

**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TÍTULO

Diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes
basados en modulación avanzada para redes de próxima generación

AUTOR

Quito Velasquez, Luis Alfredo

TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del grado académico en
MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES

TUTOR

Pazmiño Ortiz, Leandro Antonio

Santa Elena, Ecuador

Año 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

**Ing. Alicia Andrade Vera, Mgtr.
COORDINADORA DEL
PROGRAMA**

**Ing. Leandro Pazmiño Ortiz, Mgtr.
TUTOR**

**Ing. Daniel Jaramillo Chamba, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Ing. Luis Amaya Fariño, Mgtr.
DOCENTE
ESPECIALISTA**

**Abg. María Rivera González, MSc.
SECRETARIA GENERAL
UPSE**



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN

Certifico que luego de haber dirigido científica y técnicamente el desarrollo y estructura final del trabajo, este cumple y se ajusta a los estándares académicos, razón por el cual apruebo en todas sus partes el presente trabajo de titulación que fue realizado en su totalidad por QUITO VELASQUEZ LUIS ALFREDO como requerimiento para la obtención del título de Magíster en Telecomunicaciones.

TUTOR

Ing. Leandro Antonio Pazmiño Ortiz, Mgtr.

Santa Elena, 9 de abril de 2025



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, QUITO VELASQUEZ, LUIS ALFREDO

DECLARO QUE:

El trabajo de Titulación, Diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación previo a la obtención del título en 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 del Trabajo de Titulación referido.

Santa Elena, 9 de abril de 2025

EL AUTOR

Luis Alfredo Quito Velasquez



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
INSTITUTO DE POSTGRADO**

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Certifico que después de revisar el documento final del trabajo de titulación denominado Diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación, presentado por el estudiante, Luis Alfredo Quito Velasquez fue enviado al Sistema Antiplagio COMPILATIO, presentando un porcentaje de similitud correspondiente al 9%, por lo que se aprueba el trabajo para que continúe con el proceso de titulación.



TUTOR

Ing. Leandro Antonio Pazmiño Ortiz, Mgtr.



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA
DE SANTA ELENA
FACULTAD DE SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
INSTITUTO DE POSTGRADO**

AUTORIZACIÓN

Yo, QUITO VELASQUEZ LUIS ALFREDO

Autorizo a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible para su lectura consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales del proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo, además apruebo la reproducción de este proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Santa Elena, 9 de abril de 2025

EL AUTOR

Luis Alfredo Quito Velasquez

AGRADECIMIENTO

Este logro no había sido alcanzado sin la dirección de Dios y la inspiración de mi familia, que siempre confían en mí y que nunca han dejado de alentarme para alcanzar todos mis sueños y anhelos.

Quito Velasquez, Luis Alfredo

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia, ya que cada uno de ustedes forman parte de esta meta cumplida.

Quito Velasquez, Luis Alfredo

ÍNDICE GENERAL

TÍTULO	I
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN	III
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	IV
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	V
AUTORIZACIÓN.....	VI
AGRADECIMIENTO	VII
DEDICATORIA	VIII
ÍNDICE GENERAL	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento de la investigación	2
Formulación del problema de investigación.....	2
Objetivo General	3
Objetivos Específicos.....	3
Planteamiento hipotético	3
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	4
1.1. Componentes de un sistema de transmisión digital por Fibra Óptica	4
1.1.1. La fibra óptica como canal de comunicaciones.....	5
1.1.2. Módulo transmisor.....	9

1.1.3. Módulo receptor	12
1.2. Características inherentes en la fibra óptica	12
1.2.1. Atenuación.....	13
1.2.2. Dispersión cromática	14
1.3. Descripción general de los sistemas ópticos	15
1.3.1. Redes de área extensa (WAN).....	17
1.3.2. Redes de área metropolitanas (MAN).....	17
1.3.3. Redes de área local (LAN).	18
1.4. Comunicaciones ópticas coherentes	20
1.4.1. Panorama general de las comunicaciones ópticas coherentes.....	21
1.4.2. Capacidad del canal óptico coherentes.....	22
1.4.3. Impacto de los efectos no lineales	23
1.5. Modulación avanzada en comunicaciones ópticas	24
1.5.1. Principios de modulación avanzada en sistemas ópticos: PSK y QAM....	24
1.5.2. Técnicas de modulación coherente: DPSK y PSK coherente.....	26
1.6. Introducción a los entornos de simulación para comunicaciones ópticas.....	28
1.6.1. OptiSystem: entorno de simulación de comunicaciones ópticas robusta y fácil de usar.....	28
1.6.2. VPIphotonics: entorno de simulación avanzada para sistemas de comunicaciones ópticas	29
1.6.3. MatLab/Simulink: entorno de simulación versátil y configurable	30
1.6.4. Elección del entorno de simulación OptiSystem.....	31
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA.....	33
2.1. Contexto de la investigación	33
2.2. Diseño y alcance de la investigación	34

2.3. Tipo y métodos de investigación.....	35
2.4. Población y muestra.....	36
2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	36
2.6. Procesamiento de la evaluación: validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información	37
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
3.1. Simulación de una red óptica pasiva usando modulación avanzada	39
3.2. Simulación del sistema de transmisión óptico en la plataforma OptiSystem	39
3.3. Discusión de los resultados obtenidos en las simulaciones	43
3.3.1. Comparativa de técnicas de compensación	48
3.3.2. Análisis de la técnica de compensación electrónica.....	51
CONCLUSIONES	55
RECOMENDACIONES	57
REFERENCIAS	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Especificaciones de algunas fibras ópticas.....	8
Tabla 3.1: Parámetros utilizados en la simulación del transmisor QPSK-PDM.....	42
Tabla 3.2: Configuración de parámetros utilizados en el enlace óptico del sistema propuesto.....	42
Tabla 3.3: Parámetros de simulación de la fibra compensadora de dispersión (DCF)..	49
Tabla 3.4: Parámetros de simulación de la fibra compensadora de dispersión (DCF)..	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptica.....	4
Figura 1.2: Estructura de una fibra óptica	5
Figura 1.3: Haces de luz que entran en el límite del ángulo de aceptación A.....	6
Figura 1.4: Fibra multimodo (MMF) de índice escalonado	7
Figura 1.5: Fibra multimodo (MMF) de índice gradual.....	7
Figura 1.6: Fibra monomodo (SMF)	8
Figura 1.7: Fibra monomodo (SMF)	10
Figura 1.8: Esquemático del modulador Mach-Zehnder (MZM).....	11
Figura 1.9: Esquemático del modulador de electroabsorción de silicio.....	11
Figura 1.10: Esquemático típico de un receptor óptico.....	12
Figura 1.11: Atenuación espectral de la fibra de sílice puro	14
Figura 1.12: Dispersión cromática de la fibra óptica estándar y con dispersión desplazada	15
Figura 1.13: Redes ópticas WAN, MAN y Acceso/LAN	16
Figura 1.14: Arquitectura de una red óptica de área metropolitana	18
Figura 1.15: Arquitectura de una red óptica de área local.....	19
Figura 1.16: Representación esquemática de receptor óptico coherente.....	21
Figura 1.17: Efectos de la banda de guarda entre canales WDM. Izquierda: ganancia de capacidad por canal. Derecha: eficiencia espectral global.....	23
Figura 1.18: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.	25
Figura 1.19: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.	26
Figura 3.1: Diagrama esquemático del sistema óptico coherente PDM-QPSK.....	40
Figura 3.2: Diagrama esquemático del modulador IQ.	41

Figura 3.3: Señales de constelación en el (a) punto A; (b) punto B; (c) punto C; y (d) punto D.	42
Figura 3.4: Variación de potencia de la señal modulada en la componente en fase (I). 44	
Figura 3.5: Variación de potencia de la señal modulada en la componente en cuadratura (Q).....	45
Figura 3.6: Representación temporal de la señal eléctrica con un ciclo de trabajo del 30%.	45
Figura 3.7: Transmisión en amplitud y fase de la señal óptica QPSK con polarización X e Y.....	46
Figura 3.8: Espectro óptico del sistema de modulación QPSK.....	46
Figura 3.9: Factor de calidad (Q) frente al número de derivaciones usando el algoritmo CMA.	47
Figura 3.10: Diagramas de constelación de la señal recibida en polarización X (a) antes de DSP, (b) después de CMA, (c) después de estimación de fase.....	47
Figura 3.11: Comparativa de sensibilidad del receptor para diferentes formatos de modulación.....	49
Figura 3.12: Rendimiento del sistema para la métrica del Factor Q frente a la potencia P_{in} en las configuraciones ODC y EDC después de 1200 km.	50
Figura 3.13: Rendimiento del sistema para la métrica de la BER frente a la potencia P_{in} en las configuraciones ODC y EDC después de 1200 km.....	51
Figura 3.14: Rendimiento del sistema para la métrica Factor Q frente a la OSNR para configuración btb	52
Figura 3.15: Rendimiento del sistema para la métrica Factor Q frente a la OSNR (a) con y sin EDC y (b) cuando ambos utilizan EDC.	54

RESUMEN

Este proyecto de titulación se centra en el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en técnicas de modulación avanzada, orientados a satisfacer las crecientes demandas de las redes de próxima generación. La investigación aborda tanto los fundamentos teóricos de la transmisión óptica — incluyendo la evolución desde la modulación por intensidad hasta técnicas sofisticadas como QPSK, QAM y DPSK— como la implementación práctica de sistemas coherentes mediante algoritmos de procesamiento digital de señales (DSP). Con un enfoque experimental y cuantitativo, se desarrollaron simulaciones utilizando las herramientas OptiSystem y Matlab para evaluar parámetros críticos como la tasa de error de bits (BER), la relación señal/ruido óptico (OSNR) y el factor de calidad (Q). Los resultados obtenidos demuestran mejoras significativas en la eficiencia espectral, la calidad de la señal y la tolerancia a efectos no lineales, lo que respalda la viabilidad de los sistemas propuestos para aplicaciones en redes de alta capacidad. Además, se proponen recomendaciones para futuras investigaciones, orientadas a la integración de algoritmos de precompensación de fase y técnicas de inteligencia artificial, con el objetivo de optimizar aún más el rendimiento de estos sistemas.

Palabras claves: Modulación, PSK Coherente, DPSK

ABSTRACT

This project focuses on the design and analysis of coherent optical communication systems based on advanced modulation techniques, aimed at meeting the growing demands of next-generation networks. The research covers both the theoretical fundamentals of optical transmission—including the evolution from intensity modulation to sophisticated schemes such as QPSK, QAM, and DPSK—and the practical implementation of coherent systems through digital signal processing (DSP) algorithms. Employing an experimental and quantitative approach, simulations were developed using OptiSystem and Matlab to evaluate critical parameters such as bit error rate (BER), optical signal-to-noise ratio (OSNR), and quality factors (Q). The obtained results demonstrate significant improvements in spectral efficiency, signal quality, and tolerance to nonlinear effects, thereby supporting the viability of the proposed systems for high-capacity network applications. Furthermore, recommendations for future research are provided, focusing on the integration of phase pre-compensation algorithms and artificial intelligence techniques to further optimize system performance.

Keywords: Modulation, Coherent PSK, DPSK.

INTRODUCCIÓN

Los antecedentes de la investigación sobre sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación son fundamentales para comprender la importancia y relevancia de este campo de estudio. Estos antecedentes proporcionan el contexto histórico y científico necesario para comprender el desarrollo y la evolución de estos sistemas.

En los primeros sistemas de comunicaciones ópticas, se utilizaba como técnica la modulación mediante intensidad, a base de la emisión de un láser a través de la fibra óptica y su recepción por un detector (Franco A., 2023). No obstante, esta técnica tenía limitaciones en cuanto a la velocidad de transmisión y su eficacia de señal.

A medida que avanzaba la tecnología, se desarrollaron técnicas de modulación nuevas y más avanzadas, como la modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation, QAM) y la modulación de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK), capaces de mejorar la velocidad de la transmisión y optimizar la calidad de la señal de los sistemas de fibra óptica coherentes (Medeiros D., 2019). Todos estos avances establecieron las bases de las redes de transmisión óptica de nueva generación. Para ello, estos sistemas ofrecían importantes ventajas: mayor capacidad de transmisión, mayor tolerancia al ruido y mayor eficiencia espectral.

En la actualidad, se continúa investigando y desarrollando nuevas tecnologías y técnicas para mejorar aún más el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherente, tal como en (Gao et al., 2024; Jiang et al., 2024; Karar et al., 2023; Zhou et al., 2024). Se exploran nuevas formas de modulación, como la modulación de amplitud en cuadratura de orden superior (QAM de orden superior), en el trabajo de (Shi et al., 2024) permite alcanzar tasas de transmisión aún más altas.

Por otra parte, se han llevado a cabo investigaciones sobre el diseño de algoritmos de procesamiento digital de señales para compensar las distorsiones y efectos no lineales presentes en los comunicaciones ópticas coherentes (Xin et al., 2023). Gracias a dichos algoritmos se optimiza la calidad de la señal y maximiza la velocidad de transmisión.

En resumen, los sistemas de transmisión óptica coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación muestran el progreso y la evolución de esta área de estudio. Estos avances han permitido mejorar la capacidad de transmisión y la calidad de la señal en las redes de comunicación óptica, sentando las bases para el desarrollo de sistemas más eficientes y avanzados en el futuro.

Planteamiento de la investigación

El desarrollo de sistemas de comunicaciones ópticas más eficientes y avanzados es esencial para satisfacer las crecientes demandas de las redes de comunicación. Estos sistemas ofrecen una mayor capacidad de transmisión, mejor calidad de la señal, mayor eficiencia espectral, menor consumo de energía y compatibilidad con tecnologías futuras. Al invertir en la investigación y desarrollo de estos sistemas, se garantiza un futuro de redes de comunicación más rápidas, confiables y sostenibles.

Formulación del problema de investigación

La necesidad de diseñar sistemas de comunicaciones ópticas eficientes y avanzados para satisfacer las demandas de las redes futuras. El problema científico planteado se centra en el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación. El incremento de la demanda de ancho de banda proyectado, como por ejemplo ≥ 100 Gbps, ha establecido las bases para la próxima generación de redes de comunicación. Sin embargo, este aumento en la capacidad de transmisión plantea desafíos técnicos y científicos que deben abordarse. El propósito es desarrollar sistemas ópticos eficientes y avanzados que puedan satisfacer las demandas de las redes futuras. Esto implica investigar y aplicar tecnologías de modulación avanzada en comunicaciones ópticas, así como desarrollar modelos de simulación en OptiSystem o Matlab para analizar el rendimiento de los sistemas diseñados en diferentes escenarios de red. Al resolver este problema científico, se espera mejorar el desempeño de las redes de próxima generación, aumentando la capacidad de transmisión, mejorando la calidad de la señal y maximizando la eficiencia espectral.

Objetivo General

Diseñar y analizar sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para mejorar el desempeño de las redes de próxima generación.

Objetivos Específicos

1. Investigar las tecnologías de modulación avanzada en comunicaciones ópticas
2. Desarrollar un modelo de simulación en OptiSystem o Matlab para sistemas de comunicaciones ópticas coherentes.
3. Analizar el rendimiento de los sistemas diseñados en diferentes escenarios de red

Planteamiento hipotético

¿Es posible diseñar y analizar sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para mejorar el rendimiento de las redes de próxima generación?

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El presente capítulo establece las bases teóricas necesarias para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada, destacando su relevancia en redes de próxima generación.

1.1. Componentes de un sistema de transmisión digital por Fibra Óptica

En las últimas dos décadas, la fibra óptica ha sustituido al cable coaxial en la mayoría de las redes de telecomunicaciones, al menos cuando se trata de altas velocidades de transmisión de datos. Sin embargo, su aparición ha hecho preciso el diseño y desarrollo de nuevos componentes ópticos u optoelectrónicos de altas prestaciones. Aquí se describen los componentes de un sistema de transmisión digital por fibra óptica.

La arquitectura de un enlace sea cual sea el nivel de la red al que se destine, se compone de los mismos elementos básicos, es decir, un módulo de transmisión y uno de recepción, tal como se muestra en la Figura 1.1

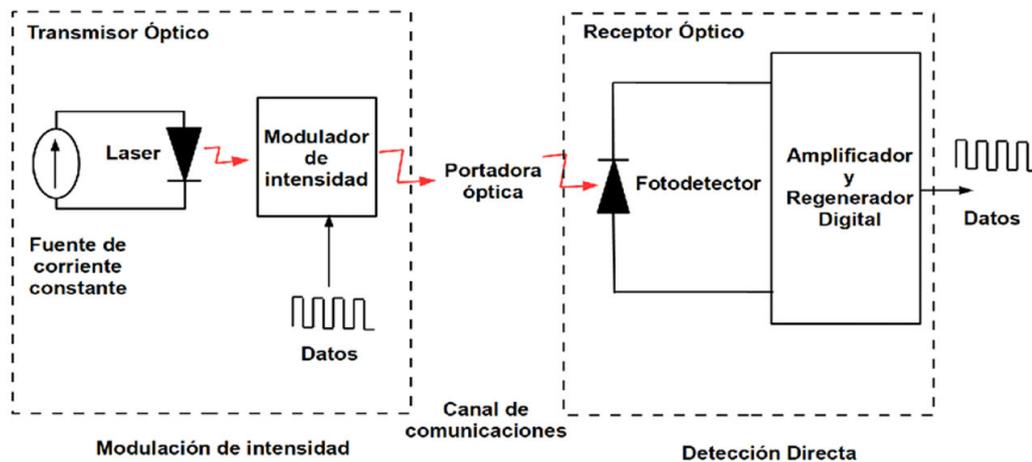


Figura 1.1: Diagrama de bloques de un sistema de comunicación óptica.

Fuente: (Dominguez Ratamoza et al., 2021)

En esta sección se describirá la función y el funcionamiento de cada uno de estos componentes de un enlace de fibra óptica. En primer lugar, la fibra óptica, componente principal ya que permite el transporte de la información y es fundamental para el desarrollo de los esfuerzos que se realizarán a continuación. A continuación, se describe el transmisor óptico (láser, driver, modulador, etc.), antes de pasar a los bloques que

componen el receptor óptico (fotodetector, amplificador eléctrico, filtro eléctrico, dispositivo de demodulación). Y, por último, se describen los componentes utilizados directamente en la red, como el amplificador EDFA, con el fin de mejorar la calidad de la señal transmitida o aumentar las distancias.

1.1.1. La fibra óptica como canal de comunicaciones

La fibra óptica se ha convertido rápidamente en un medio muy atractivo para las telecomunicaciones. Es un medio de transmisión cuyas numerosas ventajas justifican su introducción en los sistemas de transmisión, como se describe a continuación:

- Prestaciones de transmisión: atenuación muy baja, ancho de banda utilizable muy grande, posibilidad de multiplexación.
- Ventajas de implantación: Tamaño muy reducido, gran flexibilidad, poco peso.
- Seguridad eléctrica: Aislamiento total entre terminales, puede utilizarse en atmósferas explosivas o con tensiones elevadas.
- Seguridad electromagnética: Insensible a las interferencias y no las crea, prácticamente a prueba de manipulaciones.
- Ventaja económica: Menor coste que otros medios.

La fibra óptica, con su baja atenuación y alta eficiencia espectral, se posiciona como el medio ideal para satisfacer las crecientes demandas de ancho de banda en redes de próxima generación. Una fibra es una guía de ondas cilíndrica y dieléctrica. Está formada por dos dieléctricos que tienen el mismo eje, el núcleo y el revestimiento, y están recubiertos por una funda protectora (véase la Figura 1.2).

