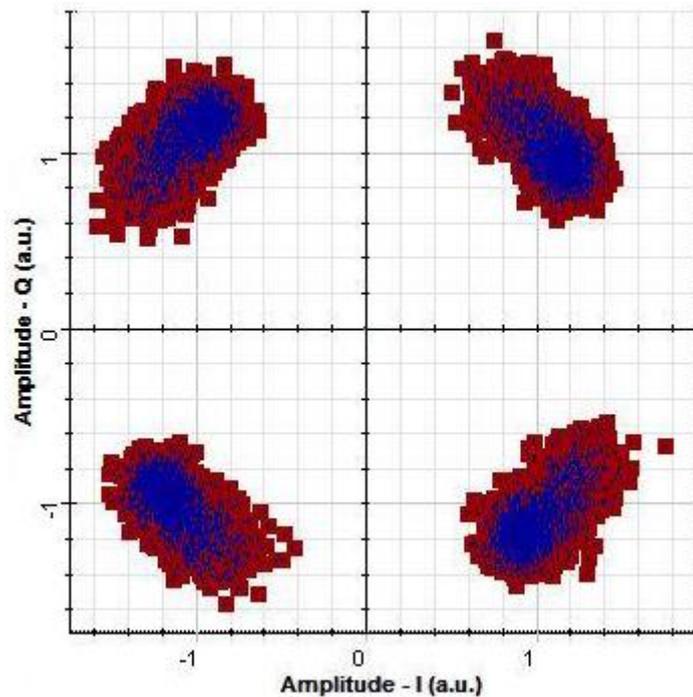


Figura 3. 23: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 100 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.24 muestra el diagrama de constelación del sistema DD-OFDM después de 200 km de fibra monomodo (SMF) en el lado del receptor. También muestra mayor distorsión en la señal, al compararla con la figura 3.23 del sistema DD-OFDM, la distorsión aumenta debido a la atenuación, a la dispersión cromática de la longitud de la fibra óptica y al ruido. Comparando los resultados con la figura 3.6 en el sistema CO-OFDM en la misma longitud, se puede notar la mayor complejidad en la señal después de la misma longitud en el sistema CO-OFDM, y la OSNR degradada a 37.43 dB.

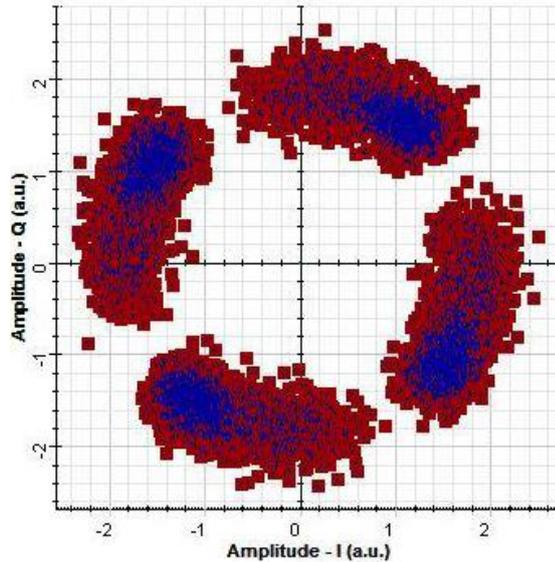


Figura 3. 24: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 200 km.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.25 muestra el diagrama de constelación después de 300 Km, parece que el sistema no detectará la señal debido a la distorsión, la dispersión cromática y el ruido, la OSNR degradada a 36.5 dB. Al comparar con la figura 3.7 del sistema CO-OFDM, se puede notar que la señal se distorsiona en CO-OFDM después de 400 Km, pero en el DD-OFDM la señal está completamente distorsionada después de 250 Km, esto indica que el sistema CO-OFDM está trabajando mucho mejor en las distancias de largo alcance.

