



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

**TEMA:**

**Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de  
40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de  
compensación de dispersión**

**AUTOR:**

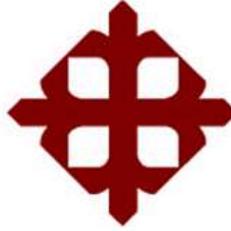
**Cali Bustamante, David Miguel**

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**TUTOR:**

**Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando M.Sc.**

**Guayaquil, Ecuador  
23 de Agosto del 2024**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Cali Bustamante, David Miguel** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

**TUTOR**

---

**Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando M.Sc.**

**DIRECTOR DE CARRERA**

---

**Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo Ph.D.**

**Guayaquil, a los 23 días del mes de agosto del año 2024**



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

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Cali Bustamante, David Miguel**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación **Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión** previo a la obtención del Título de **Ingeniero 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.

**Guayaquil, a los 23 días del mes de agosto del año 2024**

**EL AUTOR**

---

**Cali Bustamante, David Miguel**



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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Cali Bustamante, David Miguel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, a los 23 días del mes de agosto del año 2024**

**EL AUTOR**

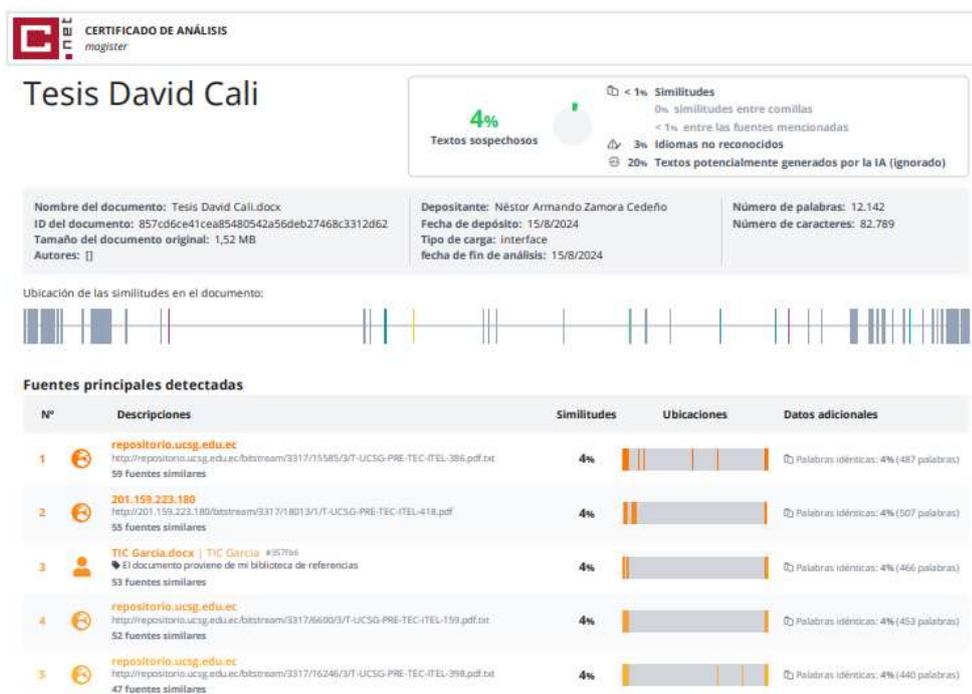
---

**Cali Bustamante, David Miguel**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES  
TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR  
INFORME SOFTWARE ANTIPLAGIO  
REPORTE DE COMPILATIO

## COMPILATIO



Reporte Compilatio del trabajo de titulación de la Carrera TELECOMUNICACIONES denominado: **Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión**, del estudiante Cali Bustamante, David Miguel se encuentra al 4% de coincidencias.

Atentamente,

Ing. Néstor Zamora, M.Sc.

DOCENTE-TUTOR

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco los consejos, cariño y ayuda de parte de mi equipo, mi familia. Pero en especial a dos personas que lo hicieron posible; Mi abuelo porque influyó en mi crianza, educación y al Ing. Hernán Guajala porque gracias a su ayuda pude culminar esta etapa profesional.

Con profunda estima y reconocimiento extendiendo mi gratitud a todas las autoridades de la Universidad Católica de Guayaquil.

## **EL AUTOR**

Cali Bustamante, David Miguel

## **DEDICATORIA**

Al concluir otra etapa de mi vida quiero extender un profundo agradecimiento a quienes lo hicieron posible, aquellos que caminaron junto a mí, que me dieron la mano, me apoyaron y creyeron en mí.