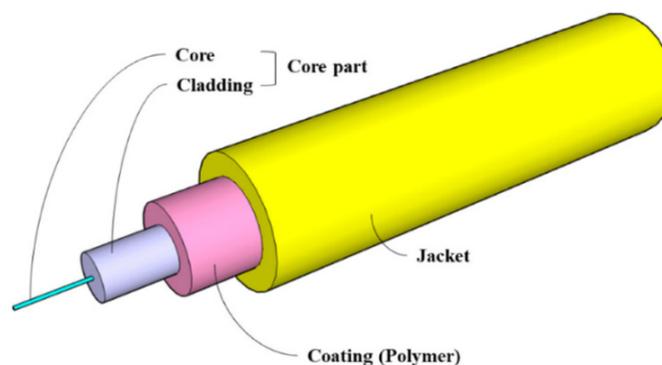


Figura 1.2: Estructura de una fibra óptica

Fuente: (Seo et al., 2021)

El guiado de la señal óptica se basa en la ley de Descartes. La luz se propaga a lo largo de la fibra mediante reflexiones sucesivas entre el núcleo y el revestimiento (véase la Figura 1.3). Esto sólo es posible si el núcleo y el revestimiento están hechos de materiales transparentes y el índice del revestimiento es inferior al del núcleo (basta con una diferencia mínima). La segunda condición es enviar la señal luminosa a la fibra con un ángulo respecto al eje inferior a la apertura numérica (AN). La apertura numérica A_N (ver ecuación Ec.1.1) representa la apertura angular límite antes de la transmisión y no la reflexión total respecto al dioptrio núcleo-revestimiento de la fibra.

$$A_N = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad \text{Ec.1.1}$$

La Figura 1.3 muestra el caso de los rayos de luz que entran en el límite del ángulo de aceptación A y el ángulo crítico i_c para la reflexión interna total (TIR) entre el núcleo y el revestimiento; los índices de refracción del medio externo, núcleo y revestimiento son n_0 , n_1 y n_2 , respectivamente, por lo que la TIR sólo es posible si $n_1 > n_2$. (Guerra R. et al., 2022)

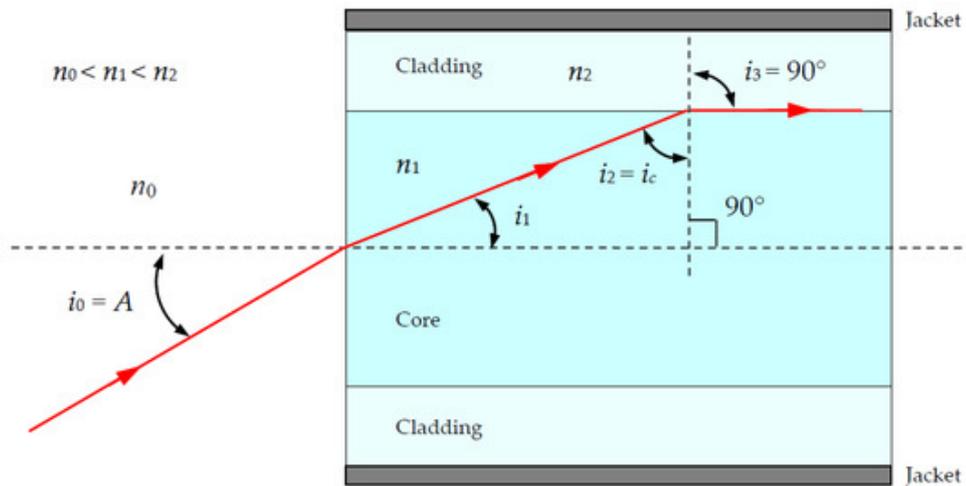


Figura 1.3: Haces de luz que entran en el límite del ángulo de aceptación A

Fuente: (Guerra R. et al., 2022)

La mayoría de las fibras se fabrican a base de sílice, un material abundante y de bajo costo. Para dar forma a los perfiles de índice, la sílice se dopa con dióxido de germanio o pentóxido de fósforo para aumentar el índice (más adecuado para el núcleo de la fibra) y con flúor o trióxido de boro para disminuirlo (más adecuado para el revestimiento).

Existen dos tipos de fibra:

- Fibra Multimodo (MMF): este tipo de fibra se utilizan preferentemente para redes de área local, para velocidades de datos bajas o para longitudes de onda cercanas a 850 nm. En una MMF, los diámetros de los dieléctricos son mayores que los de una SMF (núcleo $\phi_n \approx 50 \mu m$ y revestimiento $\phi_r \approx 125 \mu m$) y los haces de luz toman trayectorias diferentes y, por tanto, sus tiempos de propagación son diferentes. El resultado es una dispersión intermodal (véase la Figura 1.4) en el caso de una fibra multimodo (MMF) de índice escalonado. Para reducir este efecto, el perfil de índice del núcleo puede modificarse para crear un «índice gradual» en lugar de un salto de índice (el índice n_1 no es constante, sino que tiene simetría alrededor del eje) (véase la Figura 1.5). Esto permite reducir las diferencias de tiempo de propagación reduciendo los huecos entre las trayectorias ópticas.

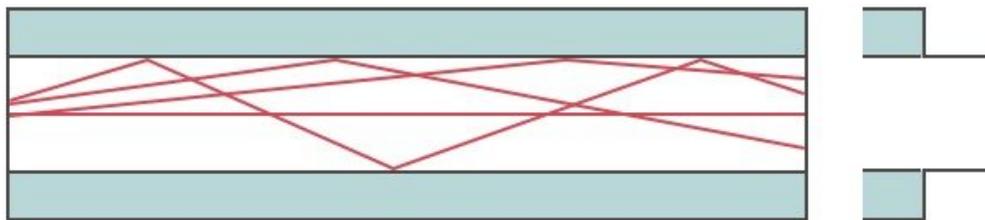


Figura 1.4: Fibra multimodo (MMF) de índice escalonado

Fuente: (Mohamed, 2021)

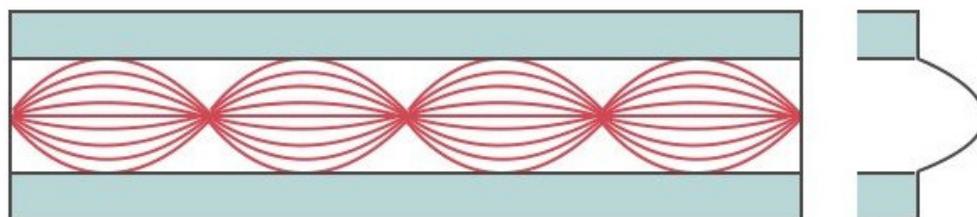


Figura 1.5: Fibra multimodo (MMF) de índice gradual

Fuente: (Mohamed, 2021)

- Fibra Monomodo (SMF): tienen un diámetro de núcleo más pequeño (generalmente de 8 a 10 micras). Dadas estas dimensiones, la fibra óptica monomodo clásica es de índice de refracción uniforme, tal como se observa en la Figura 1.6.



Figura 1.6: Fibra monomodo (SMF)

Fuente: (Mohamed, 2021)

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-T) ha introducido estándares internacionales para las fibras ópticas desplegadas en las redes de telecomunicaciones. En la Tabla 1.1 se muestran las especificaciones técnicas según las Recomendaciones G.650 a G.655 que cubren los parámetros geométricos, mecánicos y ópticos de las fibras y las tolerancias admisibles.

Tabla 1.1: Especificaciones de algunas fibras ópticas

Característica	Recomendación UIT-T			
	G.652	G.653	G.654	G.655
Tipo de fibra	SMF estándar	SMF de dispersión desplazada	SMF para largas distancias	SMF de dispersión no nula desplazada
Aplicación principal	WAN y MAN	WAN con WDM	Transmisión submarina y WAN	WAN con DWDM
Ancho de banda (nm)	1310 y 1550	1550	1550	1530 - 1625
Diámetro del núcleo (µm)	8-10	8-10	8-10	8-10
Diámetro geométrico de la fibra (µm)	125	125	125	125
Atenuación (dB/km)	0.35 (1310 nm), 0.22 (1550 nm)	0.22	0.19	0.22

Dispersión cromática (ps/nm/km)	3.5 (1310 nm)	~0 (1550 nm)	Baja dispersión < 2	2-6 (1550 nm)
Coefficiente de no linealidad (W/m²)	~2.6	~2.0	~1.5	~2.0
Sección transversal efectiva (μm²)	80	70-80	100-110	70-80
PMD (ps/qrt·km)	<0.2	<0.1	<0.1	<0.1

Fuente: (International Telecommunication Union (ITU-T), 2022)

Las principales características de las fibras ópticas son la atenuación, la dispersión cromática, la polarización y los efectos no lineales, que se describen en la sección 1.2.

1.1.2. Módulo transmisor

Dadas las propiedades de las fibras ópticas, es necesario trabajar en componentes micro-optoelectrónicos que permitan un uso óptimo. A finales de los años 60 se realizaron importantes avances en el campo del láser y se desplegaron las primeras redes de fibra óptica. La parte de transmisión de un enlace óptico está formada por varios componentes (LED o láser, modulador, convertidor). Su función es enviar una señal óptica al medio de transmisión, en el que se escriben los datos.

Diodo láser

Desde los inicios de las comunicaciones ópticas, los emisores semiconductores han sido la elección preferida como fuente óptica debido a su pequeño tamaño en comparación con el núcleo de la fibra óptica, la relativa facilidad con la que la luz emitida puede modularse directamente actuando sobre la corriente, su espectro óptico relativamente estrecho y su bajo consumo de energía.

El LD es la fuente más adecuada para las comunicaciones ópticas porque proporciona el acoplamiento óptico más eficaz con la fibra. La palabra láser significa Amplificación de la Luz por Emisión Estimulada de Radiación. Los diodos láser son esenciales en la modulación avanzada debido a su capacidad para generar señales ópticas

modulador que permite la modulación de la intensidad de la luz. Este método de modulación se emplea en aplicaciones en las que los requisitos de velocidad no son tan estrictos como en el caso de los moduladores electroópticos.

Existen varios tipos de moduladores de intensidad, en particular el modulador de Mach-Zehnder (ver Figura 1.8) y el modulador electroabsorbente (ver Figura 1.9).

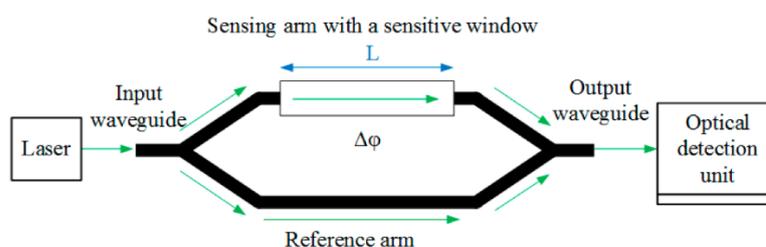


Figura 1.8: Esquemático del modulador Mach-Zehnder (MZM)

Fuente: (Yuan et al., 2015)

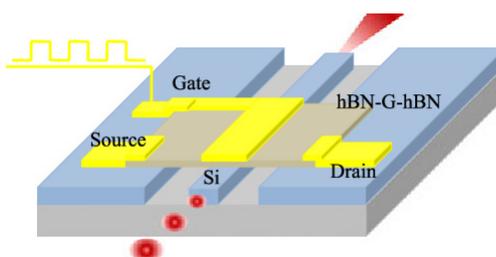


Figura 1.9: Esquemático del modulador de electroabsorción de silicio

Fuente: (Kim & Kim, 2016)

En el trabajo de Das et al., (2022) mostraron un novedoso concepto de dispositivo electro-óptico reconfigurable para el funcionamiento de la puerta lógica OR y Ex-OR basado en un resonador microring empleado en paralelo cargado en la estructura interferométrica Mach-Zehnder. Con esto consiguieron que la modulación ASK aumente con precisión y que la PSK sea igual al aumentar el número de resonadores microring cuando se somete a flujos de bits de información de señales eléctricas predeterminadas a una velocidad de datos de 10 Gbps.

Mientras que, Elkattan & Gad, (2024) presentaron el diseño de un nuevo conmutador de alta velocidad de silicio fotónico sin impacto que cumple las normas de multiplexación WDM en cuanto a ancho de banda de canal de 3 dB, rango espectral libre de canal, diafonía, factor de forma y dispersión. Este diseño combina las ventajas de dos

estructuras, un resonador anular compuesto y un modulador interferométrica Mach-Zehnder (MZI). Para ambos diseños, la velocidad de conmutación fue de 100 GHz.

1.1.3. Módulo receptor

Al igual que los módulos transmisores, los módulos receptores se han esforzado por ser cada vez más eficaces. La función del receptor es convertir la señal óptica en una señal eléctrica de la forma más eficaz posible. En el primer capítulo se acordó que la recepción se basaría en la técnica de detección directa. Este módulo se compone de varios bloques funcionales que consta de tres etapas, tal como se muestra en la Figura 1.10.

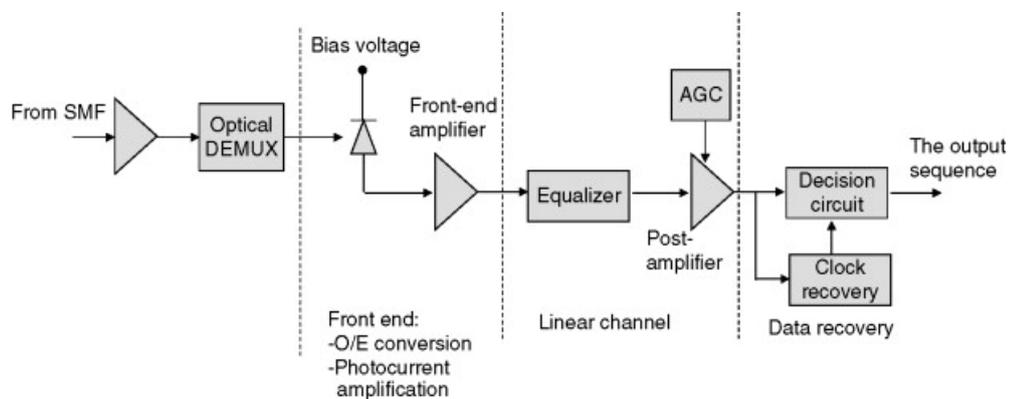


Figura 1.10: Esquemático típico de un receptor óptico.

Fuente: (Shieh & Djordjevic, 2010)

- Etapa 1: está compuesta por un fotodetector acompañado de un amplificador, cuya finalidad es hacer que la fotocorriente generada sea suficientemente fuerte a pesar de la débil señal óptica recibida o de la baja sensibilidad del fotodetector.
- Etapa 2: el bloque “canal lineal” está constituido por un amplificador eléctrico de alta ganancia y un ecualizador que se comporta como un filtro reductor de ruido.
- Etapa 3: el bloque «recuperación de datos» (última etapa del receptor) contiene un circuito de decisión y un circuito de recuperación también conocido como circuito de sincronización.

1.2. Características inherentes en la fibra óptica

En la transmisión de señales ópticas, hay una serie de características inherentes en las fibras ópticas. En este sentido, hay que señalar que la atenuación es una pérdida de

potencia de la señal a medida que la luz se propaga a través de la fibra, lo que suele producirse por dispersión y absorción. Por su parte, la dispersión cromática se debe al desplazamiento de las señales luminosas a velocidades diferentes, lo que causa el ensanchamiento de la señal y limita la transmisión de la señal.

Por su parte, la polarización se relaciona con el sentido del campo eléctrico emitido por el haz de luz, que modifica su orientación a medida que se propaga, provocando perturbaciones en la señal. En sistemas de largo alcance, la dispersión cromática puede causar ensanchamiento de la señal, lo que limita la velocidad de transmisión a menos que se utilicen fibras optimizadas o técnicas de compensación

Finalmente, cuando la potencia de la señal es alta, se dan efectos no lineales como la modulación de fase y la mezcla de cuatro ondas, capaces de degradar aún más la calidad de la señal. Para garantizar la eficacia y el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas es fundamental conocer y gestionar estas propiedades.

1.2.1. Atenuación

La atenuación en las fibras ópticas es el resultado de varios mecanismos. En primer lugar, la absorción intrínseca del material constitutivo provoca un aumento muy rápido de las pérdidas a bajas longitudes de onda. La presencia de impurezas también puede crear varias bandas de absorción. En el caso de la sílice pura, la atenuación mínima teórica debería descender a 0,14 dB/km en torno a $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$.

Además, las irregularidades estructurales involuntarias provocan pérdidas por dispersión (dispersión Rayleigh). También hay pérdidas debidas a las condiciones en que se utilizan las fibras. Cualquier curvatura demasiado cerrada genera pérdidas por radiación. Las microcurvaturas son curvaturas muy ligeras, pero repetidas y prácticamente incontrolables, debidas al acondicionamiento de las fibras en los cables. Estas pérdidas se suman directamente a las pérdidas intrínsecas.

Sin embargo, son insignificantes para las fibras estándar de telecomunicaciones en condiciones normales de uso. Por último, las fibras se utilizan siempre en tramos de longitud finita, conectados entre sí. Cada empalme puede provocar una pérdida de conexión. La Figura 1.11 muestra la atenuación espectral de una fibra de sílice para telecomunicaciones.

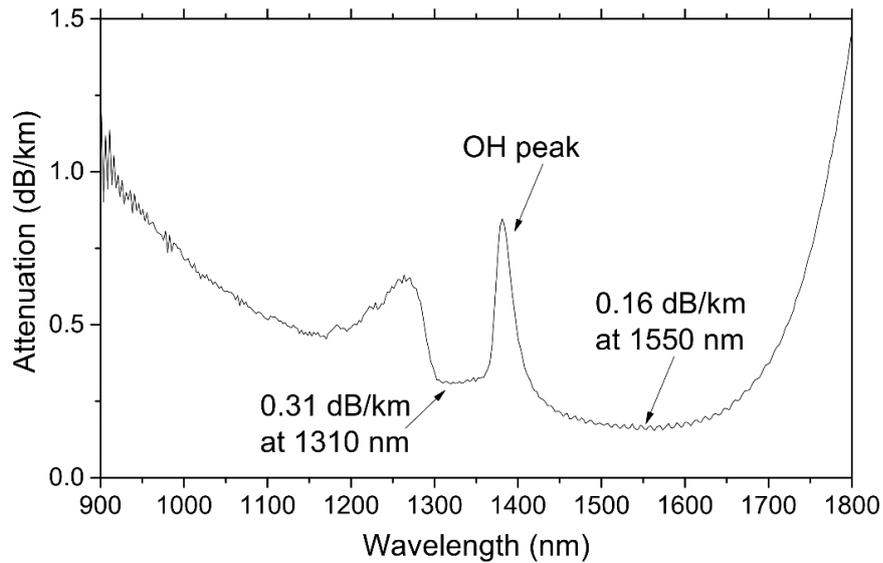


Figura 1.11: Atenuación espectral de la fibra de sílice puro

Fuente: (Morana et al., 2020)

La atenuación mínima de 0.22 dB/km no está muy lejos del mínimo teórico para la sílice. La diferencia puede explicarse por el hecho de que no puede utilizarse sílice pura. Hay que dopar el núcleo o el revestimiento, lo que aumenta las fluctuaciones de composición y, por tanto, las pérdidas por difusión.