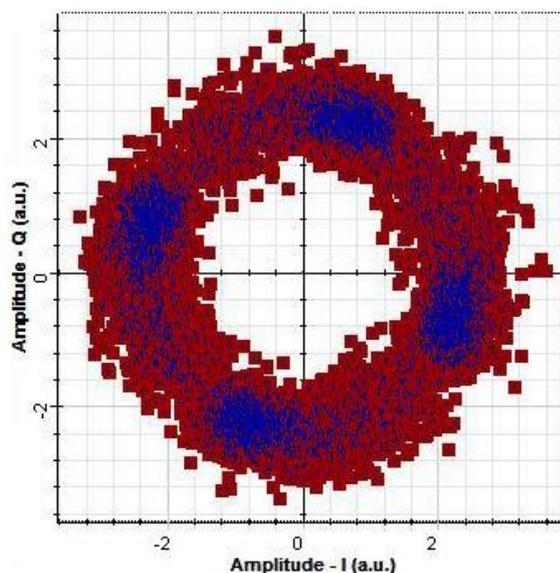


Figura 3. 25: Diagrama de constelación del sistema DD-OFDM en el lado del receptor después de 300 km.
Elaborado por: Autor.

En conclusión, la característica común de DD-OFDM es, por supuesto, que utiliza la detección directa en el lado del receptor, DD-OFDM aprovecha que la señal OFDM es más inmune al ruido de corte de impulso en la red de televisión por cable (CATV). Como resultado, el sistema CO-OFDM puede soportar alta tasa de bits y alta eficiencia espectral, con el máximo rendimiento en la sensibilidad del receptor, sin compensación de dispersión en comparación con el sistema DD-OFDM.

3.5. Integración de WDM con CO-OFDM.

WDM es una característica importante en el desarrollo de las comunicaciones ópticas. Al usar WDM se puede brindar más flexibilidad al sistema y simplificar el diseño de la red, también mejora la capacidad de la red al usar múltiples longitudes de onda en una sola fibra, donde cada longitud de onda lleva un canal separado. Como resultado, aumentará la velocidad de datos. La figura 3.26 muestra el diseño del sistema WDM CO-OFDM con un SMF de 200 km de longitud. El transmisor CO-OFDM está construido con una secuencia binaria pseudoaleatoria (PRBS) para generar una secuencia de bits que se aproximará a las características de los datos aleatorios. También está construido con un codificador 4-QAM (2 bits por símbolo). La señal 4-QAM está conectada a un modulador OFDM con una subportadora (512) y puntos (1024 FFT).

La fase (I) y la cuadratura (Q) de la señal resultante del modulador OFDM se transmite al modulador óptico I/Q directo. El modulador óptico I/Q consta de dos moduladores Mach-Zehnder (MZM) de niobato de litio (LiNb) que modularán la señal eléctrica del modulador OFDM al portador óptico. El portador óptico que tiene longitudes de onda láser comienza desde 193.05 THz hasta 193.2 THz. El sistema WDM consta de cuatro canales para admitir las cuatro bandas OFDM con un espaciado de canales de 50 GHz. Cada señal OFDM tiene una tasa de bits de 12 Gbps que proporcionará una tasa de datos general de 48 Gbps. Las señales resultantes de los transmisores OFDM se envían al WDM MUX y se filtran mediante un filtro óptico gaussiano. Las cuatro longitudes de onda diferentes se fusionan para producir una señal que se lanzará en una sola fibra.