Esta mención especial es para Dios, mis abuelos Dr. Miguel Cali Avegno y Sra. María Proaño de Cali que ya no están con nosotros, mis suegros Ing. Hernán Guajala y Sra. Guadalupe Quevedo, a mi novia Belén Guajala, a mis padres Sr. Miguel Cali Proaño, Sra. Elizabeth Bustamante Burgos y mi hermana María Cali Bustamante.

Mi sinceros agradecimientos y gratitud a mi tutor de tesis, Ing. Néstor Zamora.

**EL AUTOR**

Cali Bustamante, David Miguel



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo Ph.D.**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Ubilla González, Ricardo Xavier M.Sc.**  
COORDINADOR DEL ÁREA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Medina Moreira, Washington Adolfo Ph.D.**  
OPONENTE

## Índice General

|   |           |
|---|-----------|
| Índice de Tablas.....   | XI        |
| Índice de Figuras .....   | XII       |
| Resumen .....   | XIV       |
| Abstract.....   | XV        |
| <b>Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación .....</b>  | <b>2</b>  |
| 1.1.    Introducción. ....  | 2         |
| 1.2.    Antecedentes. ....  | 5         |
| 1.3.    Definición del Problema. ....   | 7         |
| 1.4.    Justificación del Problema. ....  | 9         |
| 1.5.    Objetivos del Problema de Investigación.....  | 11        |
| 1.5.1.    Objetivo General.....   | 11        |
| 1.5.2.    Objetivos Específicos.....  | 11        |
| 1.6.    Hipótesis.....  | 11        |
| 1.7.    Metodología de Investigación. ....  | 12        |
| <b>Capítulo 2: Fundamentación Teórica .....</b>   | <b>14</b> |
| 2.1.    Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica.....  | 14        |
| 2.1.1.    Principios fundamentales y componentes del sistema. ....  | 15        |
| 2.1.2.    Ventajas y desafíos.....  | 19        |
| 2.2.    Modulación DPSK y sistemas DWDM.....  | 21        |
| 2.2.1.    Fundamentos de la modulación DPSK. ....   | 23        |
| 2.2.2.    Características de los sistemas DWDM. ....  | 27        |
| 2.2.3.    Ventajas de DPSK en sistemas DWDM. ....   | 30        |
| 2.3.    Dispersión Cromática.....   | 33        |
| 2.3.1.    Causas y Efectos de la Dispersión Cromática. ....   | 35        |
| <b>Capítulo 3: Diseño, Simulación y Análisis de Resultados .....</b>  | <b>40</b> |
| 3.1.    Descripción del diseño e implementación de un sistemas DWDM para optimización de enlaces mediante modulación de fase..... | 40        |
| 3.2.    Diseño de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM. ....  | 40        |
| 3.2.1.    Precodificador DPSK.....  | 41        |
| 3.2.2.    Configuración práctica del transmisor DPSK para generación de señales y sus variantes. ....                             | 43        |
| 3.2.3.    Configuración práctica del receptor DPSK.....   | 46        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.3. Descripción del sistema y modelo de simulación numérica .....</b> | <b>47</b> |
| <b>3.4. Discusión de resultados obtenidos .....</b>                       | <b>49</b> |
| <b>Conclusiones. ....</b>   | <b>53</b> |
| <b>Recomendaciones. ....</b>  | <b>54</b> |
| <b>Bibliografía.....</b>  | <b>55</b> |

## Índice de Tablas

### Capítulo 3

|  |    |
|--|----|
| Tabla 3. 1: Etapas de conversión de señales en sistemas de transmisión DPSK..... | 42 |
| Tabla 3. 2: Rendimiento del sistema DWDM para filtro de 3er y 4to orden. .       | 49 |

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

|  |    |
|--|----|
| Figura 2. 1: Estructura de un sistema de comunicación por fibra óptica.....  | 14 |
| Figura 2. 2: Representación de un transmisor LED en un sistema de fibra óptica.....  | 15 |
| Figura 2. 3: Módulo de transmisión láser DBR.....  | 16 |
| Figura 2. 4: (a) Mecanismo de TIR y (b) tipos de fibra óptica.....   | 16 |
| Figura 2. 5: Representación del amplificador de fibra óptica dopada con Erblio (EDFA). .....   | 17 |
| Figura 2. 6: Representación del fotodetector de avalancha (APD).....   | 18 |
| Figura 2. 7: Tipos de conectores que se utilizan en comunicaciones ópticas. ....   | 18 |
| Figura 2. 8: Representación de la multiplexación WDM.....  | 19 |
| Figura 2. 9: Representación del transmisores DPSK, (a) implementación con modulador fase, y (b) implementación con modulador Mach-Zehnder..... | 22 |
| Figura 2. 10: Representación esquemática de la modulación DPSK en el transmisor.....   | 24 |
| Figura 2. 11: Representación esquemática de la modulación DPSK receptor. ....  | 24 |
| Figura 2. 12: Representación esquemática del transmisor con modulación DQPSK.....  | 26 |
| Figura 2. 13: Representación esquemática de un sistema DWDM basada en redes ópticas. ....  | 27 |
| Figura 2. 14: Representación esquemática de un CDC-ROADM convencional. ....  | 29 |