1.2.2. Dispersión cromática

El tiempo de propagación en grupo, es decir, el tiempo que tarda una señal en recorrer la unidad de longitud, depende de la longitud de onda λ . En el caso de una señal procedente de una fuente que emite en una línea de anchura $\delta\lambda$, estos tiempos de propagación se extenderán a lo largo de una cierta duración. El parámetro de dispersión cromática (D) se define como la derivada del tiempo de propagación del grupo con respecto a la longitud de onda, para una longitud de fibra de 1 km. Generalmente se expresa en $ps/nm \cdot km$ $ps/(nm.km)$, correspondiendo los ps al ensanchamiento temporal, los nm a la anchura espectral y los km a la longitud de la fibra.

De hecho, la dispersión cromática es la suma de un término material puro (dispersión material) y un término debido a la guía de ondas (dispersión modal). La Figura 1.12 muestra la evolución con λ del término material para la sílice, mostrando que la fibra monomodo tiene una dispersión máxima de 18 $ps/(nm.km)$ a 1550 nm.

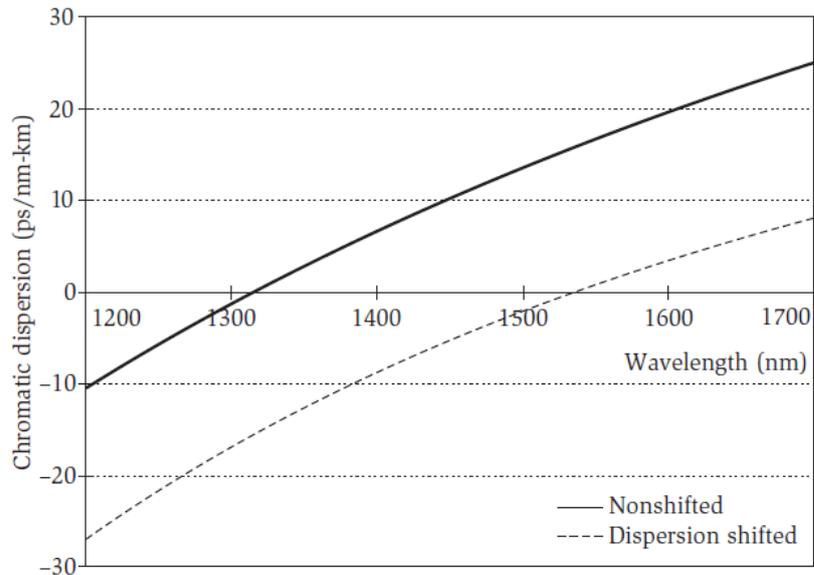


Figura 1.12: Dispersión cromática de la fibra óptica estándar y con dispersión desplazada

Fuente: (Large & Farmer, 2009)

Convencionalmente, se considera que es de 17 ps/(nm.km). En la banda de 1288 a 1359 nm, es de 3.5 ps/(nm.km). Esto significa que la capacidad de transmisión es la máxima posible para una longitud de onda de aproximadamente 1.3 μm . Por tanto, es ideal para esta ventana espectral y puede transportar velocidades de datos muy elevadas. Desgraciadamente, no es aquí donde la atenuación es menor (véase la Figura 1.11).

Por lo tanto, hemos intentado desplazar el punto de dispersión cero a 1550 nm. Este tipo de fibra, G.653, se denomina de dispersión desplazada, tal como se muestra en la Figura 1.12. También existen fibras con dispersión aplanada para las que la dispersión total sigue siendo muy baja, del orden de unos pocos ps/(nm.km), a lo largo de más de un centenar de nanómetros.

1.3. Descripción general de los sistemas ópticos

En la década de los 90's surgieron los primeros sistemas de comunicación óptica como resultado de muchos años de investigación en fibras con una atenuación compatible con los requisitos de una red de telecomunicaciones y, por otra parte, el desarrollo de componentes y dispositivos con prestaciones y fiabilidad suficientes. En la actualidad, se encuentran desplegados en todo el mundo, ya sea en tierra o sumergidos en el océano.

En Ecuador, la red óptica está distribuida por zonas en función de las necesidades en términos de capacidad, ancho de banda, alcance, entre otros. La Figura 1.13 muestra los tipos de redes ópticas, y que a continuación, se describen estos tipos de redes:

- Redes de área extensa (WAN): se trata de redes desplegadas por todo un país o continente, con centros urbanos muy grandes como nodos.
- Redes de área metropolitana (MAN): son redes instaladas en una gran ciudad o aglomeración urbana para conectar, por ejemplo, distintos barrios.
- Redes de área local (LAN): también llamadas redes de distribución o acceso. Son el último eslabón de la cadena, el que entrega la información al abonado. Por eso son más cortas y requieren menos capacidad.

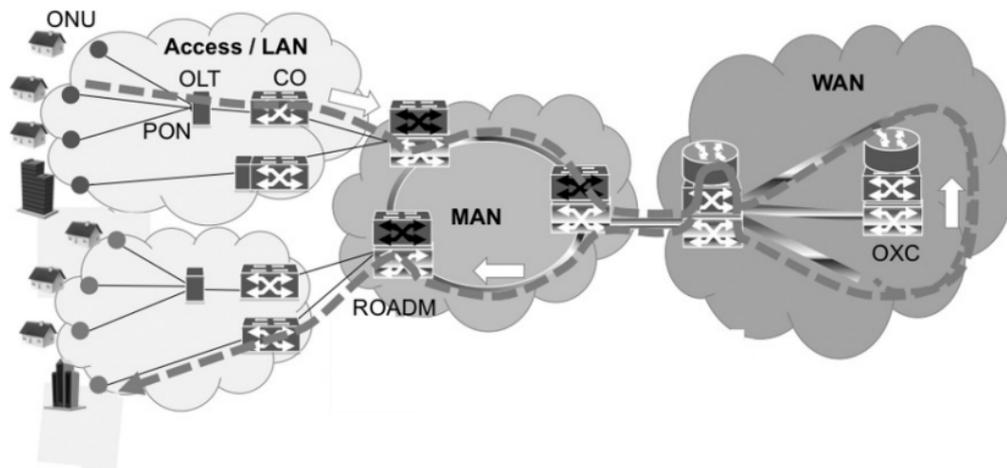


Figura 1.13: Redes ópticas WAN, MAN y Acceso/LAN

Fuente: (Kitayama, 2014)

El creciente aumento de la adopción de aplicaciones y servicios móviles habilitados para 5G en las redes de acceso y metropolitanas está empujando el tráfico IP mundial al rango de los zettabytes, lo que hace que los sistemas de comunicación óptica sean muy esenciales para soportar las crecientes demandas. En los sistemas de comunicación óptica, la mejora del rendimiento depende de cómo se exploten sistemáticamente dimensiones físicas como el tiempo, la frecuencia, la cuadratura, la polarización y el espacio para modular y multiplexar la luz. (Alimi et al., 2021)

Dependiendo de la naturaleza de la red en la que se encuentre, el sistema óptico puede diferir ligeramente. Por ello, en los párrafos siguientes describiremos brevemente las características de estos tres niveles de red.

1.3.1. Redes de área extensa (WAN)

Este componente de la red, también conocido como red troncal, corresponde a la capa principal de una red de telecomunicaciones (ver Figura 1.14). Está situada entre dos centrales de encaminamiento autónomas, cuya función es enrutar los datos de una zona a otra, es decir, de la zona del emisor a la zona del receptor. Estos datos se transmiten por fibra óptica con una longitud de onda de $1.55\mu\text{m}$ y a una tasa de transmisión que evoluciona de forma continua (ya están disponibles velocidades de 2.5 Gbps, 10 Gbps y 40 Gbps, y próximamente de 100 Gbps).

Pero esta capacidad no podría conseguirse sin integrar la fibra óptica en la red de transmisión. La fibra óptica ha permitido aumentar tanto la potencia como la distancia entre repetidores en comparación con los sistemas existentes, es decir, el cable coaxial (la distancia suele pasar de 2 a 100 km). De este modo, ha sido posible dar un salto significativo en la capacidad de los enlaces tras reemplazar los regeneradores electroópticos (fotodetección, amplificación eléctrica, reconversión óptica) por los amplificadores ópticos, que se instalan aproximadamente cada 100 km. La amplificación óptica ha mostrado que es posible transmitir señales de 5 y 10 Gbps a través de distancias transoceánicas sin repetidor (desde los años 1990). Las redes para enlaces de larga distancia son ahora exclusivamente ópticas.

1.3.2. Redes de área metropolitanas (MAN)

La red metropolitana, o también denominada red de comunicaciones de proximidad, es una red que ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años. Se encuentra desplegada entre la red de conmutación de larga distancia con enrutamiento autónomo y una zona más específica (urbanización, Campus universitario, pequeñas poblaciones, entre otros), y suele presentar un escenario de gran complejidad y diversidad. En general, cabe distinguir entre redes troncales metropolitanas y redes de acceso metropolitanas como se ilustra en la Figura 1.14.

Las MANs generalmente consisten en redes de anillos de 80 a 150 km de longitud y disponen entre 6 y 8 nodos. Las redes metropolitanas de acceso, por su parte, consisten en anillos de 10 a 40 km de periferia con 3 o 4 nodos y ramificaciones en lugares remotos. Sin embargo, éstas pueden variar considerablemente según el tipo de red o país. En

concreto, hay diferencias significativas entre regiones densamente pobladas, por ejemplo, los países europeos y asiáticos, se caracterizan por distancias más cortas, y las redes en EEUU, donde las aplicaciones metropolitanas se asemejan a una auténtica red regional.

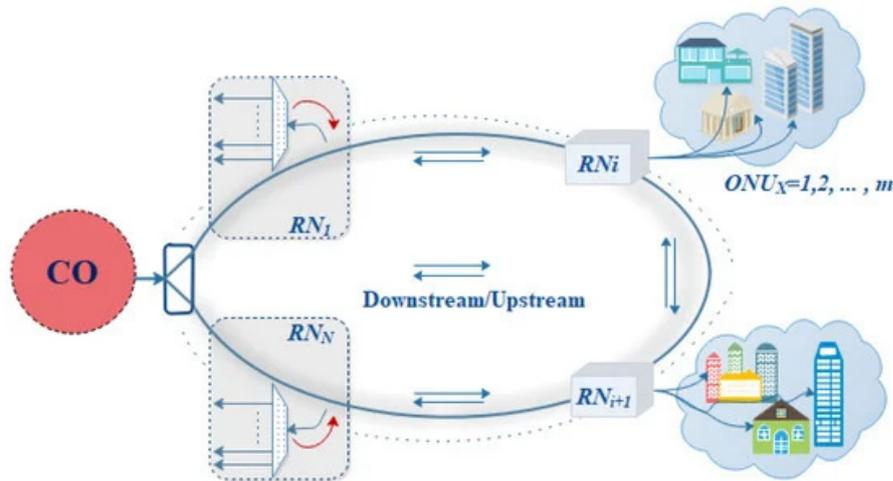


Figura 1.14: Arquitectura de una red óptica de área metropolitana

Fuente: (Ullah et al., 2024)

Las topologías lógicas de las redes metropolitanas son muy diferentes de las de las redes de larga distancia, que son esencialmente una sola línea troncal de punto a punto con, en el mejor de los casos, uno o dos multiplexores ópticos add-drop (OADM) para hacer que el tráfico se inserte y salga en la ruta. Las redes metropolitanas son una extensión de una infraestructura óptica con una alta conectividad. Generalmente, los anillos metropolitanos tienen cierto tráfico mallado con un grado de concentración debido a la conexión con la red de largo recorrido. En los anillos de acceso, por otro lado, el tráfico normalmente se recolecta de múltiples nodos y se concentra en un solo nodo que tiene una red troncal metropolitana.

1.3.3. Redes de área local (LAN).

Las redes de área local ópticas son una clase de red de área local (Local Area Network, LAN) que utiliza cables de fibra óptica para la transmisión de datos. En comparación con las redes de área local tradicionales que se enfocan en el uso de cables de cobre, existen una serie de ventajas al utilizar redes de área local ópticas debido a la naturaleza de la fibra óptica. La Figura 1.15 muestra la arquitectura básica de una red óptica de área local que toma el nombre de red óptica pasiva (PON).

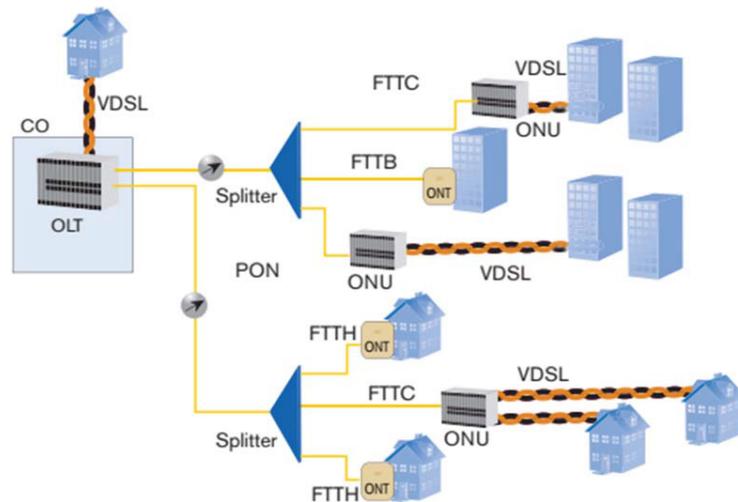


Figura 1.15: Arquitectura de una red óptica de área local

Fuente: (Hadjira et al., 2019)

Primero, la fibra óptica es rápida en transmisión de datos, un factor crítico en escenarios donde hay un intensivo uso de datos, como en un centro de datos o una organización que necesita una red confiable. En segundo lugar, las redes LAN ópticas son de mayor ancho de banda que las redes de cobre. Esto tiene la ventaja de que la red puede soportar muchas más terminales y usuarios sin que la tasa de datos sea una limitación.

Otra ventaja asociada con las LAN ópticas es que son resistentes a las interferencias electromagnéticas. Dado que la fibra óptica lleva información con luz en lugar de una señal eléctrica, será inmune a cualquier forma de radiación electromagnética que debilite las señales que pasan a través de cables de cobre, ofreciendo una señal fuerte y estable. La fibra óptica puede viajar grandes distancias sin atenuación de señal, y es así el medio de elección para tender redes a lo largo de grandes extensiones de terreno. Esto es increíblemente útil en el escenario de campus universitarios, parques industriales o grandes instalaciones empresariales.

Pero las redes LAN ópticas no vienen sin su parte de desventajas. La instalación de una LAN de fibra óptica cuesta más inicialmente porque la infraestructura y el equipo utilizados son caros, al igual que la mano de obra altamente capacitada que implementa la red. A largo plazo, los costos de operación pueden ser más bajos si se utilizan cables de fibra, ya que la fibra es fácil de mantenimiento y tiene una vida útil mayor. En términos simples, las LAN de fibra son un medio muy efectivo y eficiente para la transmisión de

datos en entornos hostiles; sin embargo, su implementación puede ser muy costosa en la parte inicial y debe hacerse con mucho pensamiento.

1.4. Comunicaciones ópticas coherentes

El término “coherente” se aplica generalmente a los sistemas de comunicación óptica que utilizan la fase de la señal óptica para codificar la información. Para acceder a esta fase en el receptor es necesario mezclar la señal con un oscilador de referencia en un interferómetro. Excepto en esquemas DPSK relativamente sencillos, esta referencia es un haz óptico independiente, que idealmente debe sintonizarse a la misma frecuencia portadora óptica que la señal, y ahí radica el problema.

Esta técnica se desarrolló en los años 80, pero con un objetivo distinto al de los sistemas actuales: el principal impedimento para la transmisión óptica en esa época fue la atenuación de la fibra óptica, y los receptores coherentes tienen mejor sensibilidad que los fotorreceptores, tanto para receptores ideales (OOK tiene una penalización de 3 dB en la relación señal/ruido (SNR) en comparación con BPSK), como para receptores ruidosos (amplificación inherente al proceso de mezcla).

Sin embargo, el requisito de sintonización era difícil de cumplir. Se trabajó en esquemas que utilizaban PLL ópticos o bloqueo por inyección, hasta que los EDFA sortearon el problema de la pérdida de fibra al permitir una fácil amplificación en línea de las señales transmitidas. La investigación sobre la transmisión coherente se pospuso hasta mediados de la década de 2000. Se empezaba a sentir la necesidad de una mayor eficiencia espectral, que las modulaciones PSK podían proporcionar, pero todavía no había una forma práctica de proporcionar un oscilador local coherente en el receptor.

Los sistemas ópticos coherentes, presentan algunas ventajas tanto en términos de mejora de la eficiencia espectral como el notable aumento de la relación señal a ruido (SNR) y el aumento sin precedentes de los niveles de capacidad de transmisión (Faruk et al., 2021; Jia & Campos, 2021; Nadal et al., 2024). Además, las comunicaciones ópticas coherentes en redes de próxima generación son utilizadas en redes de larga distancia, redes de área metropolitana, interconexiones de centros de datos y su significativa influencia en las redes de acceso que conectan a personas, comunidades y organizaciones con internet. (Gaiarin et al., 2021; Zhang & Jia, 2022; Zou et al., 2020)

1.4.1. Panorama general de las comunicaciones ópticas coherentes

La mayor parte de la complejidad de las comunicaciones ópticas coherentes reside en el receptor, cuyo principio se muestra en la Figura 1.16. La señal entrante se ilumina en dos polarizaciones; cada polarización se hace oscilar a una frecuencia óptica cercana a la de la señal (cientos de MHz), utilizando un acoplador óptico híbrido de 90°; las cuatro salidas de cada híbrido producen los componentes en fase y cuadratura codificados por intensidad (relativos al oscilador local) de la señal entrante, y son detectados por fotodetectores equilibrados. Las señales resultantes, que son productos cruzados de los campos eléctricos de la señal de entrada y oscilador local, también incorporan una amplificación proporcional a la amplitud del oscilador local.

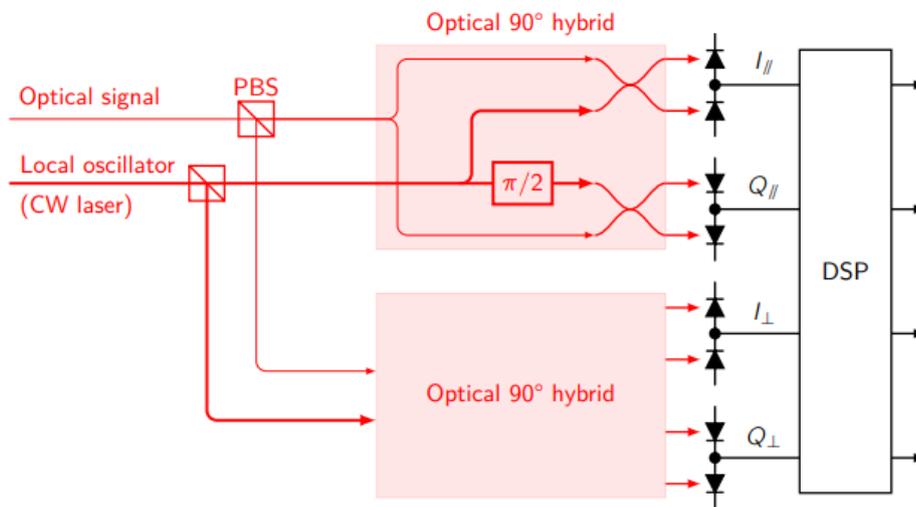


Figura 1.16: Representación esquemática de receptor óptico coherente

Fuente: (Hadjira et al., 2019)

A partir del esquemático de la Figura 1.15 se recupera toda la información originalmente presente en la señal. Aunque, no se codifica directamente en las salidas de los fotodetectores, porque los ejes de polarización del receptor y la frecuencia del oscilador local no son idénticos a los del emisor. Los símbolos de información originales se extraen mediante DSP, dependiendo del esquema de modulación.