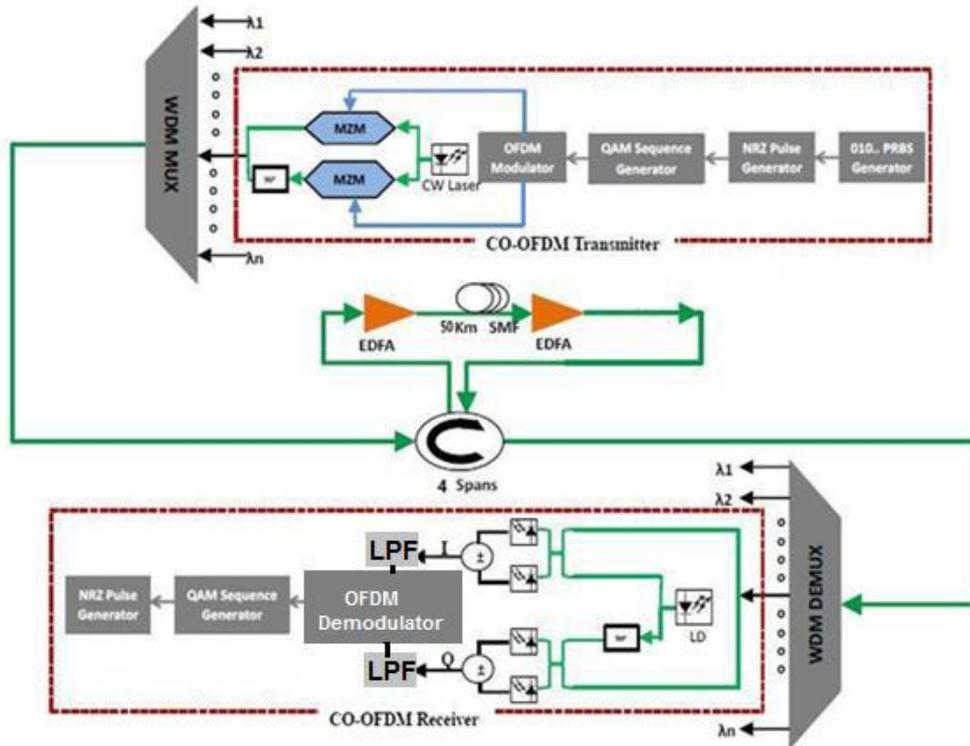


Figura 3. 26: WDM CO-OFDM Diagrama de bloques del sistema con SMF.
Elaborado por: Autor.

La señal óptica resultante del WDM MUX se transmite a través de la SMF. La atenuación de la SMF es 0.2 dB/km y la dispersión es 16 ps/nm/km para 100 km. La SMF producirá una dispersión de $16 \times 100 = 1600$ ps/nm. Se utiliza un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) con una ganancia de 20 dB para amplificar la señal y compensar la pérdida. La señal óptica entrante del enlace de fibra óptica es separada en cuatro longitudes de onda por el WDM DEMUX y cada longitud de onda es detectada por su receptor diseñado. Cuatro receptores están diseñados para tener los mismos parámetros, excepto la frecuencia central del receptor y el oscilador local que será idéntico a la longitud de onda del transmisor láser.

Cada receptor consta de dos pares idénticos de detectores coherentes balanceados con un oscilador local (LO) para realizar la conversión I/Q óptica a eléctrica y cancelar el ruido. Cada detector consta de dos acopladores y dos fotodetectores PIN. Cada fotodetector PIN tiene una corriente oscura de 10 nA, una capacidad de respuesta de 1 A/W y un ruido térmico de 100×10^{-23} W/Hz. Después de detectar la señal por los detectores

balanceados, la señal se envía al demodulador OFDM que tiene parámetros similares al modulador OFDM. A continuación, se elimina el intervalo de guarda. Finalmente, la señal resultante se alimenta a un decodificador 4-QAM para crear una señal binaria.

3.5.1. Resultados y discusión

La figura 3.27 muestra el espectro de RF del componente I/Q del sistema CO-OFDM WDM para un usuario en el lado del transmisor. La potencia de RF se mide aproximadamente -10 dBm.