### Capítulo 3

|   |    |
|---|----|
| Figura 3. 1: Diagrama de bloques para el Transmisor DPSK.....                                 | 42 |
| Figura 3. 2: Esquemático del diseño del transmisor DPSK. ....                                 | 44 |
| Figura 3. 3: Esquemático del diseño del receptor DPSK.....                                    | 46 |
| Figura 3. 4: Diseño del sistema óptico de alta velocidad utilizando multiplexación DWDM. .... | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 3. 5: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una $P_{in} = -1$ dBm. .... | 51 |
| Figura 3. 6: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una $P_{in} = 0$ dBm. ....  | 52 |
| Figura 3. 7: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una $P_{in} = 1$ dBm .....  | 52 |

## Resumen

El presente documento se presenta el desarrollo del trabajo de titulación denominado “Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión”. En el primer capítulo se describe el trabajo de investigación en la que se define el problema, justificación, objetivo general y los específicos. En el segundo capítulo se presenta los fundamentos teóricos de sistemas de comunicaciones ópticas, tipos de modulaciones y multiplexaciones. En el Capítulo 3, se presenta el desarrollo investigativo que tiene como propósito evaluar la técnica de modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) en una red óptica pasiva (PON) basado en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densas (DWDM) con una capacidad de transmisión de 40 Gbps para enlaces de larga distancia. El rendimiento del sistema propuesto fue evaluado en términos del factor de calidad Q y de la tasa de error binario (BER), incrementando progresivamente la distancia de transmisión para cubrir zonas más extensas.

**Palabras claves:** Transmisión, Dispersión, Compensación, Modulación, Desplazamiento, Multiplexación.

## **Abstract**

This document presents the development of the degree work called “Evaluation of the DPSK modulation technique in 40 Gbps DWDM systems for long distance transmission with dispersion compensation schemes”. The first chapter describes the research work in which the problem, justification, general and specific **objectives** are defined. The second chapter presents the theoretical foundations of optical communications systems, types of modulations and multiplexing. Chapter 3 presents the research development aimed at evaluating the differential phase shift keying (DPSK) modulation technique in a passive optical network (PON) based on dense wavelength division multiplexing (DWDM) systems with a transmission capacity of 40 Gbps for long distance links. The performance of the proposed system was evaluated in terms of the quality factor Q and bit error rate (BER), progressively increasing the transmission distance to cover larger areas.

**Keywords:** Transmission, Dispersion, Compensation, Modulation, Shift, Multiplexing.

## Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

### 1.1. Introducción.

En la era digital actual, la demanda de transmisión de datos a alta velocidad y gran capacidad ha crecido exponencialmente, impulsada por aplicaciones como el streaming de video en alta definición, la computación en la nube y el Internet de las Cosas (*Internet of Things, IoT*). En este contexto, los sistemas de comunicación por fibra óptica han emergido como la solución más eficiente y prometedora para satisfacer estas necesidades (Winzer et al., 2018).

Estos sistemas ofrecen ventajas significativas sobre las tecnologías de comunicación tradicionales, incluyendo un ancho de banda extremadamente alto, baja atenuación de señal y resistencia a interferencias electromagnéticas. La fibra óptica, compuesta de hilos de vidrio o plástico más delgados que un cabello humano, utiliza pulsos de luz para transmitir información a largas distancias. Esta tecnología ha revolucionado las telecomunicaciones, permitiendo la transmisión de enormes cantidades de datos a velocidades cercanas a la de la luz (Cisco, 2020).

En el corazón de los avances en comunicaciones ópticas se encuentran tecnologías como la Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (*Dense Wavelength-Division Multiplexing, DWDM*) y técnicas de modulación avanzadas como la Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (*Differential Phase Shift Keying, DPSK*). DWDM permite la transmisión simultánea de múltiples señales ópticas en una sola fibra, cada una en una longitud de onda diferente, multiplicando así la capacidad de transmisión de la red (Delgado M. et al., 2017).