En principio, cualquier esquema de modulación es utilizado con esta configuración. PolMux-QPSK es un esquema básico porque aprovecha los dos canales ortogonales que constituye la polarización óptica y, en cada polarización, los datos se modulan mediante QPSK. En el mundo de las comunicaciones digitales se sabe que

QPSK (al igual que BPSK) tiene el mejor rendimiento BER-vs-SNR en el canal gaussiano clásico.

Otro método de modulación interesante es la multiplexación por división ortogonal de frecuencias (OFDM). Esta técnica consiste, en principio, en difundir la información en varios canales de frecuencia, poco espaciados, con un intervalo de frecuencias igual a la inversa de la duración del símbolo, lo que garantiza la ortogonalidad. Puede implementarse directamente modulando las líneas espectrales de una frecuencia combinada (Yi et al., 2010) o generando una transformada discreta de Fourier inversa de los símbolos de datos que se van a transmitir (Vardanyan et al., 2024). Esta poderosa técnica es un desafío importante en investigadores de la comunidad de transmisión óptica, ya que los impedimentos de tipo dispersión CD y PMD se materializan como simples desplazamientos de fase entre canales, fácilmente manejados a través de un ecualizador lineal en DSP. Es decir, que, para una velocidad binaria dada, la difusión de la información por varios canales permite usar símbolos de mayor duración, que sufren menos el ensanchamiento inducido por la dispersión.

Además, DSP dispone de toda una gama de técnicas de comunicaciones digitales contra las deficiencias restantes: no sólo FEC, sino ecualización de canal, múltiple entrada-múltiple salida (MIMO) utilizando las dos polarizaciones (o incluso modos en una fibra multimodo) y codificación espacio-temporal.

1.4.2. Capacidad del canal óptico coherentes.

Como ya se ha dicho, el criterio con el que se mide el rendimiento de la transmisión es la capacidad de Shannon. Puede expresarse de forma equivalente en términos de información mutua entre emisor o receptor, o de velocidad máxima de datos que pueden transmitirse sin error, o con una probabilidad de error dada. Mientras que el canal óptico convencional con un fotorreceptor simple tiene una capacidad algo difícil de calcular, el canal óptico coherente lineal ideal está bien modelado por el canal clásico de ruido aditivo-blanco-Gaussiano (AWGN).

Los efectos de dispersión CD y PMD no afectan a la capacidad, ya que en teoría pueden compensarse exactamente con un filtro adaptado. Desgraciadamente, este panorama tan halagüeño se ve empañado por dos importantes deficiencias físicas: las no

linealidades ópticas de las fibras, sobre todo el efecto Kerr, y la PDL en los sistemas multitrayecto, que es un efecto lineal pero no unitario, por lo que afecta a la capacidad.

1.4.3. Impacto de los efectos no lineales

Los efectos no lineales pueden aprovecharse para realizar funciones interesantes, siguen siendo en gran medida una molestia en los sistemas de transmisión óptica, especialmente a altas potencias ópticas en largas distancias: aunque el aumento de potencia mejora la SNR, la distorsión no lineal y la diafonía también aumentan, lo que lleva a una potencia óptica óptima más allá de la cual el rendimiento del sistema se degrada. Peor aún, tanto las estimaciones numéricas como los modelos teóricos sugieren que la propia capacidad disminuye por encima de un determinado nivel de potencia; sin embargo, esto es dudoso y probablemente refleje particularidades de las tecnologías de transmisión más que una verdadera limitación teórico-informativa.

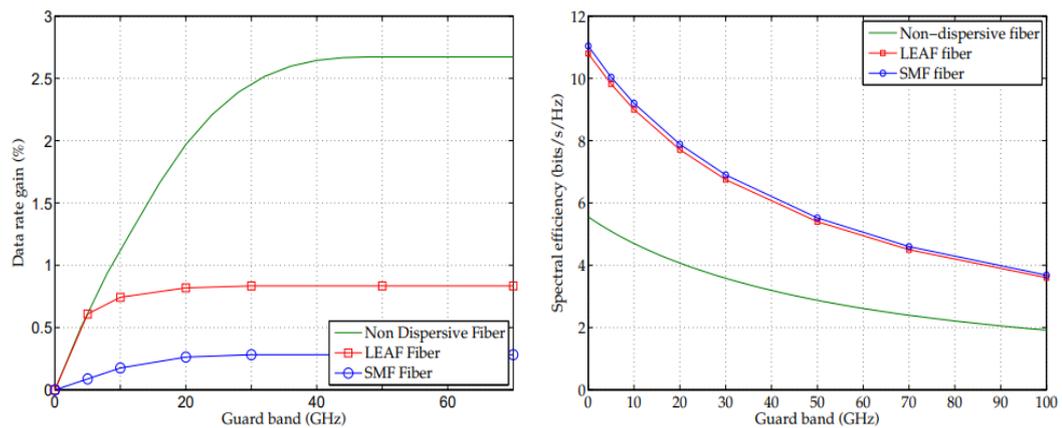


Figura 1.17: Efectos de la banda de guarda entre canales WDM. Izquierda: ganancia de capacidad por canal. Derecha: eficiencia espectral global

Fuente: (Hadjira et al., 2019)

Como se muestra en la Figura 1.17, la reducción de los efectos no lineales se traduce en un aumento de la capacidad por canal, pero no superior a unos pocos puntos porcentuales, incluso en el caso de la fibra no dispersiva, donde las no linealidades tienen el mayor impacto. Esto no compensa la pérdida de eficiencia espectral que supone el desperdicio de espectro.

1.5. Modulación avanzada en comunicaciones ópticas

En esta sección se describe la modulación avanzada en sistemas de comunicación ópticos. Además, se darán las bases de la modulación avanzada en sistemas ópticos, tales como la modulación por desplazamiento de fase cuadrática (QPSK), la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y la modulación por desplazamiento de fase (PSK). Las técnicas ofrecidas según (Misra et al., 2023; Sharma et al., 2020) son fundamentales para la mejora de la capacidad de transferencia de datos en redes ópticas de nueva generación y la descripción de su funcionamiento es importante para el modelado y análisis de sistemas ópticos de comunicación coherente.

Además de los principios de modulación avanzada, la sección 1.5.2 también trata sobre las técnicas de modulación coherente, como el Diferencial de Modulación por Desplazamiento de Fase (DPSK) y PSK coherente. Estas técnicas se utilizan para garantizar la coherencia de la señal transmitida, lo que a su vez permite la transmisión confiable y eficiente de datos en sistemas de comunicación óptica. Al investigar más a fondo estas técnicas, se puede obtener información valiosa sobre el funcionamiento interno de los sistemas de comunicación óptica coherente y sus aplicaciones en redes futuras que han sido abordados por (Li et al., 2024; Tabares G., 2021).

1.5.1. Principios de modulación avanzada en sistemas ópticos: PSK y QAM

En la modulación digital, los símbolos digitales se convierten en formas de onda compatibles con las características del canal. La modulación de paso de banda es un proceso por el que la señal de información se convierte en forma de onda sinusoidal para la modulación digital (Jain & Soni, 2019). La modulación/demodulación coherente y no coherente son los tipos básicos de modulación de paso de banda. La modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK), la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) y la modulación de amplitud en cuadratura (QAM) son formatos especializados de estas técnicas (Bala et al., 2021). El uso de QAM en sistemas ópticos coherentes permite aumentar significativamente la capacidad de las redes de próxima generación, optimizando el uso del espectro disponible.

En un canal ideal, la señal transmitida desde el transmisor atraviesa el canal hasta llegar al receptor, donde se demodula para obtener una representación perfecta de la señal

original. Sin embargo, en la realidad la señal recibida consiste en una mezcla de versiones atenuadas y reflejadas de la señal transmitida. Además, el canal añade varios tipos de ruido a la señal. Esto afecta a la tasa de bits erróneos del sistema.

BPSK: En BPSK, la portadora recibe un desplazamiento de fase de 0 para el bit “1” o 180° para el bit “0” correspondiente a dos niveles de tensión diferentes de la señal moduladora binaria, tal como se muestra en la Figura 1.18. Si la senoide es de amplitud A , tiene una potencia $P_s = \frac{1}{2}A^2$, de modo que $A = \sqrt{2P_s}$. La señal transmitida viene dada por las ecuaciones Ec. 1.2 y Ec. 1.3:

$$v_{BPSK}(t) = b(t)\sqrt{2P_s} \cos \omega_0 t \quad \text{Ec. 1.2}$$

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad \text{Ec. 1.3}$$

Donde $b(t)$ es un flujo de dígitos binarios con niveles de tensión.

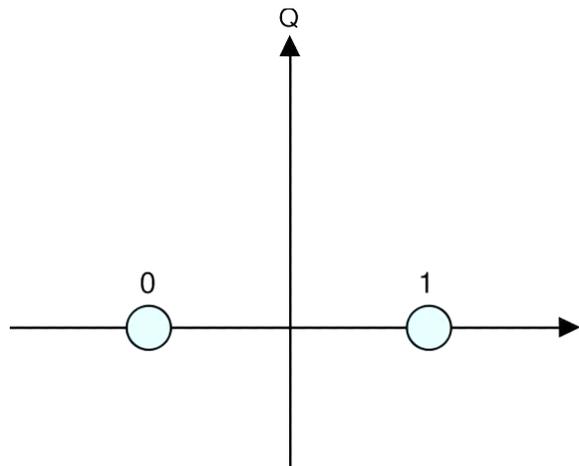


Figura 1.18: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.

Fuente: (Bohra & Bora, 2014)

QPSK: Cuando un dato se transmite mediante la técnica BPSK, el ancho de banda del canal necesario es de $2f_b$. La técnica QPSK reduce ese ancho de banda a f_b . Se trata de una modulación de fase multinivel. En ella, dos bits sucesivos de un flujo de bits se combinan para formar un mensaje y cada mensaje se representa por un valor distinto de desplazamiento de fase de una portadora., tal como se muestra en la Figura 1.19. La señal QPSK se representa por las ecuaciones Ec. 1.4 y Ec. 1.5 :

$$v_{QPSK}(t) = b(t)\sqrt{2P_s} \cos \left[\omega_0 t + (2m + 1) \frac{\pi}{4} \right] \dots \dots m = 0, 1, 2, 3 \quad \text{Ec. 1.4}$$

$$P_e = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad \text{Ec. 1.5}$$

Dado que hay 4 fases, se denomina 4-PSK o QPSK.

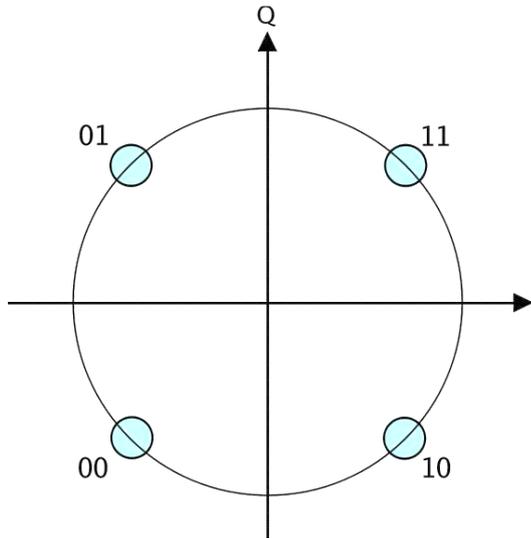


Figura 1.19: Diagrama de constelación de la modulación BPSK.

Fuente: (Bohra & Bora, 2014)

QAM: mejora la inmunidad al ruido del sistema al permitir que los vectores de señal difieran, no sólo en fase, sino también en amplitud. QAM utiliza el desplazamiento de fase de la portadora y detección síncrona para permitir que dos señales DSB ortogonales entre sí ocupen la misma banda de frecuencias, y definidas por la ecuación Ec.1 .6.

$$P_e = 2 \left(1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) \frac{1}{2} \text{erfc} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \quad \text{Ec.1 .6}$$

En conclusión, mientras que QPSK es robusta ante el ruido, QAM ofrece una mayor eficiencia espectral, lo que la hace ideal para aplicaciones de alta capacidad.

1.5.2. Técnicas de modulación coherente: DPSK y PSK coherente.

Las técnicas de modulación digital coherente son aquellas que emplean la detección coherente. En la detección coherente, la portadora local generada en el receptor

está bloqueada en fase con la portadora del transmisor. Así, la detección se realiza correlacionando la señal ruidosa recibida y la portadora generada localmente. La detección coherente es una detección síncrona. La ventaja de este tipo de sistemas es que resultan más sencillos. Pero el inconveniente de este tipo de sistema es que aumenta la probabilidad de error.

DPSK: es una modificación de BPSK que elimina la ambigüedad sobre si los datos demodulados están o no invertidos. Es un tipo de detección no coherente. El término codificación diferencial se refiere a la codificación de los datos diferencialmente, es decir, la presencia de 1 o 0 binario se manifiesta por la similitud o diferencia del símbolo cuando se compara con el símbolo precedente. La ecuación Ec.1.7 se usa para calcular la potencia:

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}} \quad \text{Ec.1.7}$$

PSK coherente: la modulación por desplazamiento de fase coherente (PSK) es una técnica de modulación que se utiliza en los sistemas de comunicación digitales por su eficacia y robustez en entornos ruidosos. La detección coherente implica utilizar una señal de referencia sincronizada en fase y frecuencia con la señal portadora para decodificar de forma exacta la información transmitida. En PSK coherente, la ecuación Ec.1 8 representa la señal modulada:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \varphi_k) \dots \dots k = 0, 1, \dots, M - 1 \quad \text{Ec.1 8}$$

Donde E_b es la energía por bit, T_b es la duración del bit, f_c es la frecuencia portadora, y $\varphi_k = \frac{2\pi k}{M}$ representa la fase correspondiente al k -ésimo símbolo. Para M -ary PSK, las fases se distribuyen uniformemente sobre 2π para maximizar la separación entre símbolos y minimizar la probabilidad de error.

La probabilidad de error de símbolo, P_e , depende del número de símbolos (M) y de la relación señal-ruido (E_b/N_0) en un canal de Ruido Blanco Gaussiano Aditivo (AWGN). Para $M > 2$, P_e viene dado por:

$$P_e = 2Q \left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \right] \quad \text{Ec.1.9}$$

La técnica PSK coherente se emplea en comunicaciones por satélite, redes ópticas y sistemas móviles debido a su robustez. Pero el requisito de detección coherente aumenta

la complejidad del receptor y la sensibilidad al ruido de fase, por lo que se precisan técnicas avanzadas de procesamiento de señales para la sincronización. (Elamassie & Uysal, 2023)

Los conceptos presentados acerca de las comunicaciones ópticas coherentes, la modulación avanzada (incluyendo QPSK-PDM y 0.3RZ-QPSK) y las bases de las redes de próxima generación constituyen el sustento teórico que explica tanto el comportamiento físico como las limitaciones y potencialidades de los sistemas ópticos actuales. Estos fundamentos, respaldados por la literatura reciente, justifican la necesidad de un análisis experimental y de simulación riguroso. Con ello, se establece la transición hacia el siguiente capítulo, en el cual se detallará la metodología experimental que permitirá evaluar de manera precisa el desempeño de los sistemas propuestos mediante herramientas como OptiSystem y Matlab.

1.6. Introducción a los entornos de simulación para comunicaciones ópticas

En las infraestructuras actuales de comunicaciones basadas en fibra óptica de alta capacidad, las redes ópticas pasivas (PON) resultan fundamentales en la prestación de servicios de banda ancha a través de la fibra hasta el hogar (Fiber To The Home, FTTH) y otras aplicaciones. Para diseñar y optimizar con precisión el rendimiento y la fiabilidad de las redes PON, es necesario utilizar entornos de simulación avanzados.

Dichas herramientas permiten a investigadores e ingenieros realizar simulaciones de escenarios PON, así como analizar canales de datos y evaluar el impacto de los distintos diseños en el rendimiento de la red. En esta sección se analizan las principales herramientas de simulación de redes ópticas de próxima generación, se las compara y se discute la decisión de elegir OptiSystem como el mejor software, además de destacar las ventajas de utilizar MATLAB o Python en la visualización y posterior análisis de los resultados obtenidos en la simulación.

1.6.1. OptiSystem: entorno de simulación de comunicaciones ópticas robusta y fácil de usar

OptiSystem, una herramienta de diseño y simulación de redes ópticas creada por Optiwave, que incluye configuraciones PON. Además, es compatible con una amplia

gama de arquitecturas PON, por ejemplo, PON basadas en multiplexación por división de longitud de onda (WDM-PON), PON basadas en multiplexación por división de tiempo (TDM-PON) y PON basada en la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM-PON), y dispone de una extensa librería de componentes y herramientas de análisis avanzadas.

Los usuarios de OptiSystem son capaces de calcular las métricas de rendimiento, tales como, la relación señal/ruido óptico (OSNR), la tasa de bits erróneos (BER) y los presupuestos de potencia, que son fundamentales para validar el diseño de la red y garantizar un alto rendimiento (Optiwave, 2020). OptiSystem resulta muy práctico debido a su interfaz gráfica de fácil manejo, lo que lo convierte en accesible para investigadores e ingenieros con diferentes niveles de experiencia. La configuración de arrastrar y soltar permite simplificar considerablemente los diseños de redes complejas, y la amplia información y asistencia técnica aumentan su facilidad de uso.

Además, la versatilidad de OptiSystem para soportar diversas configuraciones de redes ópticas permite a los investigadores realizar simulaciones con resultados precisos. Otra ventaja principal es que extrae datos en formatos compatibles con MATLAB o Python, lo que facilita a los investigadores su posterior visualización o análisis. Por ejemplo, una vez realizada la simulación de una PON, los datos obtenidos se exportan y visualizan en Python mediante librerías como Matplotlib, o MatLab de modo que los investigadores puedan generar gráficas personalizadas de los resultados obtenidos (Ahmed, 2018).

1.6.2. VPIphotonics: entorno de simulación avanzada para sistemas de comunicaciones ópticas

VPIphotonics es una plataforma integral para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas, incluyendo a las PONs. El entorno de simulación VPIphotonics, conocida por sus numerosas herramientas y funciones avanzadas, resulta especialmente útil para analizar nuevos esquemas de modulación y estudiar las no linealidades de la fibra y los efectos de la dispersión. Además, su versatilidad lo hace ideal para aplicaciones de investigación, ya que permite a los investigadores incorporar algoritmos

personalizados y explorar tecnologías PON propias, como nuevas técnicas de corrección de errores o configuraciones de multiplexación (VPIphotonics, 2021).

Por otro lado, VPIphotonics tiene una interfaz más compleja que OptiSystem, lo que implica una curva de aprendizaje más pronunciada. Esta complejidad puede representar un reto para estudiantes de pregrado que no tengan amplios conocimientos en simulación de redes ópticas e inclusive profesionales que realizan estudios de posgrado. Aunque sí permite opciones de exportación, la integración de los datos de VPIphotonics con otros programas, tales como, Python o MATLAB requieren de pasos adicionales, debido a que VPIphotonics no prioriza la compatibilidad de uso fácil con plataformas generales de análisis de datos. Así, esto lo hace menos flexible para investigadores que dependen en gran medida de Python o MATLAB para la visualización de datos (Tervonen, 2019).