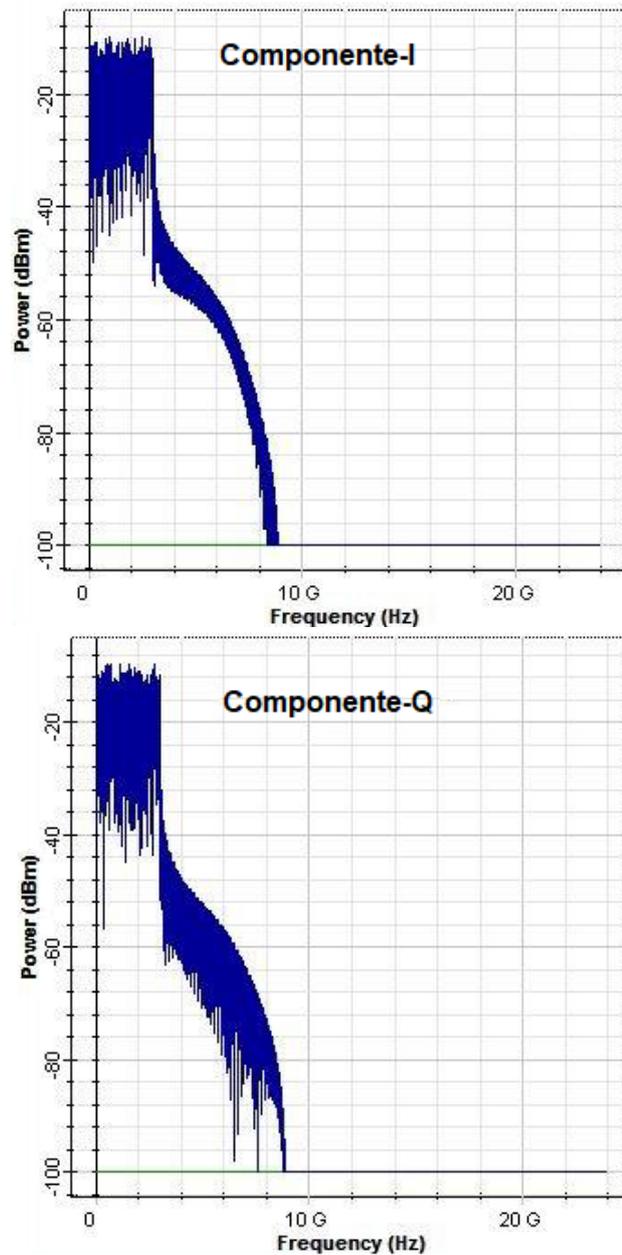


Figura 3. 27: Componente I/Q del espectro RF OFDM en el transmisor CO-OFDM.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.28 muestra los cuatro espectros OFDM después del sistema WDM. Cuatro canales WDM a partir de 193.05 THz a 193.2 THz con un espaciado de canal de 50 GHz, la potencia de las señales es de aproximadamente -44 dBm.

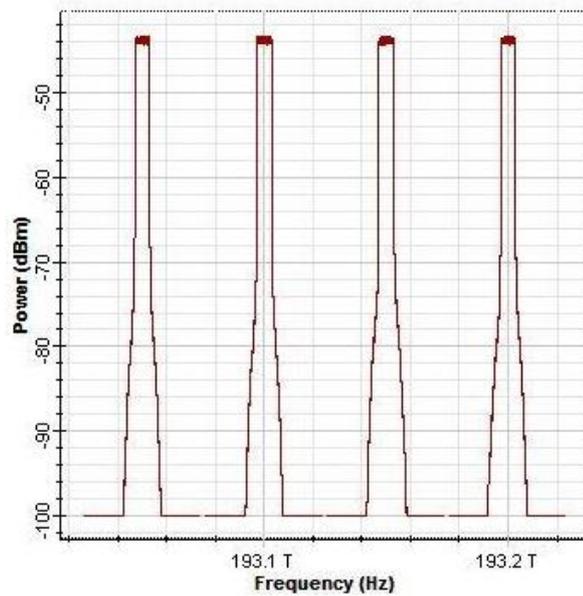


Figura 3. 28: Señal OFDM después de WDM MUX con 4 canales en el lado del transmisor.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.29 muestra las cuatro señales OFDM después de SMF con amplitud de -28 dBm. La amplitud disminuyó debido al ruido y las dispersiones del enlace de fibra.

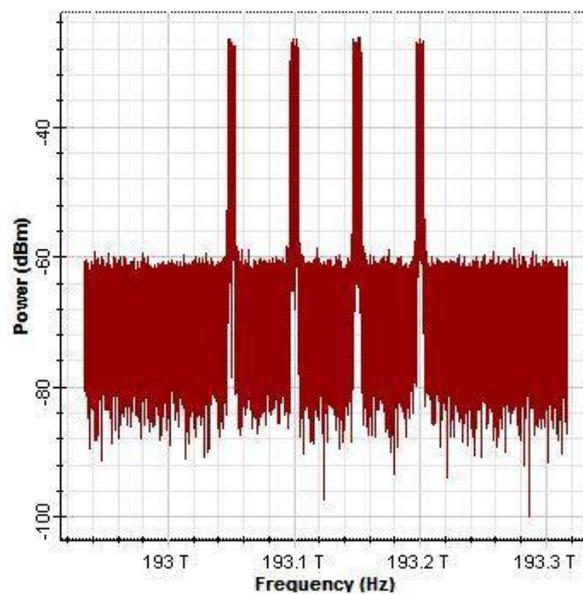


Figura 3. 29: Señal OFDM después de SMF con 4 canales en el lado del receptor.
Elaborado por: Autor.