Por su parte, la modulación DPSK ofrece una mayor eficiencia espectral y resistencia al ruido en comparación con esquemas de modulación más simples, lo que la hace particularmente atractiva para sistemas de larga distancia y alta velocidad (Hsu et al., 2022). La combinación de DPSK y

DWDM (DPSK-DWDM) representa un enfoque prometedor para lograr transmisiones de datos de alta velocidad y larga distancia.

Sin embargo, a medida que las señales ópticas viajan a través de la fibra, se enfrentan a varios desafíos que pueden degradar la calidad de la transmisión. Uno de los más significativos es la dispersión cromática, un fenómeno en el que diferentes componentes de frecuencia de la señal óptica viajan a velocidades ligeramente diferentes, resultando en un ensanchamiento temporal de los pulsos ópticos (Chen et al., 2021).

La dispersión cromática puede causar interferencia entre símbolos (ISI) y limitar severamente la distancia de transmisión y la tasa de datos alcanzable en sistemas de comunicación óptica. Este problema se vuelve particularmente crítico en sistemas de alta velocidad como los de 40 Gbps y superiores, donde incluso pequeñas cantidades de dispersión pueden tener un impacto significativo en el rendimiento del sistema (Sun et al., 2018).

Para abordar el desafío de la dispersión cromática, se han desarrollado varias técnicas de compensación de dispersión. Estas incluyen el uso de fibras de compensación de dispersión (*Dispersion-Compensating Fiber, DCF*), rejillas de Bragg en fibra (*Fiber Bragg Grating, FBG*) (Liu, 2019), y técnicas de procesamiento de señal digital (*Digital Signal Processors, DSP*) (Liu et al., 2014). Cada una de estas técnicas tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de la técnica más apropiada depende de factores como la longitud del enlace, la tasa de datos y las consideraciones de costo.

En particular, el uso de DCF ha ganado popularidad debido a su capacidad para compensar la dispersión de manera pasiva y su compatibilidad con sistemas existentes. Las DCF están diseñadas para tener una dispersión cromática opuesta a la de las fibras de transmisión estándar, permitiendo así una compensación neta de la dispersión acumulada (Wang et al., 2015). Sin embargo, la implementación efectiva de DCF requiere una cuidadosa consideración de factores como la ubicación óptima de los módulos

de compensación (pre, post o simétrica) y el balance entre la compensación de dispersión y otros efectos no lineales.

La evaluación del rendimiento de los sistemas DPSK-DWDM con diferentes esquemas de compensación de dispersión es crucial para optimizar el diseño de redes ópticas de alta velocidad y larga distancia. Métricas como el factor de calidad (Q) y la tasa de error de bit (BER) proporcionan indicadores clave del rendimiento del sistema y permiten comparar la eficacia de diferentes configuraciones (Yan et al., 2019).

En este contexto, el presente trabajo de titulación se enfoca en el diseño y análisis de un sistema DPSK-DWDM de 40 Gbps, investigando el impacto de diferentes esquemas de compensación de dispersión en el rendimiento del sistema. El estudio busca contribuir al conocimiento actual sobre la optimización de sistemas de comunicación óptica de alta velocidad, proporcionando insights valiosos para el diseño de redes futuras capaces de satisfacer la creciente demanda de ancho de banda.

A medida que avanzamos hacia la era del 5G y más allá, con aplicaciones emergentes como la realidad virtual y aumentada, los vehículos autónomos y las ciudades inteligentes, la importancia de contar con infraestructuras de comunicación robustas y de alta capacidad no puede ser subestimada. Los sistemas de fibra óptica, y en particular las configuraciones avanzadas como DPSK-DWDM con compensación de dispersión optimizada, jugarán un papel crucial en la realización de estas tecnologías futuras (Li et al., 2022).

En resumen, este trabajo se sitúa en la intersección de varias áreas críticas de la ingeniería de telecomunicaciones: sistemas de fibra óptica de alta velocidad, técnicas avanzadas de modulación y multiplexación, y métodos de mitigación de efectos de propagación no deseados. Al abordar estos temas, se espera contribuir al avance continuo de las tecnologías de comunicación óptica, allanando el camino para redes más rápidas, más eficientes y capaces en el futuro.

## **1.2. Antecedentes.**

La evolución de los sistemas de comunicación por fibra óptica ha sido impulsada por la necesidad constante de aumentar la capacidad y la distancia de transmisión. En las últimas décadas, se han logrado avances significativos en este campo, pero también han surgido nuevos desafíos que requieren soluciones innovadoras.