1.6.3. MatLab/Simulink: entorno de simulación versátil y configurable

MatLab en combinación con Simulink, se utilizan con frecuencia en simulaciones de redes ópticas, aunque no estén diseñados específicamente para este tipo de redes. La gran capacidad de adaptación de MatLab y sus amplias librerías permiten simular elementos de redes ópticas, tales como, láseres, moduladores y receptores, utilizando funciones o secuencias de comandos personalizadas. Para investigadores con experiencia en MatLab, esta plataforma ofrece la posibilidad de simular flujos de tráfico de datos, evaluar el rendimiento y analizar datos en tiempo real (MathWorks, 2022).

En simulaciones de PONs, MATLAB es una herramienta práctica por su gran versatilidad a la hora de manipular y visualizar datos. Además, puede generar una amplia gama de gráficos y visualizaciones, como la relación entre la amplitud de la señal y la distancia o las tasas de error de bits, facilitando así el análisis de conjuntos de datos complejos generados durante las simulaciones. Si bien las ilustraciones de MATLAB se pueden personalizar en gran medida, la limitación del software radica en su incompatibilidad nativa con los componentes ópticos físicos y no lineales, que resultan esenciales para el análisis en profundidad de las redes ópticas.

En consecuencia, MATLAB es capaz de proporcionar información sobre el comportamiento de alto nivel de la red, pero sin la precisión necesaria para el análisis detallado de los componentes ópticos. Ahora bien, esta limitación puede superarse en

cierta medida gracias a su compatibilidad con los datos de OptiSystem y VPIphotonics (Xia, 2020).

1.6.4. Elección del entorno de simulación OptiSystem

OptiSystem se presenta como la opción idónea para la simulación de las PON por varias razones. Entre ellas, su completa librería de componentes, sus módulos especializados en PON y su fácil manejo, que lo convierten en la solución idónea tanto para el ámbito de la investigación académica como del diseño profesional de redes.

1. Funciones especializadas de PON: a diferencia de MatLab o Python, que necesitan una personalización adicional para simular redes ópticas, OptiSystem fue creado específicamente pensando en las comunicaciones ópticas. De este modo, se ahorra tiempo, puesto que los investigadores no necesitan crear nuevos modelos ni programar elementos de red manualmente. Además, OptiSystem también es compatible con arquitecturas PON avanzadas, de modo que es ideal para estudios avanzados sobre TDM-PON, WDM-PON y otras variantes (Optiwave, 2020).
2. Compatibilidad de análisis de datos con MatLab y Python: entre las ventajas de OptiSystem está la capacidad de exportar datos en formatos analizables con MatLab o Python. MatLab proporciona trazados robustos para visualizaciones altamente personalizables, que incluyen curvas de pérdida de señal y gráficos de distribución de potencia. Por otro lado, las librerías de código abierto de Python permiten una amplia gama de opciones para el procesamiento y la visualización de datos. Así, por ejemplo, las librerías Matplotlib y Pandas de Python permiten crear gráficos detallados de BER o histogramas de rendimiento, lo que permite un análisis más profundo de los resultados de la simulación (Ahmed, 2018).
3. Instrumentos de análisis integrados: OptiSystem dispone de instrumentos de análisis integrados, tales como, analizadores de BER y estimadores de OSNR, lo que hace más sencillo evaluar el rendimiento de la red de forma directa desde el entorno de simulación. Estos instrumentos de análisis permiten evaluar con rapidez las modificaciones de diseño y asegurar que las redes cumplen determinadas normas de calidad y fiabilidad. En el caso de que investigadores o ingenieros prefieran una manipulación más exhaustiva de los datos, la exportación

a MATLAB o Python hace posible un análisis más profundo sin comprometer la precisión de la simulación inicial (Xia, 2020).

4. Relación coste-eficacia para investigaciones integrales: aunque el uso de OptiSystem conlleva costes de licencia, en muchos casos permite prescindir de varios entornos de simulación, ya que cubre tanto las necesidades de simulación física como de nivel de red. Cuando se necesita una visualización de datos adicional o análisis personalizado, Matlab o Python complementan a OptiSystem sin aumentar significativamente el coste total del proyecto (Tervonen, 2019).

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

Partiendo de los sólidos fundamentos teóricos expuestos en el Capítulo 1, este capítulo describe la metodología empleada para el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada. La investigación se llevará a cabo en CNT EP – Guayaquil, aprovechando la infraestructura tecnológica disponible. Mediante experimentos controlados y simulaciones cuantitativas, se evaluarán parámetros críticos tales como la tasa de error de bits (BER), la relación señal/ruido óptico (OSNR) y el factor de calidad (Q). Este enfoque experimental, de carácter cuantitativo y respaldado por un análisis estadístico riguroso, permitirá validar la hipótesis planteada y aportar evidencia empírica para la mejora de las redes de próxima generación.

2.1. Contexto de la investigación

En el contexto de la investigación propuesta sobre el diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación, se llevarán a cabo escenarios de simulación de modulaciones en sistemas ópticos coherentes. Estos escenarios permitirán evaluar el rendimiento de diferentes técnicas de modulación avanzada en entornos de red simulados, lo que ayudará a comprender el comportamiento de la red bajo diferentes condiciones y configuraciones.

En cuanto a la ubicación y entorno donde se realizará la investigación, se ha establecido que será en CNT EP – Guayaquil. En este contexto, se utilizarán herramientas de simulación como OptiSystem y Matlab para llevar a cabo las simulaciones de los sistemas de comunicaciones ópticas propuestos. Estas herramientas de simulación son ampliamente utilizadas en el campo de las comunicaciones ópticas para modelar, simular y analizar el comportamiento de sistemas complejos de manera precisa y eficiente.

La elección de CNT EP – Guayaquil como ubicación para la investigación proporciona un entorno propicio para el desarrollo de este estudio, considerando el acceso a recursos tecnológicos y la infraestructura necesaria para llevar a cabo las simulaciones con herramientas como OptiSystem y Matlab. Además, la ubicación estratégica de Guayaquil como un importante centro urbano y tecnológico en Ecuador ofrece un entorno

dinámico que favorece la investigación en el campo de las comunicaciones ópticas y las tecnologías de red.

2.2. Diseño y alcance de la investigación

Con relación al "Diseño y Alcance de la Investigación" para el tema propuesto de "Diseño y análisis de sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada para redes de próxima generación", se describe lo siguiente:

- Tipo de investigación: la investigación se enmarca como experimental, lo que implica que se llevarán a cabo experimentos controlados para estudiar y analizar el comportamiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes con modulación avanzada en condiciones específicas.
- Alcance analítico: se realizará un análisis detallado de los resultados experimentales obtenidos, examinando las diferentes variables y parámetros involucrados en los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes con modulación avanzada. Se buscará identificar patrones, tendencias y relaciones significativas en los datos recopilados.
- Alcance explicativo: se buscará explicar de manera fundamentada y detallada cómo las técnicas de modulación avanzada afectan el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes. Se analizarán los resultados experimentales para comprender mejor el impacto de estas técnicas en el contexto de las redes de próxima generación.

Este enfoque experimental con alcances analíticos y explicativos permitirá obtener datos empíricos y evidencia sólida sobre el desempeño de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en modulación avanzada, contribuyendo a la generación de conocimiento en este campo y a la mejora de la tecnología óptica para el futuro.

2.3. Tipo y métodos de investigación

Tipo de investigación: la investigación se define como cuantitativa, lo que implica que se recopilarán datos numéricos y se aplicarán técnicas estadísticas para analizar y obtener conclusiones objetivas sobre el tema de estudio.

- Experimentación controlada: se llevarán a cabo experimentos en un entorno controlado para evaluar el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes con diferentes técnicas de modulación avanzada. Se registrarán datos cuantitativos sobre la eficiencia, la capacidad y la calidad de la comunicación en cada escenario.
- Análisis estadístico: se aplicarán métodos estadísticos para analizar los datos recopilados durante los experimentos. Se utilizarán pruebas de significancia, análisis de varianza y otras técnicas estadísticas para interpretar los resultados y validar las hipótesis planteadas en la investigación.
- Modelado y simulación: se emplearán herramientas de simulación como OptiSystem o MatLab para modelar y simular el comportamiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes con modulación avanzada. Estas simulaciones proporcionarán datos cuantitativos que complementarán los resultados experimentales.

El enfoque cuantitativo de la investigación, junto con la experimentación controlada, el análisis estadístico y el modelado mediante simulación, permitirá obtener información precisa y objetiva sobre el impacto de las técnicas de modulación avanzada en los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes, contribuyendo a un mayor entendimiento y desarrollo de tecnologías de comunicación óptica más eficientes y avanzadas para el futuro.

- Inductivo: Útil al analizar datos experimentales para identificar tendencias y patrones en el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes con modulación avanzada.
- Deductivo: Útil para probar hipótesis específicas sobre cómo las técnicas de modulación avanzada afectan el rendimiento de los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes.

- Hipotético-deductivo: Adecuado para plantear hipótesis sobre el impacto de la modulación avanzada en la eficiencia de las redes de comunicación óptica y luego validarlas a través de experimentos controlados.

Los métodos deductivo e hipotético-deductivo permiten establecer hipótesis específicas sobre el impacto de la modulación avanzada en los sistemas de comunicaciones ópticas coherentes y validarlas a través de experimentos controlados. Además, el enfoque inductivo podría ser útil para identificar patrones y tendencias en los datos recopilados durante la investigación experimental.

2.4. Población y muestra

En el presente trabajo, se trata de una población que abarca las posibles configuraciones y escenarios de comunicaciones ópticas coherentes basadas en técnicas de modulación avanzadas para redes de próxima generación. El análisis de cada configuración es poco práctico a causa de la complejidad y disponibilidad de recursos, y por tanto el estudio se basa en muestras bien seleccionadas que presentan las principales configuraciones que podrían desplegarse en redes ópticas reales.

Las muestras son configuraciones con técnicas de modulación, circuitos de tratamiento de la señal y condiciones de transmisión diferentes. Estas configuraciones se han seleccionado porque ofrecen criterios de rendimiento que abarcan un espectro amplio, por ejemplo, la relación señal/ruido, la eficiencia espectral y la distancia de transmisión.

A través de la simulación y del análisis de esta muestra, se extraen conclusiones relevantes sobre una población más extensa de sistemas ópticos avanzados al margen de tener que probar todas las variantes posibles. De este modo, el estudio resulta práctico y detallado, pues se centra en los escenarios que tienen un mayor impacto sobre las redes de nueva generación.

2.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para este estudio, se han empleado herramientas de simulación como principal método de recopilación de datos. Las herramientas OptiSystem y MATLAB permiten probar diferentes configuraciones de modulación avanzada en sistemas ópticos en

condiciones controladas y dinámicas. Utilizando estas plataformas, se pudieron simular situaciones reales, permitiendo analizar el rendimiento de diferentes sistemas sin necesidad de hardware físico.

Las simulaciones se enfocaron desde la perspectiva de la práctica, sobre todo en la calidad de la señal, las tasas de error y la estabilidad de la transmisión, para cubrir las necesidades de la práctica: realizar diferentes simulaciones, para lograr resultados que sean consistentes, y se permitan hacer comparaciones con diferentes configuraciones de diferentes sistemas. Por su parte, estas herramientas fueron tomadas por su confiabilidad, cuando se abordaron en la indagación de las comunicaciones ópticas, para que en adelante se tengan múltiples escenarios y poder y demás información precisa y clara.

Con el fin de normalizar la información que había sido recolectada a partir del desarrollo de cada simulación, se reiteró que la tarea de la simulación se realizará varias veces y en cada caso se variaban las condiciones para evaluar en qué medida el sistema era resistente. Se evitó en consecuencia la creación de escenarios que se consideraron extremos pero que a la vez eran provocados por el uso de modulación óptica.

2.6. Procesamiento de la evaluación: validez y confiabilidad de los instrumentos aplicados para el levantamiento de información

La excusa de la validez de los instrumentos usados en esta investigación, en este caso OptiSystem y MATLAB, es muy simple. Dado que estas herramientas son conocidas y se utilizan ampliamente en el campo de las comunicaciones ópticas. Estas herramientas se usan ampliamente tanto en la esfera académica como en la industrial porque son capaces de simular con precisión las condiciones de transmisión que existen en el mundo real. Para nosotros, la validez significa que los datos obtenidos de estas simulaciones no difieren significativamente de lo que se esperaría en el rendimiento de una red óptica física que emplea otras técnicas de modulación avanzadas. Configurar cada simulación a las condiciones probables de la red permite además la relevancia del resultado y su aplicabilidad a situaciones de la vida real.

Por otro lado, la fiabilidad se mantuvo efectivamente al adherirse a un protocolo de simulación consistente a través de las diferentes pruebas. Cada configuración fue sometida a varias pruebas con el objetivo de reforzar la exhaustividad de los resultados y

se investigaron las anomalías para determinar que no fueran la consecuencia de errores de configuración de la simulación. Tal repetibilidad asegura que los datos recolectados son consistentes, por lo tanto, pueden ser replicados en estudios con parámetros similares.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos a través de simulaciones realizadas con OptiSystem y Matlab, que han permitido evaluar el comportamiento de los sistemas ópticos propuestos en diferentes escenarios. Partiendo de la metodología descrita, se analizaron configuraciones de modulación avanzada y estrategias de compensación (tanto óptica como electrónica). A continuación, se presenta una discusión detallada de los resultados, vinculándolos con los conceptos teóricos y destacando tanto los logros alcanzados como las limitaciones detectadas en el estudio.

3.1. Simulación de una red óptica pasiva usando modulación avanzada

En este apartado se realizan simulaciones numéricas para un sistema óptico coherente basados en la modulación por desplazamiento de fase cuaternaria (QPSK) con multiplexación por división de polarización (PDM) con diferentes técnicas de compensación en el dominio eléctrico y óptico para validar la tolerancia de los filtros digitales de compensación de dispersión cromática (CD). Al mismo tiempo, dado que la señal transmitida está influenciada por la CD que produce el ensanchamiento temporal, también se utilizan diferentes formas de pulso para obtener la compensación óptima de CD más robusta en el sistema coherente elegido. Basándonos en esta configuración, también se analizaron los componentes del transmisor QPSK-PDM estándar, el canal óptico y el receptor coherente.

3.2. Simulación del sistema de transmisión óptico en la plataforma OptiSystem

La simulación numérica del sistema de transmisión óptica se realiza en dos etapas. En primer lugar, se calcula paso a paso el estado de la señal óptica a lo largo del sistema, considerando los diferentes efectos de propagación que actúan sobre la señal para obtener su estado final en el receptor. De este modo, es posible visualizar el comportamiento y la influencia de cada operación. En segundo lugar, para estimar el rendimiento de la transmisión se calculan criterios de calidad de la señal como Tasa de Error de Bits (Bit Error Rate, BER), factor Q y la relación señal/ruido óptico (Optical Signal to Noise Rate, OSNR). Además, el sistema evalúa la tasa de error de bits en función de la relación señal/ruido óptico empleando el método de recuento de errores de Montecarlo. En la

Figura 3.1 se presenta el diseño del sistema utilizando los componentes necesarios para implementar el sistema.

Esta sección está organizada del siguiente modo: primero, se describe la configuración de la simulación y la descripción del sistema. Se introducen los dos métodos de compensación de CD. A continuación, se presenta los resultados obtenidos. Por último, se extraen algunas conclusiones. Los análisis numéricos se simulan utilizando las plataformas OptiSystem y MatLab. OptiSystem es un paquete de software de simulación de sistemas de comunicaciones ópticas para el diseño, prueba y optimización de prácticamente cualquier tipo de enlace óptico en la capa física de un amplio espectro de redes ópticas, desde sistemas analógicos de difusión de vídeo hasta muy larga distancia (submarinos).

OptiSystem sirve para una amplia gama de aplicaciones, desde diseñar redes CATV/WDM, de anillos SONET/SDH hasta diseñar transmisores y estaciones, pasando por diseñar canales, amplificadores y receptores. La Figura 3.1 muestra la configuración del sistema óptico coherente utilizando la modulación QPSK-PDM. Junto al transmisor, los datos son generados por cuatro generadores de secuencias de bits pseudoaleatorios (PRBS) de longitud Nbit. A continuación, el generador de señales transforma las series de bits en símbolos y las convierte en formas de impulsos. La señal del láser de onda continua (CW Laser) se divide primero en dos canales mediante un acoplador de 3 dB.

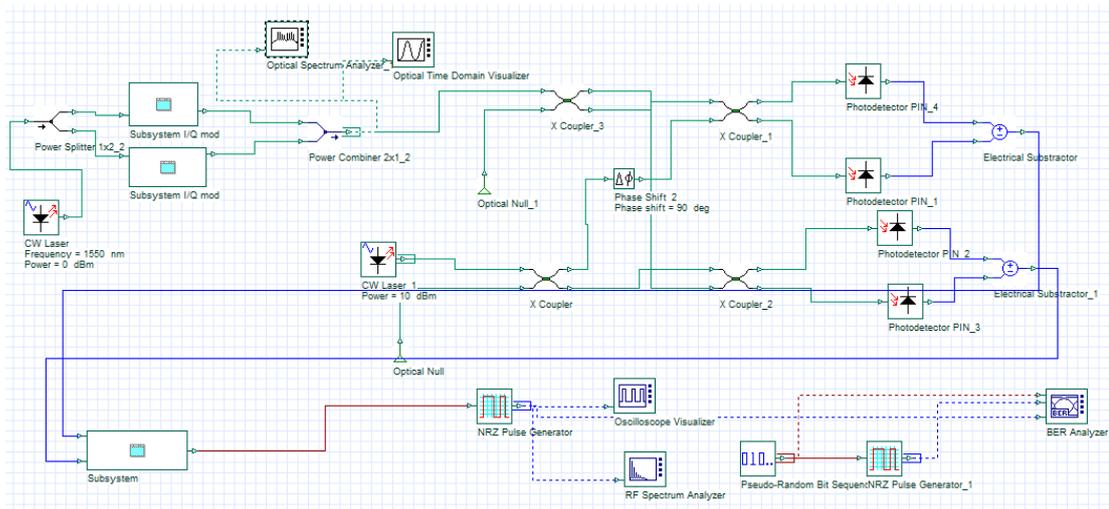


Figura 3.1: Diagrama esquemático del sistema óptico coherente PDM-QPSK

Fuente: Autor

En la Figura 3.2 se observa que cada canal es modulado QPSK mediante el uso de dos moduladores Mach-Zehnder (MZM), codificados por los datos eléctricos (las

secuencias I y Q) a 28 Gbaudios. Cada uno de los dos moduladores IQ paralelos recibe la mitad de la potencia del láser. Se aplica un desplazamiento de fase de $\pi/2$ a la señal modulada en el canal de la secuencia Q, lo que justifica el término Cuadratura para designar esta secuencia. Las señales de los dos canales interfieren entre sí, dando lugar a la señal QPSK en el puerto constructivo. Según el método presentado, la señal QPSK tiene niveles de fase de $\pi/4$, $3\pi/4$, $-3\pi/4$ y $-\pi/4$, pero los diferenciales entre sus distintos niveles son siempre múltiplos de $\pi/2$. La intensidad de la señal QPSK permanece constante en el tiempo, excepto en las transiciones de fase, donde se observan disminuciones de intensidad.