La figura 3.30 muestra el diagrama de constelación del sistema WDM CO-OFDM después de 200 Km. Como puede verse en la figura, la transmisión se realiza correctamente y la señal es fácil de detectar.

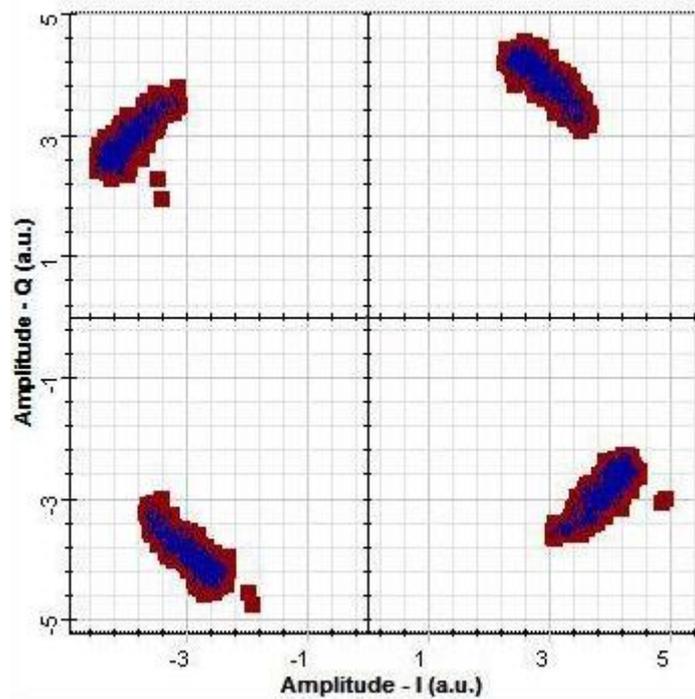


Figura 3. 30: Diagrama de constelación de WDM CO-OFDM para un usuario en el lado del receptor después de 200 km.

Elaborado por: Autor.

De todos los resultados anteriores, se puede deducir que la integración del sistema CO-OFDM con los sistemas WDM brindará un mejor rendimiento para el sistema, y es fácil usar el SMF con variante de longitudes de onda para aumentar la capacidad de velocidades de datos del sistema.

Conclusiones

Este componente complejo se ha discutido el concepto de OFDM óptico coherentes y OFDM de detección directa, que son ampliamente considerados como soluciones a largo plazo para redes de largo alcance. Los sistemas OFDM ópticos coherentes son susceptibles a fibras monomodo de dispersión cromática y no linealidades, por lo tanto, en estos escenarios; se ha estudiado la integración de las ventajas tanto de los sistemas coherentes como de los sistemas OFDM y la integración del OFDM óptico coherente con la multiplexación por división de longitud de onda.

Inicialmente se propuso, simuló y analizó el desempeño de un sistema OFDM óptico coherente y OFDM de detección coherente para corta distancia. Luego, el sistema DCF se aumentó la distancia de transmisión hasta 6600 Km, el sistema DCF se utiliza para superar los límites de transmisión de largo alcance causados por la dispersión de la fibra con altas tasas de datos. Los resultados de la simulación muestran que el sistema es confiable y puede proporcionar una buena transmisión para largas distancias. Aplicando algunas modificaciones en el amplificador EDFA y agregando otro DCF, se pudo alcanzar una distancia de más de 7000 Km.

Luego, se propuso, simuló y analizó el desempeño de la integración del sistema OFDM óptico coherente con el sistema WDM para transmisión de largo alcance de 200 km con alta tasa de datos de 48 Gbps. El sistema WDM consta de cuatro canales para admitir las cuatro bandas OFDM con un espacio de canal de 50 GHz. Cada señal OFDM tiene una tasa de bits de 12 Gbps que proporcionará una tasa de datos general de 48 Gbps. Los resultados muestran que el sistema es confiable y puede proporcionar velocidades de datos significativamente altas con cuatro longitudes de onda en una fibra monomodo (SMF). Además, los resultados muestran que el ruido y la dispersión cromática aumentan a medida que aumenta la distancia de transmisión.