El desarrollo de la tecnología DWDM marcó un hito importante en las comunicaciones ópticas. Esta tecnología permitió multiplicar la capacidad de las fibras existentes al transmitir múltiples longitudes de onda simultáneamente por una sola fibra. Delgado M. et al., (2017) proporcionaron una visión general de los avances en formatos de modulación óptica avanzados y su rendimiento en redes ópticas, destacando cómo DWDM ha revolucionado la capacidad de transmisión de datos.

Sin embargo, a medida que las tasas de transmisión aumentaron, los efectos de la dispersión cromática se volvieron más pronunciados, limitando el rendimiento del sistema. La dispersión cromática, un fenómeno inherente a la propagación de la luz en la fibra óptica, se convirtió en un factor limitante crítico para los sistemas de alta velocidad. Chen et al. (2021) exploraron en profundidad la mitigación de la no linealidad de la fibra en comunicaciones ópticas coherentes de larga distancia, subrayando cómo la dispersión cromática interactúa con otros efectos no lineales para degradar la calidad de la señal.

Para abordar este problema, se desarrollaron varias técnicas de compensación de dispersión. Una de las primeras soluciones fue el uso de fibras de compensación de dispersión (DCF). Liu et al., (2014) proporciona una visión general de las técnicas de procesamiento de señales digitales que permiten la transmisión de supercanales de multi-Tbps, incluyendo la compensación de dispersión. Su trabajo destacó cómo las DCF, junto con otras técnicas, han sido fundamentales para extender la distancia de transmisión en sistemas de alta velocidad.

Paralelamente al desarrollo de técnicas de compensación de dispersión, se exploraron esquemas de modulación más avanzados. La modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) emergió como una alternativa prometedora a la modulación de intensidad On-Off Keying (OOK) tradicionalmente utilizada. Fares et al., (2021) demostraron un sistema de transmisión de fibra óptica DPSK-DWDM con amplificación óptica híbrida, mostrando las ventajas de DPSK en términos de tolerancia al ruido y efectos no lineales.

La combinación de DWDM y DPSK (DPSK-DWDM) se ha convertido en un área de investigación activa en los últimos años. Sun et al. (2018) realizaron mediciones en tiempo real de un sistema coherente de 40 Gbps, proporcionando insights valiosos sobre el rendimiento de estos sistemas en condiciones reales de operación.

La configuración óptima de los módulos de compensación de dispersión en sistemas DPSK-DWDM ha sido objeto de numerosos estudios. Wang et al., (2015) compararon diferentes formatos de modulación en sistemas IM/DD con modulación de tono discreto, proporcionando una base para entender cómo diferentes técnicas de modulación, incluida DPSK, se comportan en presencia de dispersión cromática.

Además de la DCF, se han explorado otras técnicas de compensación de dispersión. Las rejillas de Bragg en fibra (FBG) han ganado atención debido a su capacidad para proporcionar compensación de dispersión con bajas pérdidas de inserción. Yan et al. (2019) demostraron una transmisión IM/DD de 100 Gbps utilizando dispositivos de clase 10G, lo que subraya la importancia de técnicas avanzadas de procesamiento de señales y compensación de dispersión para lograr altas tasas de datos.

El procesamiento digital de señales (DSP) también ha emergido como una herramienta poderosa para la compensación de dispersión. A diferencia de las soluciones ópticas como DCF y FBG, las técnicas de DSP ofrecen la flexibilidad de ajustar adaptativamente la compensación de dispersión. Winzer

et al. (2018) proporcionaron una visión general de los límites de capacidad en comunicaciones ópticas, destacando el papel crucial del DSP en la superación de limitaciones físicas.

A pesar de estos avances, quedan desafíos importantes por abordar. La interacción entre la dispersión cromática y otros efectos no lineales, como la automodulación de fase (SPM) y la modulación de fase cruzada (XPM), complica el diseño de esquemas de compensación óptimos. Li et al. (2022) exploraron el uso del aprendizaje automático para el monitoreo del rendimiento óptico en sistemas de comunicación por fibra óptica, abriendo nuevas posibilidades para la optimización dinámica de la compensación de dispersión.

Otro aspecto crítico es la escalabilidad de las soluciones de compensación de dispersión a tasas de datos más altas. Con el surgimiento de sistemas de 100 Gb/s y más allá, las técnicas que funcionan bien a 40 Gb/s pueden no ser directamente aplicables. La investigación continua en este campo busca desarrollar soluciones que puedan escalar eficientemente a tasas de datos cada vez más altas.