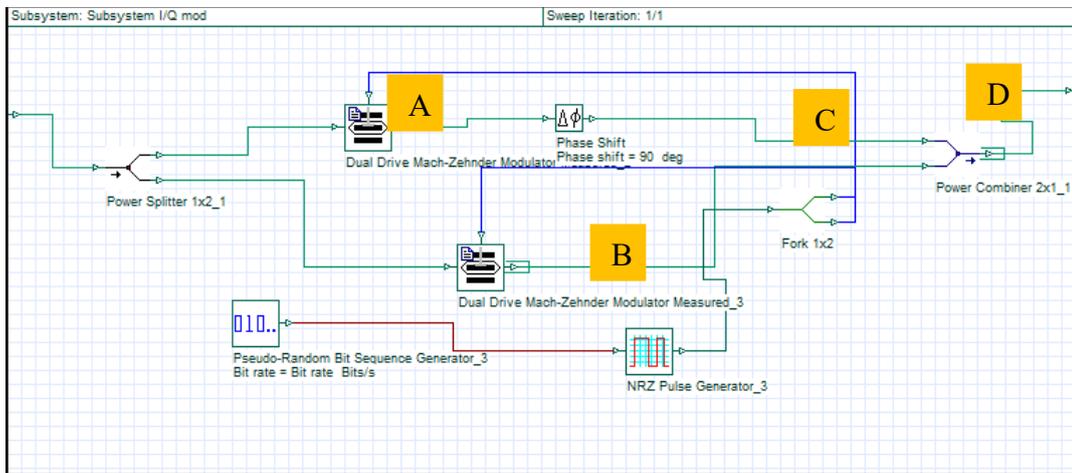


Figura 3.2: Diagrama esquemático del modulador IQ.

Fuente: Autor

El modulador MZ se caracteriza por su función de transferencia que se describe, en su forma ideal, por la ecuación Ec.3 1:

$$E_s = \sqrt{2}E_e \left(E_I + E_Q e^{i\left(\frac{\pi}{2} + V_{Bias}\right)} \right) \quad \text{Ec.3 1}$$

donde, E_s es el campo óptico a la salida del modulador con E_e representando la entrada de la envolvente del campo eléctrico complejo. E_I y E_Q son el campo eléctrico en fase y en cuadratura de los dos ramales del MZM, por lo tanto, $V_{Bias} = 0$ y $V_{\pi} = 1$. A continuación, estas dos señales QPSK ortogonales se combinan con el mezclador de haces de polarización (PBC) para formar la señal óptica QPSK-PDM (punto D de la Figura 3.2 que se propaga por el canal. En la Figura 3.3 se muestran los diagramas de constelaciones en los puntos A, B, C y D que se observan en la Figura 3.2. La Tabla 3.1 muestra los parámetros de simulación del sistema propuesto.

Tabla 3.1: Parámetros utilizados en la simulación del transmisor QPSK-PDM.

Técnica de modulación	QPSK- PDM
R_{bit} (Gbps)	112
R_{sim} (Gbaudios)	28
N_{bit}	2^{12}
Muestras/bit	64
Número de muestras	262114
Longitud de onda (λ) [nm]	1550

Fuente: Autor

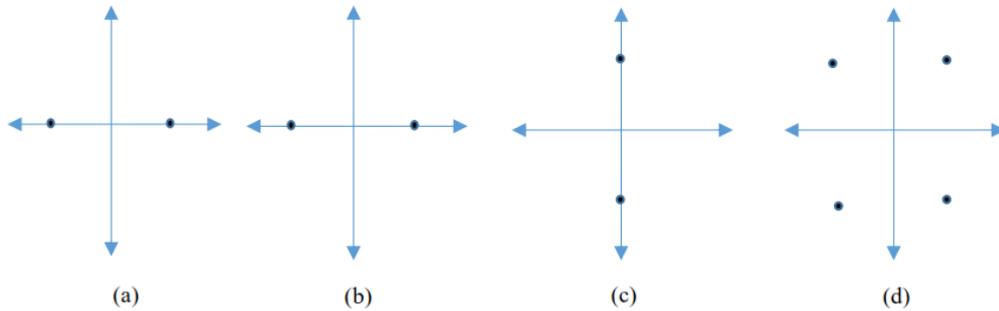


Figura 3.3: Señales de constelación en el (a) punto A; (b) punto B; (c) punto C; y (d) punto D.

Fuente: Autor

Para la transmisión se usó fibra monomodo (SMF) (ver características en la Tabla 3.2) y posteriormente el amplificador óptico EDFA para eliminar las pérdidas acumuladas en la línea con valores de ganancia y ruido de 15 y 5 dB, respectivamente. La dispersión del modo de polarización y el ruido de fase también son considerados con excepción de los efectos no lineales que no son necesarios. Después, se añade un filtro óptico con ancho de banda $B_0 = 2R_{sim}$ para cancelar el ruido de emisión espontánea amplificada (ASE).

Tabla 3.2: Configuración de parámetros utilizados en el enlace óptico del sistema propuesto.

Parámetros	SSMF
Longitud (L) [km]	75
Atenuación (α) [dB/km]	0.2
Dispersión cromática (D) [ps/nm/km]	16.75
Pendiente de la dispersión (s)	0.08
Área efectiva de la sección (A_{eff}) [μm^2]	80
Índice de refracción no lineal (n_2) [m^2/W]	2.21×10^{-20}
Coefficiente de no linealidad (γ) [$\text{W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$]	1.31

Fuente: Autor

En el receptor, las señales ópticas recibidas y la señal de onda continua (CW) de un oscilador local se dividen coherentemente y se mezclan en dos ramas polarizadas ortogonalmente mediante un divisor de haces polarizados (Polarization Beam Splitter, PBS). Las señales son detectadas y convertidas por fotodiodos (Photo-Diodes, PDs) para generar cuatro señales eléctricas. Estas señales son procesadas por un filtro de paso bajo de Bessel de orden 5 con un ancho de banda de 3dB, que representa 0.75 veces la velocidad de modulación (R_{sim}) para la supresión de interferencias.

A continuación, el convertidor analógico-digital (Analog to Digital Converter, ADC) muestrea las señales entrantes de forma sincrónica mediante dos muestras por símbolo con una resolución efectiva de 4 bits. La velocidad de muestreo es de 56 GSym/s. A continuación, las señales digitalizadas se procesan mediante la unidad de procesamiento digital de señales (Digital Signal Processing, DSP) para compensar la degradación y recuperar los datos.

La compensación electrónica de la dispersión se implementó mediante un ecualizador en el dominio de la frecuencia, mientras que el algoritmo de módulo constante con un número de taps igual a 3 se utilizó como solución de demultiplexación de la polarización (véase la Figura 3.8). Como paso final, la fase se estima utilizando un algoritmo Viterbi-Viterbi, seguido de un bloque de decisión y la evaluación de la BER.

Para todos los resultados que se presentan en este documento, se desprecia el ruido del fotodiodo porque predomina el ruido ASE. El método Monte-Carlo se utilizó en primer lugar para estimar el rendimiento del sistema a través de la BER con al menos 400 errores contados y, a continuación, esta tasa se convierte en el factor de calidad Q^2 mediante la ecuación Ec.3 2

$$Q = 20 \log_{10}[\sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}(2 \cdot BER)] \quad \text{Ec.3 2}$$

donde, erfc es la función de error.

3.3. Discusión de los resultados obtenidos en las simulaciones

En esta sección se presentan y discuten los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas para seguir las sucesivas transformaciones de la señal durante su propagación. Las simulaciones numéricas se realizaron para un sistema de transmisión coherente utilizando la modulación en cuadratura de fase con pulsos de retorno a cero al

30% y multiplexadas por división de polarización (también conocida como 0.3RZ-PDM-QPSK) a una tasa de 112 Gbps.

El término “0.3RZ” significa un formato de señal de retorno a cero (RZ) con un ciclo de trabajo del 30%. Es decir, que cada pulso de la señal sólo se activa durante el 30% del tiempo asignado a cada bit, permitiendo que la señal “regrese a cero” en cada periodo de bit. Este tipo de configuración no es un estándar en sí, sino una opción de diseño para hacer frente a problemas de transmisión específicos, por ejemplo, minimizar la dispersión cromática y los efectos no lineales en largas distancias. La optimización del pulso hace que esta configuración RZ se utilice con frecuencia en diseños avanzados de redes ópticas.

Las señales eléctricas se visualizan en forma de respuesta temporal. La secuencia binaria inicial se separa en dos subsecuencias moduladas con una cuarta parte de la velocidad binaria 28 Gbaudios ($112/4=28$ Gbaudios). Estas subsecuencias (I/Q) se muestran en las Figura 3.4 y Figura 3.5

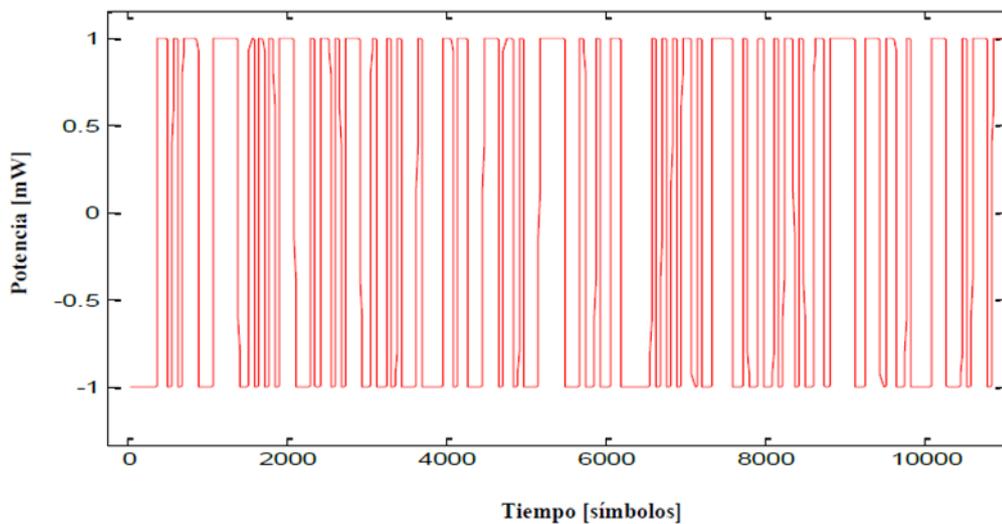


Figura 3.4: Variación de potencia de la señal modulada en la componente en fase (I).
Elaborado por: Autor

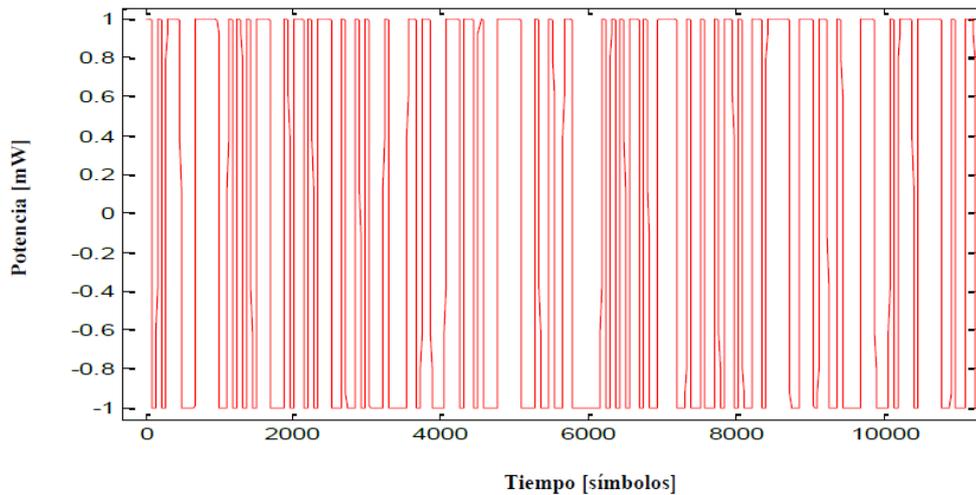


Figura 3.5: Variación de potencia de la señal modulada en la componente en cuadratura (Q)
Elaborado por: Autor

En la Figura 3.6 se observa la representación temporal de la señal eléctrica, lo que supone la emisión de impulsos de retorno a cero con un ciclo de trabajo igual a 0.3.

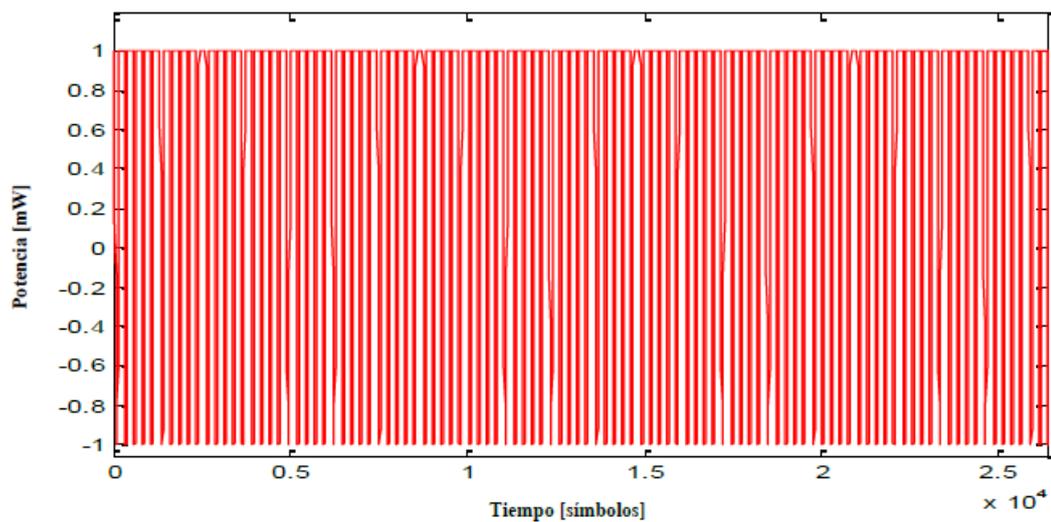


Figura 3.6: Representación temporal de la señal eléctrica con un ciclo de trabajo del 30%.
Elaborado por: Autor

En la Figura 3.7 se observa la evolución temporal de la amplitud y fase de la señal óptica QPSK transmitida, y en ella se observan los cuatro niveles de fase $\frac{3}{4}\pi$, $\frac{1}{4}\pi$, $-\frac{1}{4}\pi$, y $-\frac{3}{4}\pi$.

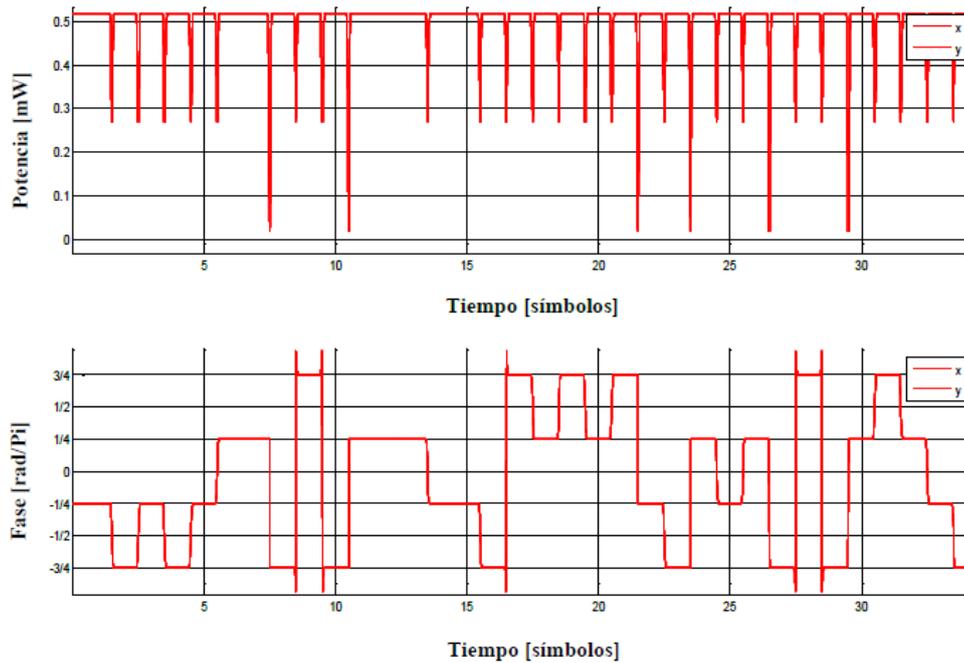


Figura 3.7: Transmisión en amplitud y fase de la señal óptica QPSK con polarización X e Y.
Elaborado por: Autor

Por otra parte, en la Figura 3.8 puede verse el espectro óptico de la señal modulada QPSK con ciclo de trabajo 30%.

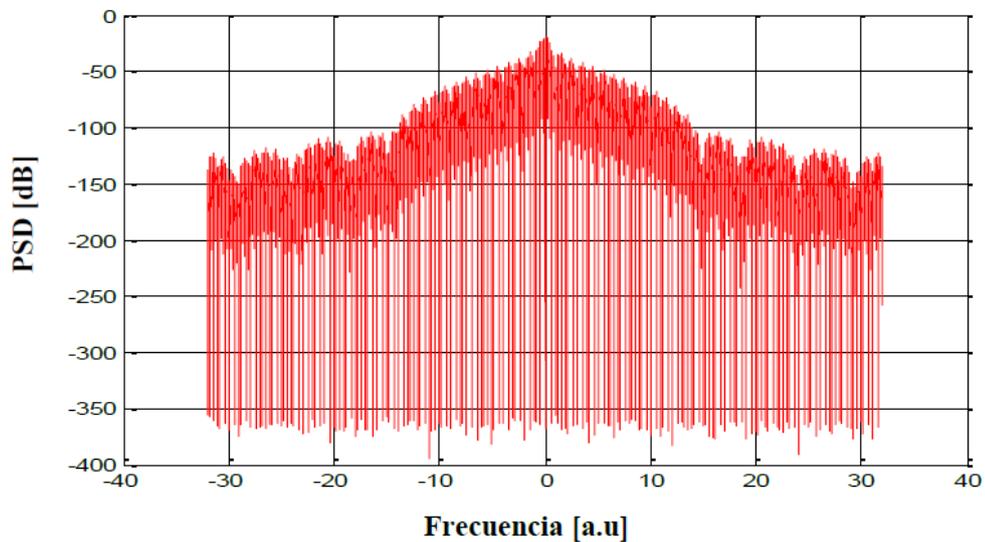


Figura 3.8: Espectro óptico del sistema de modulación QPSK.
Elaborado por: Autor

Para elegir el número óptimo de taps del algoritmo de módulo constante (CMA), primero se calcula el factor de calidad en función del número de taps o derivaciones, tal

y como se muestra en la Figura 3.9. Según la simulación, el algoritmo CMA con 3 taps obtiene el factor de calidad de señal más elevado, igual a 7,77 dB.