Recomendaciones.

Investigación de distancias de transmisión en sistemas OFDM ópticos, detección directa y WDM con las modificaciones de amplificadores EDFA y fibra de compensación de dispersión (DCF) para aumentar la distancia de transmisión.

Aplicar múltiples longitudes de onda al sistema WDM para aumentar el rendimiento de las velocidades de datos en más de 1 Tbps.

Bibliografía.

- Bharti, M. (2020). Performance Enhancement of Coherent Optical OFDM System Using LMS Algorithm. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 1, 1–5. <https://doi.org/10.26636/jtit.2020.137919>
- Debbah, M. (2020). *Short introduction to OFDM*. http://chenweixiang.github.io/docs/Short_Introduction_to_OFDM.pdf
- Jarajreh, M. A., Giacoumidis, E., Aldaya, I., Son Thai Le, Tsokanos, A., Ghassemlooy, Z., & Doran, N. J. (2015). Artificial Neural Network Nonlinear Equalizer for Coherent Optical OFDM. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(4), 387–390. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2375960>
- Le, S. T., Blow, K. J., Mezentsev, V. K., & Turitsyn, S. K. (2014). Bit Error Rate Estimation Methods for QPSKCO-OFDM Transmission. *Journal of Lightwave Technology*, 32(17), 2951–2959.
- Luo, X. (2019). The application of OFDM in optical fiber communication systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 332, 042010. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/332/4/042010>
- Sheetal, A., Singh, H., & Kumar, A. (2014). Simulative Analysis of 10 Gb/s Coherent Detection Orthogonal Frequency Division Multiplexing Based Optical Communication System. *International Conference on Computing, Communication & Systems*, 242–246.
- Shieh, W., Bao, H., & Tang, Y. (2008). Coherent optical OFDM: Theory and design. *Optics Express*, 16(2), 841. <https://doi.org/10.1364/OE.16.000841>
- Zhang, H., Yu, Z., Shu, L., Wan, Z., Zhao, Y., & Xu, K. (2019). Fiber Nonlinearity Equalizer using MLP-ANN for Coherent Optical OFDM.

2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 1–3. <https://doi.org/10.1109/ICOON.2019.8934433>



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO** con C.C: # 120534543-0 autor del componente práctico del examen complejo: **Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem** 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, 18 de septiembre del 2020

f. _____

Nombre: VILELA PILACHANGA, ORLANDO WILFRIDO

C.C: 120534543-0



Presidencia
de la República
del Ecuador



Plan Nacional
de Ciencia, Tecnología,
Innovación y Saberes



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

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TÍTULO Y SUBTÍTULO:	Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem		
AUTOR(ES)	Vilela Pilachanga, Orlando Wilfrido		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Educación Técnica para el Desarrollo		
CARRERA:	Ingeniería en Telecomunicaciones		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero en Telecomunicaciones		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	18 de septiembre del 2020	No. DE PÁGINAS:	38
ÁREAS TEMÁTICAS:	Fundamentos de comunicación, comunicaciones inalámbricas		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Comunicaciones, Frecuencia, Fibra, Dispersión, Transmisión, Redes		
RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):			
<p>Recientemente se ha propuesto OFDM óptico coherente (CO-OFDM) y los experimentos de transmisión de prueba de concepto han demostrado su extrema robustez frente a la dispersión cromática y la dispersión del modo de polarización. De acuerdo con esta motivación de CO-OFDM en este trabajo se desarrolla el componente práctico del examen complejo denominado "Implementación de escenarios de simulación de sistemas OFDM ópticos coherentes sobre el entorno OptiSystem". En el capítulo 1, se introduce brevemente a las comunicaciones modernas, así como se define el objetivo general y se plantean los objetivos específicos. En el capítulo 2, se presenta la descripción teórica de los fundamentos de la tecnología de multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), de sistemas ópticos coherentes, y de las aplicaciones de la tecnología OFDM en las redes de acceso óptico. En el capítulo 3, se diseñan los escenarios de simulación del sistema OFDM óptico coherente y se discuten los resultados obtenidos.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593-9-91442258	E-mail: orlanditovil_96@hotmail.es	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE	Nombre: Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	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):			