El consumo de energía y la complejidad del sistema también son consideraciones importantes. Mientras que las soluciones basadas en DSP ofrecen gran flexibilidad, también pueden ser intensivas en energía. La búsqueda de un equilibrio entre rendimiento y eficiencia energética sigue siendo un área activa de investigación.

### **1.3. Definición del Problema.**

El problema central que aborda esta investigación es la optimización del rendimiento de sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps para transmisiones de larga distancia, con un enfoque particular en la evaluación y comparación de diferentes esquemas de compensación de dispersión.

Los sistemas de comunicación óptica de alta velocidad, como los que operan a 40 Gb/s, están sujetos a varios factores que degradan la calidad de

la señal, siendo la dispersión cromática uno de los más significativos. Esta dispersión causa el ensanchamiento temporal de los pulsos ópticos, lo que puede resultar en interferencia entre símbolos y, por consiguiente, en un aumento de la tasa de error de bit (BER) (Chen et al., 2021).

Aunque se han desarrollado diversas técnicas para compensar la dispersión cromática, como el uso de fibras de compensación de dispersión (DCF), rejillas de Bragg en fibra (FBG) y técnicas de procesamiento digital de señales (DSP), la implementación óptima de estas soluciones en sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps no está completamente definida (Liu, 2019). Cada técnica tiene sus propias ventajas y limitaciones, y su eficacia puede variar dependiendo de las características específicas del sistema y el enlace de transmisión.

Además, la interacción entre la dispersión cromática y otros efectos no lineales complica aún más el diseño de esquemas de compensación eficaces. La compensación excesiva de la dispersión puede, en algunos casos, exacerbar los efectos no lineales, lo que subraya la necesidad de un enfoque equilibrado (Winzer et al., 2018).

Por lo tanto, el problema de investigación se centra en determinar la configuración óptima de compensación de dispersión para sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps, considerando diferentes esquemas (pre-compensación, post-compensación y compensación simétrica) y evaluando su impacto en el rendimiento del sistema en términos de factor Q y BER.

Esta investigación busca responder preguntas como:

¿Cuál es la eficacia relativa de los diferentes esquemas de compensación de dispersión en sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps?

¿Cómo afecta la distancia de transmisión al rendimiento del sistema con diferentes configuraciones de compensación?

¿Qué compromiso existe entre la compensación de dispersión y otros efectos no lineales en estos sistemas?

¿Cómo se puede optimizar la configuración de compensación de dispersión para maximizar la distancia de transmisión manteniendo una BER aceptable?

Al abordar estas cuestiones, esta investigación pretende contribuir al diseño y optimización de sistemas de comunicación óptica de alta velocidad y larga distancia, proporcionando insights valiosos para la implementación práctica de tecnologías DPSK-DWDM en redes de próxima generación (Downie et al., 2010; Fares et al., 2021).

#### **1.4. Justificación del Problema.**

La investigación sobre la optimización de sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps con diferentes esquemas de compensación de dispersión se justifica por varias razones cruciales para el avance de las comunicaciones ópticas de alta velocidad.

En primer lugar, la demanda global de ancho de banda continúa creciendo exponencialmente. Según Cisco (2020), el tráfico IP global anual alcanzará los 4,8 zettabytes para 2022, con una tasa de crecimiento anual compuesta del 26% desde 2017. Esta creciente demanda requiere sistemas de comunicación óptica cada vez más eficientes y de mayor capacidad. Los sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps representan un paso importante hacia la satisfacción de esta demanda, pero su rendimiento óptimo depende en gran medida de la gestión efectiva de la dispersión cromática.

La dispersión cromática es uno de los principales factores limitantes en los sistemas de comunicación óptica de alta velocidad. Como señalan Chen et al. (2021), incluso pequeñas cantidades de dispersión no compensada pueden causar una degradación significativa de la señal en sistemas de 40 Gbps y superiores. Por lo tanto, la investigación sobre técnicas efectivas de compensación de dispersión es crucial para extender el alcance y mejorar el rendimiento de estos sistemas.

Además, la modulación DPSK ha demostrado ventajas significativas sobre otros formatos de modulación en términos de tolerancia al ruido y a los efectos no lineales. Gill & Dewra, (2017) demostraron que los sistemas DPSK-DWDM con amplificación óptica híbrida pueden lograr transmisiones de larga distancia con alta calidad de señal. Sin embargo, la interacción entre la modulación DPSK y los diversos esquemas de compensación de dispersión aún no se comprende completamente, lo que justifica una investigación más profunda.