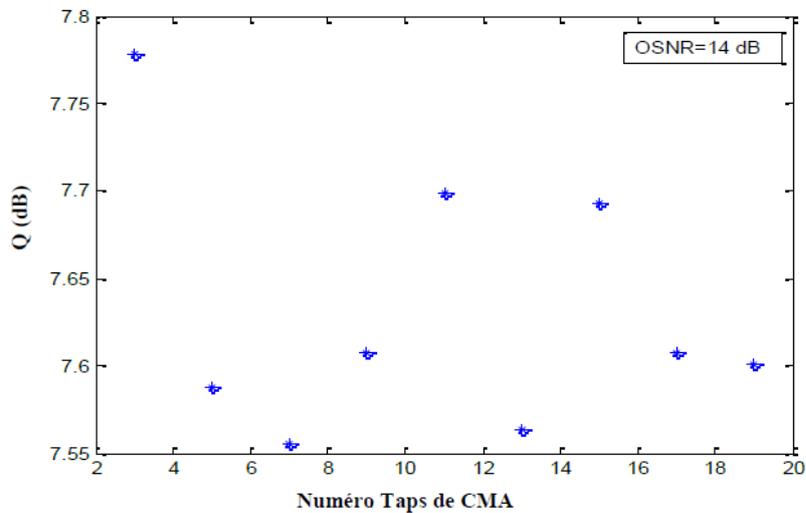


Figura 3.9: Factor de calidad (Q) frente al número de derivaciones usando el algoritmo CMA.
Elaborado por: Autor

En la Figura 3.10 se presentan los tres diagramas de constelación generados en cada etapa de los algoritmos DSP. Por lo general, un diagrama de constelación permite representar la señal en un plano complejo bidimensional y mostrar tanto la amplitud como la fase. Por ejemplo, la Figura 3.10(a) muestra la constelación de la polarización X antes del algoritmo DSP en el que la señal recibida está afectada por la CD acumulada donde el cambio de polarización significa que la señal se pierde.

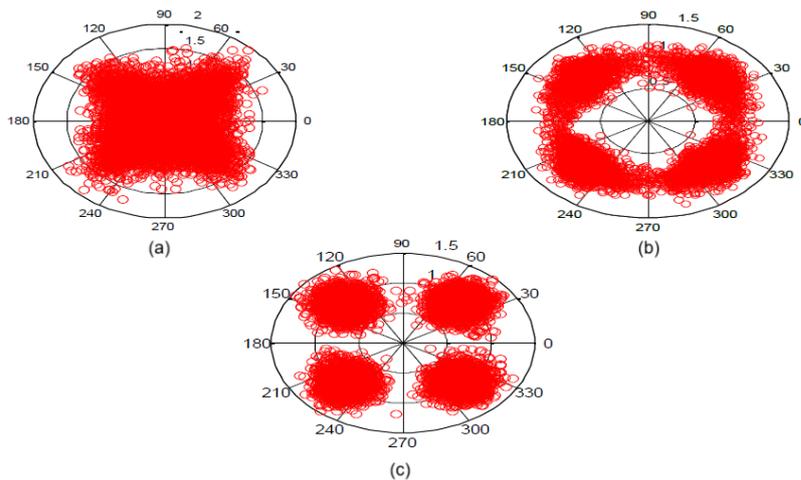


Figura 3.10: Diagramas de constelación de la señal recibida en polarización X (a) antes de DSP, (b) después de CMA, (c) después de estimación de fase.
Elaborado por: Autor

Una vez aplicada la compensación electrónica y la demultiplexación de polarización, el módulo constante de la señal QPSK se muestra claramente en la Figura 3.10(b) en forma de círculo. Por último, la etapa de recuperación de fase se ilustra en la Figura 3.10(c), donde se restauran los datos y está formada por cuatro puntos que significan los cuatro estados de fase. Cada punto está aproximadamente a 90° de sus dos vecinos más próximos.

Los FEC utilizados en la actualidad son capaces de reducir la tasa de error de transmisión después de la corrección a un valor por debajo de 10^{-12} para una tasa de error previa a la corrección de 4×10^{-3} como máximo, al mismo tiempo que aumenta la tasa binaria hasta un 7%. En todos los casos de simulación, se ha considerado que la tasa de error binario límite es de 3.8×10^{-3} .

3.3.1. Comparativa de técnicas de compensación

Para conseguir la mejor calidad de transmisión posible, es necesario compensar la dispersión acumulada en las fibras ópticas a lo largo del trayecto de transmisión. En esta sección, se presenta una comparativa de las prestaciones del sistema de transmisión coherente 0.3RZ-PDM-QPSK obtenidas en el caso de compensación óptica frente a compensación digital. Además, se comparan los resultados de las simulaciones obtenidas con diferentes formatos de códigos de línea aplicados al sistema PDM-QPSK. Primero se ha comparado el rendimiento OSNR de cada formato de modulación, tal y como se muestra en la Figura 3.11.

Las simulaciones realizadas emplean un valor de potencia óptico de -4 dBm con el fin de eliminar los efectos no lineales. En el caso de la tasa de bits erróneos en el límite FEC, el mínimo OSNR requerido es de 14.39 dB para 0.3 RZ-QPSK. Asimismo, para la misma BER, la OSNR es de 14.46 dB en el caso de 0.5 RZ-QPSK y de 14.62 dB para 0.6 RZ-QPSK. Si la relación OSNR es mayor a 15 dB, la BER supera el umbral FEC en los demás formatos analizados: NRZ-QPSK, 0.8 RZ-QPSK y coseno elevado QPSK (RC-QPSK). Por consiguiente, los valores de OSNR establecidos serían 15, 15.19 y 15.23 dB/0.1 nm, respectivamente.

Se puede observar que los formatos de modulación con ciclo de trabajo bajo demandan una OSNR reducida para obtener una BER deseada. Además, a menor ancho de pulso, mayor será la sensibilidad del sistema. Por lo tanto, se eligió el formato 0.3 RZ-

QPSK ya que proporciona una transmisión de mejor calidad comparado con los demás formatos y dicho resultado se ajusta al trabajo (Shabaan & Athab, 2020) demostrando que en los formatos RZ-QPSK con bajo ciclo de trabajo la tolerancia a la CD y a la no linealidad es mayor debido a la reducción de la interacción entre impulsos.

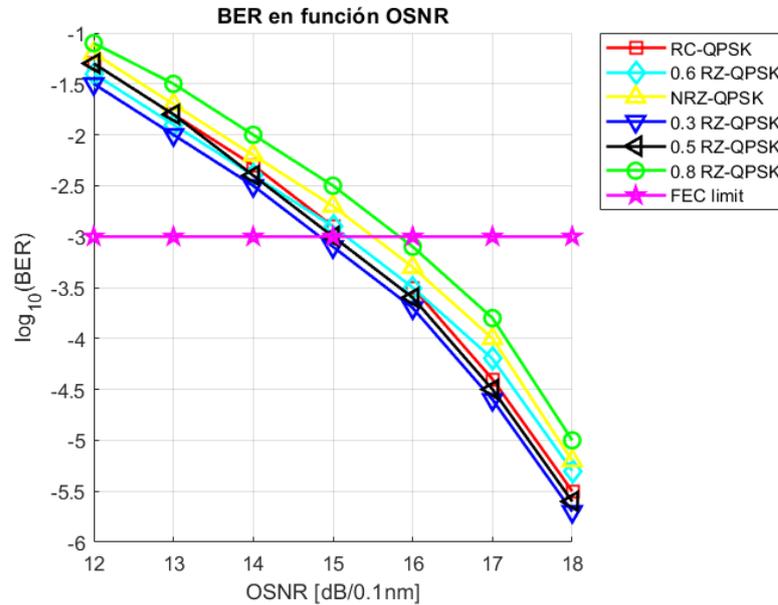


Figura 3.11: Comparativa de sensibilidad del receptor para diferentes formatos de modulación..
Elaborado por: Autor

En consecuencia, se eligió este formato para comparar la compensación óptica y electrónica. Este sistema 0.3RZ-PDM-QPSK ha sido simulado para un lazo de recirculación de 16 tramos de fibra óptica. Cada tramo consta de 75 km de fibra y un amplificador óptico EDFA. Para la compensación óptica, se consideró un tramo de fibra óptica que consta de SMF y DCF. En la Tabla 3.3 se muestran los parámetros característicos del DCF.

Tabla 3.3: Parámetros de simulación de la fibra compensadora de dispersión (DCF).

Parámetros	DCF
Longitud (L) [km]	L_{DCF}
Atenuación (α) [dB/km]	0.5
Dispersión cromática (D) [ps/nm/km]	-85
Pendiente de la dispersión (S) [ps]	-0.21
Área efectiva de la sección (A_{eff}) [μm^2]	22
Índice de refracción no lineal (n_2) [m^2/W]	2.8×10^{-20}
Coefficiente de no linealidad (γ) [$W^{-1} \times km^{-1}$]	4.27

Elaborado por: Autor

Para cada método, se calcula la potencia óptica ideal a partir de la simulación del sistema de transmisión diseñado. La compensación de la dispersión cromática se consigue de dos maneras para el sistema 0.3 RZ-PDM-QPSK que se muestra en la Figura 3.12 (a) y (b). Las prestaciones de transmisión en términos de factor de calidad Q y BER se muestran en función de la potencia media (P_{in}) inyectada en la fibra.

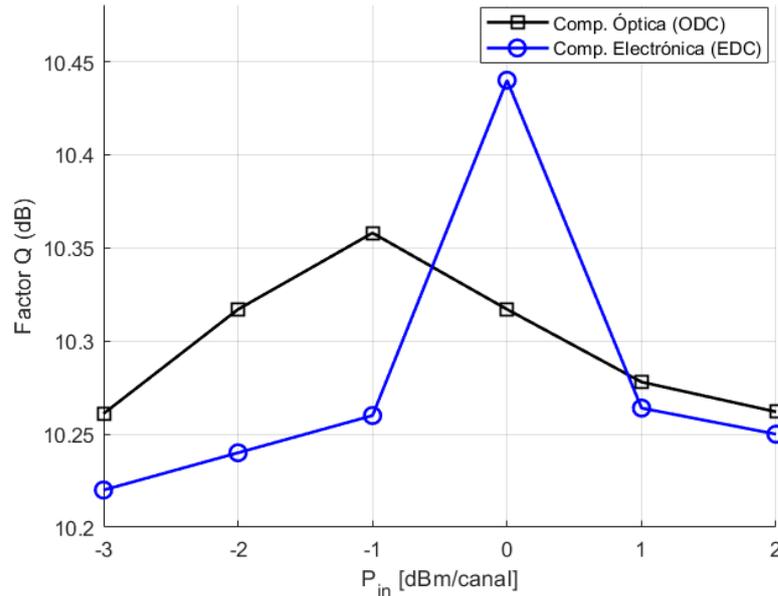


Figura 3.12: Rendimiento del sistema para la métrica del Factor Q frente a la potencia P_{in} en las configuraciones ODC y EDC después de 1200 km.

Elaborado por: Autor

En estas configuraciones, la DCF se implementa en el extremo del enlace óptico, mientras que la FDE se aplica en el receptor coherente. La potencia de entrada de la fibra P_{in} varía entre -3 y 2 dBm con una relación señal/ruido óptico fija de 16 dB. Para la compensación electrónica (EDC), la FDE basada en el algoritmo FFT de tamaño 1024 puntos puede compensar fácilmente hasta 20100 ps/nm para el sistema 0.3 RZ-PDM-QPSK. Esto corresponde a la tolerancia de la CD en los enlaces ópticos con poca o ninguna penalización de OSNR.

Si la potencia es baja, entonces el rendimiento del sistema se ve limitado por el ruido ASE. Se observa que, a medida que aumenta la potencia, la BER disminuye y el factor Q se incrementa de manera lineal hasta alcanzar la potencia ideal. De este modo, para una potencia de -1 dBm los valores correspondientes del factor Q máximo (ver Figura 3.12) y la BER mínima (ver Figura 3.13) para la compensación óptica son 4.87×10^{-4} y 10.353 dB, respectivamente. Mientras que, para la compensación

electrónica (EDC), la potencia de 0 dBm consigue el mejor rendimiento con una BER de 4.52×10^{-4} y un factor Q de unos 10.44 dB.

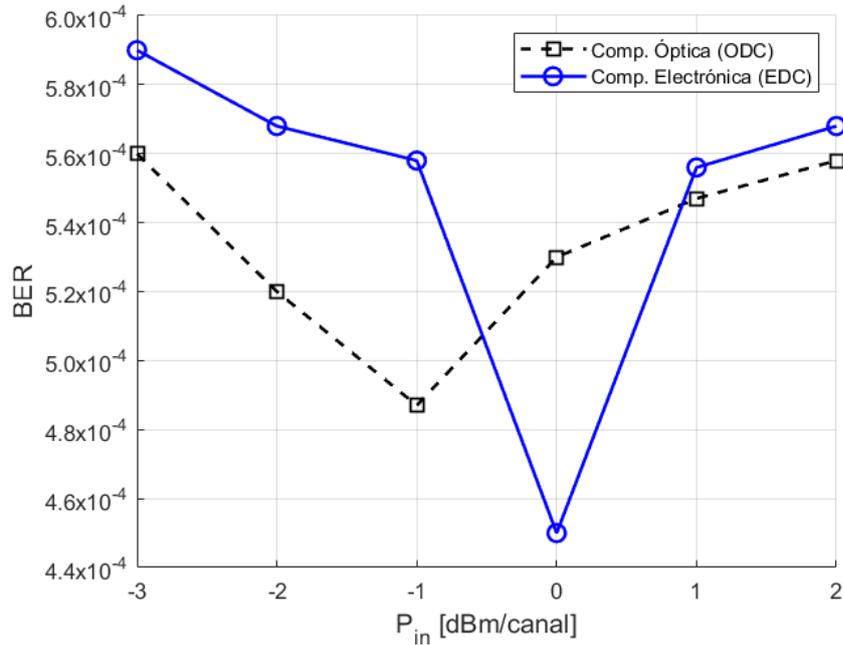


Figura 3.13: Rendimiento del sistema para la métrica de la BER frente a la potencia P_{in} en las configuraciones ODC y EDC después de 1200 km.

Elaborado por: Autor

A medida que se incrementa el nivel de potencia, los valores de BER se vuelven significativos debido a la degradación por la no linealidad de la fibra. Se observa una mejora en la configuración del sistema basada en la compensación de dispersión, que ofrece mejores prestaciones. En consecuencia, se elige a la compensación electrónica con una potencia de inyección span igual a 0 dBm para las siguientes mediciones.

3.3.2. Análisis de la técnica de compensación electrónica

Para empezar, se compara el rendimiento del sistema de transmisión propuesto con el del sistema 0.3 RZ-PDM-QPSK con una tasa de datos de 112 Gbps en una configuración sin fibra de transmisión (0 km) (configuración back-to-back, btb). Después, se evalúa la incidencia de la dispersión cromática en los dos sistemas en un enlace de 1200 km sin compensación. En esta prueba, la OSNR varía entre 12 y 16 dB con una fuente de ruido ASE. Finalmente, también se han analizado las prestaciones de estos sistemas tras aplicar la compensación electrónica.

Por ejemplo, en la Figura 3.14 se muestra el factor de calidad Q medido en los dos sistemas frente a la OSNR en la configuración btb tomada como referencia.

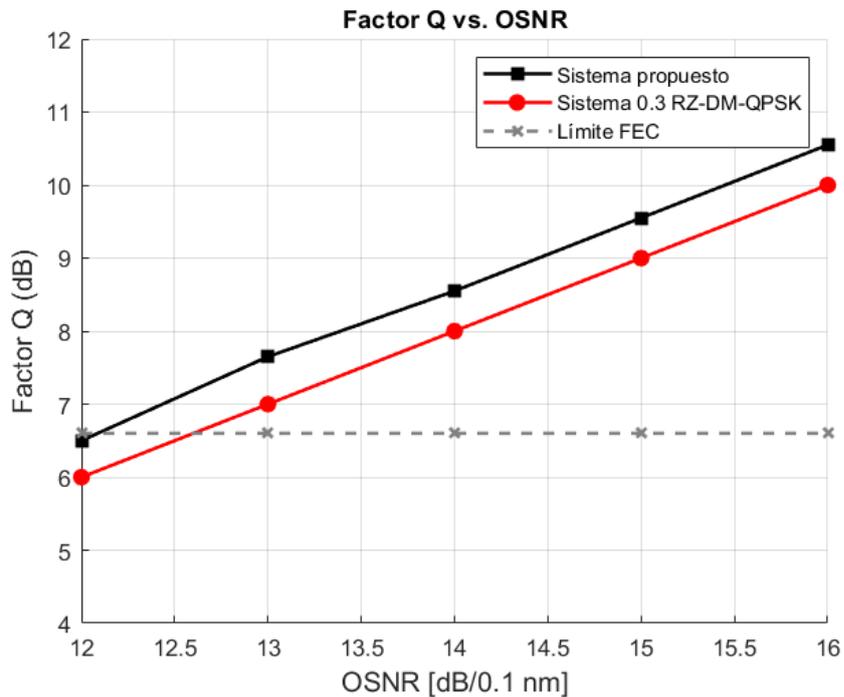


Figura 3.14: Rendimiento del sistema para la métrica Factor Q frente a la OSNR para configuración btb

Elaborado por: Autor

Posteriormente, se comparó el rendimiento de los dos sistemas en términos del Factor Q frente a la OSNR (0.1 nm) tras la propagación a lo largo de 1200 km en el caso de (a) el sistema propuesto “con” y “sin” compensación electrónica (EDC) y (b) los dos sistemas que utilizan compensación electrónica, tal como se observan en las Figura 3.15 (a) y (b), respectivamente. En la Tabla 3.4 se muestra los resultados de la relación OSNR requerida en torno al umbral FEC 3.8×10^{-3} para los dos sistemas.

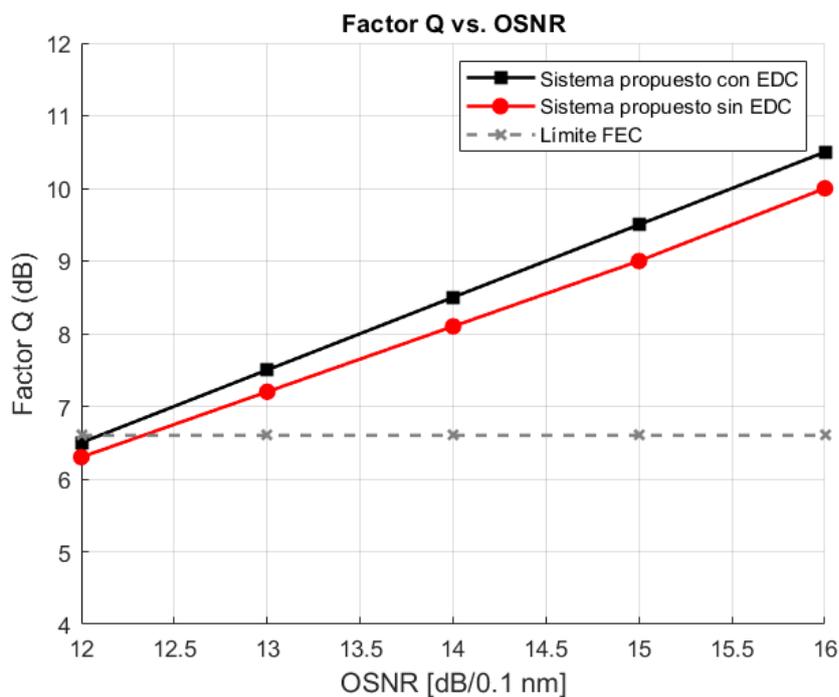
Tabla 3.4: Parámetros de simulación de la fibra compensadora de dispersión (DCF).