La elección del esquema de compensación de dispersión óptimo no es trivial. Como indican Liu, (2019), cada técnica de compensación tiene sus propias ventajas y limitaciones, y su eficacia puede variar dependiendo de las características específicas del sistema y el enlace de transmisión. Esta complejidad justifica un estudio comparativo detallado de diferentes esquemas de compensación en el contexto de sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps.

Desde una perspectiva práctica, la optimización de estos sistemas tiene implicaciones significativas para la industria de las telecomunicaciones. Mejorar el rendimiento y la eficiencia de los sistemas de comunicación óptica puede conducir a una reducción de costos operativos y de infraestructura, al tiempo que se mejora la calidad del servicio. Como señalan Winzer et al. (2018), empujar los límites de la capacidad de los sistemas ópticos es crucial para satisfacer las demandas futuras de ancho de banda.

Además, esta investigación tiene el potencial de contribuir al desarrollo de tecnologías emergentes. Li et al. (2022) destacan cómo las técnicas avanzadas de procesamiento de señales y monitoreo del rendimiento óptico, incluida la compensación de dispersión optimizada, son fundamentales para el despliegue de redes 5G y más allá. Comprender mejor cómo optimizar los sistemas DPSK-DWDM de alta velocidad puede allanar el camino para aplicaciones futuras como la realidad virtual/aumentada, los vehículos autónomos y las ciudades inteligentes.

Finalmente, esta investigación se alinea con las tendencias actuales hacia la eficiencia energética en las redes de comunicación. Al optimizar la compensación de dispersión, es posible mejorar la eficiencia general del sistema, lo que puede conducir a un menor consumo de energía. Esto es particularmente relevante dado el creciente enfoque en la sostenibilidad y la reducción de la huella de carbono de las infraestructuras de comunicación.

En resumen, esta investigación se justifica por su potencial para mejorar significativamente el rendimiento de los sistemas de comunicación óptica de alta velocidad, contribuir al desarrollo de tecnologías futuras, y abordar desafíos críticos en la industria de las telecomunicaciones. Los resultados de este estudio tienen el potencial de influir en el diseño y la implementación de la próxima generación de redes ópticas, contribuyendo así al avance continuo de las comunicaciones globales.

## **1.5. Objetivos del Problema de Investigación.**

### **1.5.1. Objetivo General.**

Diseñar y analizar el sistema DPSK- DWDM a una distancia estrecha entre canales utilizando diferentes esquemas de compensación de dispersión en términos de factor Q y BER y aumentando la distancia para un área más larga.

### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

1. Estudiar el sistema de comunicación por fibra óptica.
2. Analizar el efecto de la configuración pre, post y simétrica del DCF sobre la dispersión cromática.
3. Evaluar las prestaciones del sistema DPSK-DWDM utilizando diferentes compensaciones de dispersión.

## **1.6. Hipótesis.**

La hipótesis central de esta investigación es que la implementación adecuada de esquemas de compensación de dispersión en sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps puede mejorar significativamente el rendimiento del

sistema en términos de factor Q y BER, permitiendo transmisiones de larga distancia con alta calidad de señal.

Se propone que la compensación simétrica de dispersión, que distribuye la compensación antes y después de la transmisión, proporcionará el mejor rendimiento en términos de factor Q y BER para sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps con distancia estrecha entre canales. Esta hipótesis se basa en la premisa de que la compensación simétrica puede equilibrar mejor los efectos de la dispersión cromática y las no linealidades de la fibra a lo largo del enlace de transmisión.

Además, se postula que existe una relación no lineal entre la distancia de transmisión y la efectividad de los esquemas de compensación de dispersión. Se espera que, a medida que aumenta la distancia de transmisión, la diferencia en el rendimiento entre los diferentes esquemas de compensación se vuelva más pronunciada, con la compensación simétrica manteniendo una ventaja en distancias más largas.

Finalmente, se propone que la optimización de los parámetros de compensación de dispersión, en conjunto con otros parámetros del sistema como la potencia de transmisión y el espaciado de canales, puede extender significativamente la distancia de transmisión máxima alcanzable mientras se mantiene una BER aceptable en sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps.

Esta hipótesis será probada a través de simulaciones exhaustivas y análisis comparativos de diferentes configuraciones del sistema, con el objetivo de proporcionar insights valiosos para el diseño y la implementación de sistemas de comunicación óptica de alta velocidad y larga distancia.

### **1.7. Metodología de Investigación.**

La metodología de investigación para este trabajo se basará en un enfoque cuantitativo con un diseño experimental, utilizando simulaciones computacionales como herramienta principal para la recolección y análisis de datos. Esta metodología se ha elegido debido a su capacidad para

proporcionar resultados precisos y reproducibles en el estudio de sistemas de comunicación óptica complejos.