Configuraciones	Sistema 0.3 RZ-PDM-QPSK	Sistema propuesto
Transmisión back-to-back	12.61	12.12
Transmisión sin EDC	12.71	12.38
Transmisión con EDC	12.65	12.14

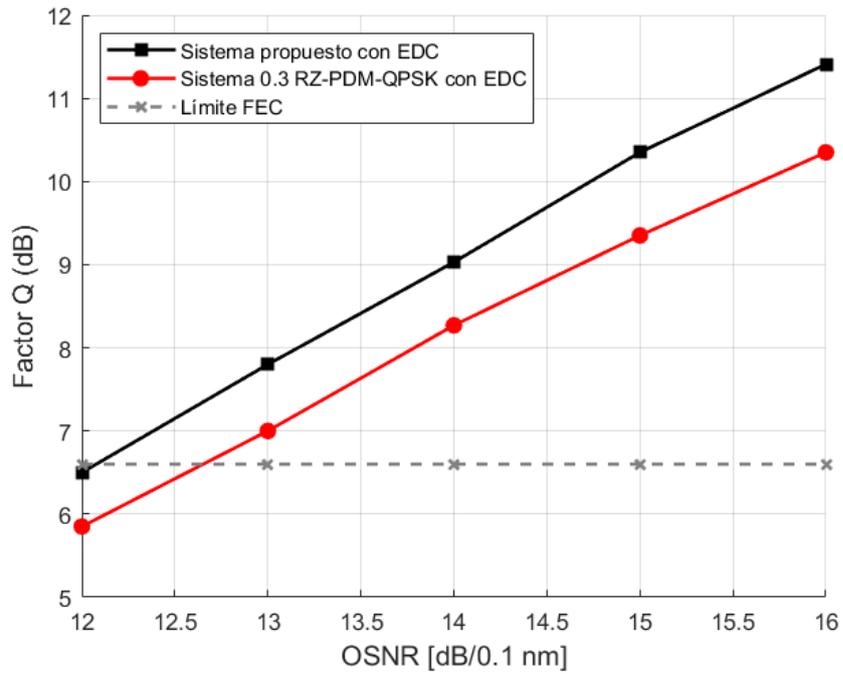
Elaborado por: Autor

Se observa que ambos sistemas exhiben un rendimiento casi similar para las configuraciones, btb y compensación electrónica (DEC). A partir de estos resultados obtenidos, el sistema propuesto dio una mejor tolerancia a la OSNR en comparación con el otro sistema.

Si bien los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en el rendimiento del sistema –por ejemplo, en la reducción del BER y el aumento del factor Q mediante técnicas de modulación avanzada– es importante reconocer ciertas limitaciones. Entre ellas, se destaca la dependencia de los parámetros de configuración en el entorno de simulación OptiSystem, lo cual puede no reproducir en forma exacta todos los efectos no lineales presentes en un entorno real. Asimismo, la precisión en la estimación de la relación OSNR puede verse afectada por las condiciones ideales asumidas en la simulación. Comparando estos resultados con estudios recientes (Gao et al., 2024; Jiang et al., 2024), se identifican tendencias consistentes, aunque persisten discrepancias en la magnitud de algunos parámetros. Estas limitaciones sugieren la necesidad de futuras investigaciones, orientadas a integrar algoritmos de precompensación de fase y el uso de inteligencia artificial para la optimización dinámica del sistema.



(a)



(b)

Figura 3.15: Rendimiento del sistema para la métrica Factor Q frente a la OSNR (a) con y sin EDC y (b) cuando ambos utilizan EDC.

Elaborado por: Autor

CONCLUSIONES

1. A través del sistema diseñado en la que se analizó la compensación óptica y electrónica, y que es una buena solución para mejorar la calidad de transmisión en redes ópticas pasivas. El sistema referencial 0.3 RZ-PDM-QPSK comparado con el sistema propuesto, este se adaptó mejor para transmisiones a larga distancia. Las gráficas de los resultados (Figuras 3.12 y 3.13) muestran una tendencia clara de mejora tanto en el factor Q como en la BER al aplicar EDC frente a ODC. Este comportamiento respalda la aplicación de estas técnicas en escenarios reales como redes metropolitanas o enlaces troncales, donde la compensación electrónica contribuye a mantener una señal de mayor calidad con menor sensibilidad a la dispersión y al ruido.
2. Además, estos resultados obtenidos en la EDC permitieron mejorar la calidad de la señal, tanto en el factor Q y la BER. Según lo mostrado en las Figuras 3.12 y 3.13, el sistema con EDC evidencia un comportamiento más estable frente a variaciones en la potencia de entrada, lo que demuestra un ajuste más eficiente de la dispersión cromática sin degradar significativamente la relación señal-ruido óptica (OSNR). Estos hallazgos confirman que la técnica EDC resulta altamente beneficiosa para escenarios donde se requiere una alta integridad de la señal, como en redes de acceso FTTH con servicios de alta velocidad o en aplicaciones sensibles a errores como videoconferencia o tráfico crítico empresarial.
3. A pesar de que el sistema propuesto logró un mejor rendimiento, hay que tener en cuenta que, si la potencia del transmisor es muy alta, esto provocaba que la BER se incrementara (mayor probabilidad de error) causados por los efectos no lineales en la fibra óptica, como la modulación de fase (SPM) y la mezcla de cuatro ondas (FWM). Este comportamiento, indicado en la tendencia de las curvas de las Figuras 3.12 y 3.13, pone de manifiesto la necesidad de gestionar cuidadosamente la potencia óptica lanzada al enlace. En aplicaciones reales, como redes WDM de larga distancia o interconexiones de centros de datos, este hallazgo refuerza la importancia de implementar mecanismos de control de potencia y considerar futuras estrategias de mitigación no lineal como precompensación o modulación adaptativa.

4. Los hallazgos de este estudio demuestran la viabilidad y eficiencia de implementar sistemas de comunicaciones ópticas coherentes basados en técnicas de modulación avanzada para redes de próxima generación. Las simulaciones desarrolladas evidencian una mejora significativa en los indicadores de rendimiento del sistema (factor Q, OSNR y BER), especialmente al emplear estrategias como la compensación electrónica. Estos resultados fortalecen su aplicabilidad en escenarios reales como redes metropolitanas, troncales y enlaces ópticos de alta capacidad. No obstante, también se identifican líneas futuras de desarrollo, como la integración de algoritmos de precompensación de fase y el uso de técnicas de inteligencia artificial para la optimización dinámica de parámetros del sistema. Estas innovaciones permitirán adaptarse de forma proactiva a condiciones variables del canal óptico, mejorando aún más la eficiencia, resiliencia y escalabilidad de las redes modernas.

RECOMENDACIONES

1. Desarrollar algoritmos de precompensación de fase que permita anticipar y corregir los efectos no lineales en la fibra óptica para evitar la afectación de la señal en el receptor en condiciones de alta potencia con el propósito de mejorar el rendimiento del sistema.
2. Analizar comparativamente modelos de compensación adaptativa para que permita ajustarse dinámicamente en diferentes escenarios de simulación en el transmisor óptico, con la finalidad de mejorar el rendimiento del sistema.
3. A partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas, se recomienda investigar y desarrollar algoritmos avanzados de precompensación de fase que integren técnicas de inteligencia artificial y aprendizaje automático para anticipar y corregir en tiempo real los efectos no lineales y la variabilidad de fase. Esta estrategia podría reducir aún más la tasa de error y mejorar la adaptabilidad del sistema ante condiciones cambiantes en la red. Además, es imperativo llevar a cabo estudios experimentales en laboratorio que validen los hallazgos obtenidos mediante simulación, permitiendo así ajustar los parámetros del modelo y evaluar la robustez del sistema frente a perturbaciones reales.
4. Se sugiere fomentar la colaboración multidisciplinaria entre expertos en procesamiento digital de señales, diseño de dispositivos optoelectrónicos y modelado de redes, con el fin de desarrollar soluciones innovadoras que optimicen el rendimiento global de los sistemas de comunicación óptica. Igualmente, se recomienda ampliar el estudio a esquemas de modulación de orden superior, como QAM de mayor orden, para evaluar de manera sistemática su impacto en la eficiencia espectral y la tolerancia a los efectos no lineales, identificando el equilibrio óptimo entre complejidad y desempeño.
5. Finalmente, se insta a profundizar en el uso de metodologías avanzadas de análisis estadístico, incluyendo simulaciones Monte Carlo extendidas y técnicas de validación cruzada, para aumentar la precisión y confiabilidad de los modelos de simulación. Este enfoque robustecerá la interpretación de los resultados y facilitará el desarrollo de modelos predictivos de mayor precisión, consolidando las bases para la implementación de sistemas ópticos de próxima generación que respondan

a las crecientes demandas de ancho de banda y robustez operativa en el ámbito de las telecomunicaciones.

REFERENCIAS

- Alimi, I., Patel, R., Silva, N., Sun, C., Ji, H., Shieh, W., Pinto, A., & Muga, N. (2021). A Review of Self-Coherent Optical Transceivers: Fundamental Issues, Recent Advances, and Research Directions. *Applied Sciences*, *11*(16), 7554. <https://doi.org/10.3390/app11167554>
- Bala, D., Waliullah, G. M., Islam, N., Abdullah, I., & Hossain, M. A. (2021). Analysis the Probability of Bit Error Performance on Different Digital Modulation Techniques over AWGN Channel Using MATLAB. *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science*, *7*(3), Article 3.
- Bohra, D. D., & Bora, A. (2014). Bit Error Rate Analysis in Simulation of Digital Communication Systems with Different Modulation Schemes. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology (IJISSET)*, *1*(3), 9.
- Das, S., Sinha, N., Pal, S., & Bhowmik, B. B. (2022). An electro-optic reconfigurable OR to Ex-OR gate based on microring resonator loaded on Mach–Zehnder interferometric structure. *Results in Optics*, *9*, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2022.100299>
- Dominguez Ratamoza, E. A., Arvizu Mondragón, A., Rojas Iñiguez, F., Mendieta Jiménez, F. J., & Santos Aguilar, J. (2021). Detección intradina en comunicaciones ópticas con modulación de fase binaria empleando un lazo de Costas en el dominio del procesamiento digital de señales. *Revista Mexicana de Física*, *67*(2 Mar-Apr), 238–248. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.67.238>
- Elamassie, M., & Uysal, M. (2023). Free Space Optical Communication: An Enabling Backhaul Technology for 6G Non-Terrestrial Networks. *Photonics*, *10*(11), 1210. <https://doi.org/10.3390/photonics10111210>
- Elkattan, M., & Gad, M. (2024). A High-Speed Silicon-Photonics WDM Switch for Optical Networks Applications. *Photonics*, *11*(12), 1115. <https://doi.org/10.3390/photonics11121115>

- Faruk, M. S., Li, X., Nettet, D., Cano, I. N., Rafel, A., & Savory, S. J. (2021). Coherent Passive Optical Networks: Why, When, and How. *IEEE Communications Magazine*, 59(12), 112–117. <https://doi.org/10.1109/MCOM.010.2100503>
- Franco A., J. C. (2023). *Estudio del desempeño de la transmisión de datos en una red 100 gb/s Dsp- Assisted Pon* [Proyecto de Titulación]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Gaiarin, S., Da Ros, F., Jones, R. T., & Zibar, D. (2021). End-to-End Optimization of Coherent Optical Communications Over the Split-Step Fourier Method Guided by the Nonlinear Fourier Transform Theory. *Journal of Lightwave Technology*, 39(2), 418–428. <https://doi.org/10.1109/JLT.2020.3033624>
- Gao, X., Gu, W., Deng, Z., Li, X., Ye, J., An, Y., Bi, S., Wang, A., Wang, Y., Qin, Y., & Gao, Z. (2024). 40 Gb/s Secure Coherent Optical Communication Based on Electro-Optic Phase Feedback Encryption. *IEEE Photonics Technology Letters*, 36(7), 481–484. <https://doi.org/10.1109/LPT.2024.3371515>
- Guerra R., L., De Almeida, G., Garcia Pereira, J. C., Martínez-Hernández, A., & González-Aguilar, J. (2022). A Method for Determination of the Transmission Efficiency of a Silica Optical Fiber Cable Using a Solar Power Tower. *Materials*, 15(4), 1511. <https://doi.org/10.3390/ma15041511>
- Hadjira, H., Boualem, M., Samir, G., Abdelfettah, M., & Mohammed, M. (2019). Numerical simulation of High Speed Optical Local Area Networks. *2019 International Conference on Intelligent Systems and Advanced Computing Sciences (ISACS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ISACS48493.2019.9068869>
- Hu, M., Shen, J., Cao, Y., Yuan, S., & Zeng, H. (2023). Generation of 48 fs, 1 GHz Fundamentally Mode-Locked Pulses Directly from an Yb-doped “Solid-State Fiber Laser”. *Photonics*, 10(2), 192. <https://doi.org/10.3390/photonics10020192>
- International Telecommunication Union (ITU-T). (2022). *ITU-T Technical Report GSTR-SDM (09/2022) Optical fibre, cable, and components for space division multiplexing transmission.*
- Jain, A., & Soni, M. (2019). *Bit Error Rate Performance Evaluation of Different Digital Modulation Techniques: A Review.* 7(2).

- Jia, Z., & Campos, L. A. (2021). Coherent Optics Ready for Prime Time in Short-Haul Networks. *IEEE Network*, 35(2), 8–14. <https://doi.org/10.1109/MNET.011.2000612>
- Jiang, Z., Liu, X., & Zhang, L. (2024). Wide and Deep Learning-Aided Nonlinear Equalizer for Coherent Optical Communication Systems. *Photonics*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/photonics11020141>
- Karar, A. S., Falou, A. R. E., Barakat, J. M. H., Gürkan, Z. N., & Zhong, K. (2023). Recent Advances in Coherent Optical Communications for Short-Reach: Phase Retrieval Methods. *Photonics*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/photonics10030308>
- Kim, J.-S., & Kim, J. T. (2016). Silicon Electro-Absorption Modulator Based on Graphene-Hexagonal Boron Nitride Heterostructure. *Journal of Lightwave Technology*, 34(22), 5293–5299. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2618371>
- Kitayama, K. (2014). *Optical Code Division Multiple Access: A Practical Perspective* (1a ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139206914>
- Large, D., & Farmer, J. (2009). Linear Fiber-Optic Signal Transportation. En *Broadband Cable Access Networks* (pp. 81–126). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374401-2.00004-8>
- Li, M., Yang, H., Wang, Y., Li, B., & Wu, Z. (2024). Investigation of Costas loop phase deviation effect on BER performance of space downlink coherent communication system with DPSK scheme. *Optics Communications*, 560, 130476. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2024.130476>
- Medeiros D., J. C. (2019). *Advanced Digital Signal Processing for Next-Generation Coherent Optical Communication Transceivers* [Ph.D. Thesis]. Technical University of Denmark.
- Misra, A., Preußler, S., Singh, K., Meier, J., & Schneider, T. (2023). Optical channel aggregation based on modulation format conversion by coherent spectral superposition with electro-optic modulators. *APL Photonics*, 8(8), 086112. <https://doi.org/10.1063/5.0150989>

- Mohamed, B. (2021). Anti-blocking system with light communication by optical fiber. *Ibn Tofail University*.
https://www.researchgate.net/publication/348163340_ANTI-BLOCKING_SYSTEM_WITH_LIGHT_COMMUNICATION_BY_OPTICAL_FIBER/pdf
- Morana, A., Campanella, C., Vidalot, J., De Michele, V., Marin, E., Reghioua, I., Boukenter, A., Ouerdane, Y., Paillet, P., & Girard, S. (2020). Extreme Radiation Sensitivity of Ultra-Low Loss Pure-Silica-Core Optical Fibers at Low Dose Levels and Infrared Wavelengths. *Sensors*, *20*(24), 7254. <https://doi.org/10.3390/s20247254>
- Nadal, L., Martínez, R., Ali, M., Vilchez, F. J., Fàbrega, J. M., Svaluto Moreolo, M., & Casellas, R. (2024). Advanced optical transceiver and switching solutions for next-generation optical networks. *Journal of Optical Communications and Networking*, *16*(8), D64. <https://doi.org/10.1364/JOCN.522102>
- Seo, S.-Y., Park, J.-H., Yun, H.-D., Kim, K.-S., Lee, G.-C., & Hong, S. (2021). Strain Transfer of Fiber Bragg Grating Sensor Externally Bonded to FRP Strip for Structural Monitoring after Reinforcement. *Materials*, *14*(16), 4382. <https://doi.org/10.3390/ma14164382>
- Shabaan, O. Y., & Athab, O. A. (2020). Hybrid compensation of polarization-multiplexed QPSK optical format for high bit rate networks. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, *20*(3), 1325. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v20.i3.pp1325-1331>
- Sharma, D., Prajapati, Y. K., & Tripathi, R. (2020). Success Journey of Coherent PM-QPSK Technique with Its Variants: A Survey. *IETE Technical Review*, *37*(1), 36–55. <https://doi.org/10.1080/02564602.2018.1557569>
- Shi, X., Gao, M., Huang, X., Fan, J., Han, X., You, X., & Shen, G. (2024). Optimized pilot structure for PS-PDM ultrahigh-order QAM coherent optical transmission. *Optics Letters*, *49*(6), 1579–1582. <https://doi.org/10.1364/OL.519424>

- Shieh, W., & Djordjevic, I. (2010). Optical Communication Fundamentals. En *OFDM for Optical Communications* (pp. 53–118). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374879-9.00003-4>
- Tabares G., J. (2021). Transmission impairments mitigation in next generation coherent optical access networks [Doctoral thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. En *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://doi.org/10.5821/dissertation-2117-355668>
- Ullah, R., Ullah, S., Almadhor, A., Alwageed, H. S., Al-Atawi, A. A., Ren, J., & Chen, S. (2024). A High-Capacity Optical Metro Access Network: Efficiently Recovering Fiber Failures with Robust Switching and Centralized Optical Line Terminal. *Sensors*, 24(4), 1074. <https://doi.org/10.3390/s24041074>
- Vardanyan, V., Sychuk, A., & Maksimov, A. (2024). Estimation of the Throughput Capacity of a Coherent Fiber-Optic Transmission System for QPSK-OFDM Signals. *2024 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/WECONF61770.2024.10564606>
- Xin, L., Xu, X., Du, L., Sun, C., Gao, F., & Zhao, J. (2023). Suppression of Nonlinear Optical Effects in DWDM-PON by Frequency Modulation Non-Coherent Detection. *Photonics*, 10(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/photonics10030323>
- Yi, X., Fontaine, N. K., Scott, R. P., & Yoo, S. J. (2010). Tb/s Coherent Optical OFDM Systems Enabled by Optical Frequency Combs. *Journal of Lightwave Technology*, 28(14), 2054–2061. <https://doi.org/10.1109/JLT.2010.2053348>
- Yuan, D., Dong, Y., Liu, Y., & Li, T. (2015). Mach-Zehnder Interferometer Biochemical Sensor Based on Silicon-on-Insulator Rib Waveguide with Large Cross Section. *Sensors*, 15(9), 21500–21517. <https://doi.org/10.3390/s150921500>
- Zhang, J., & Jia, Z. (2022). Coherent Passive Optical Networks for 100G/λ-and-Beyond Fiber Access: Recent Progress and Outlook. *IEEE Network*, 36(2), 116–123. <https://doi.org/10.1109/MNET.005.2100604>

- Zhou, Y., Yuan, Y., & Su, M. (2024). Research on Fiber-Optic Optical Coherence Ranging System Based on Laser Frequency Scanning Interferometry. *Sensors*, 24(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/s24061838>
- Zou, J. (Shihuan), Adrian Sasu, S., Lawin, M., Dochhan, A., Elbers, J.-P., & Eiselt, M. (2020). Advanced optical access technologies for next-generation (5G) mobile networks [Invited]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 12(10), D86. <https://doi.org/10.1364/JOCN.391033>