El diseño de la investigación será experimental, basado en simulaciones. Se utilizará un software especializado en comunicaciones ópticas, como OptiSystem o VPIphotonics, para modelar y simular el sistema DPSK-DWDM de 40 Gbps con diferentes esquemas de compensación de dispersión. Este enfoque permite un control preciso de las variables del sistema y la capacidad de realizar múltiples iteraciones con diferentes configuraciones.

Esta metodología proporcionará un enfoque sistemático y riguroso para abordar los objetivos de la investigación, permitiendo una evaluación exhaustiva del rendimiento de los sistemas DPSK-DWDM de 40 Gbps con diferentes esquemas de compensación de dispersión. Los resultados obtenidos a través de este enfoque contribuirán al conocimiento actual sobre la optimización de sistemas de comunicación óptica de alta velocidad y larga distancia.

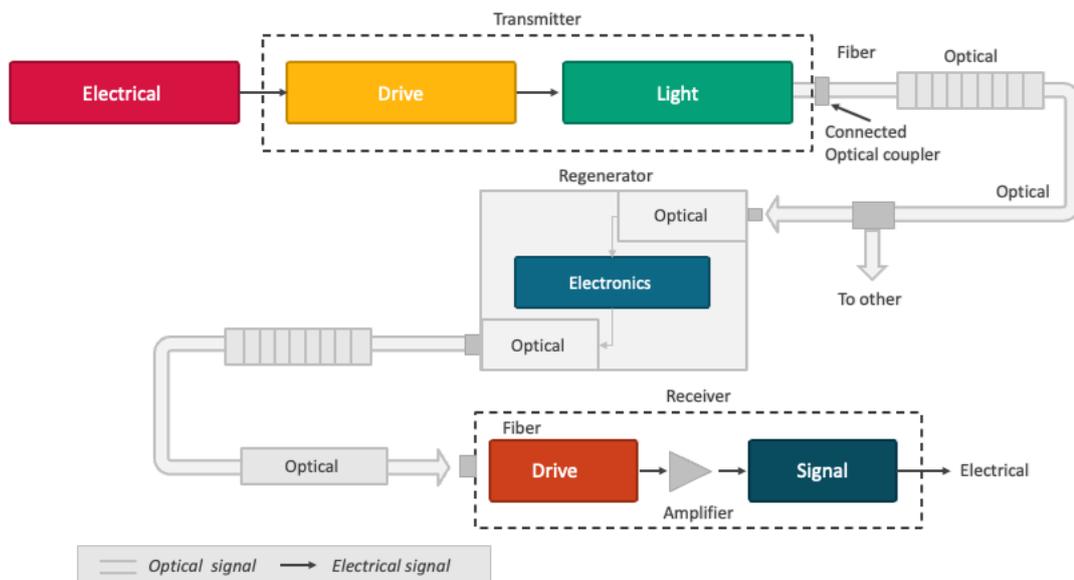
## Capítulo 2: Fundamentación Teórica

### 2.1. Sistemas de Comunicación por Fibra Óptica.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica han revolucionado la industria de las telecomunicaciones, permitiendo la transmisión de datos a alta velocidad sobre largas distancias con una pérdida mínima de señal. Estos sistemas utilizan luz para transportar información a través de delgados filamentos de vidrio o plástico, conocidos como fibras ópticas. El desarrollo de la tecnología de fibra óptica ha sido crucial para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en nuestro mundo cada vez más conectado (Keiser, 2021).

La Figura 2.1 representa la estructura principal de un sistema de comunicación por fibra óptica: (1) transmisor óptico, (2) fibra óptica y (3) receptor óptico. Básicamente, un sistema de fibra óptica convierte una señal eléctrica en una señal luminosa que se transmite a través de una fibra óptica. En el extremo receptor de la fibra óptica, se convierte de nuevo en una señal eléctrica.

Figura 2. 1: Estructura de un sistema de comunicación por fibra óptica.



Fuente: (Shravya et al., 2023)

Un codificador es un circuito eléctrico que codifica la información en secuencias binarias de ceros y uno. Cada «uno» corresponde a un impulso

eléctrico y cada «cero» a la ausencia de impulso en un transmisor de ondas luminosas. La fuente de luz puede encenderse y apagarse en función de las necesidades con la ayuda de estos impulsos eléctricos. El controlador ayuda a convertir la señal eléctrica entrante en una forma compatible con la fuente de luz.

### 2.1.1. Principios fundamentales y componentes del sistema.

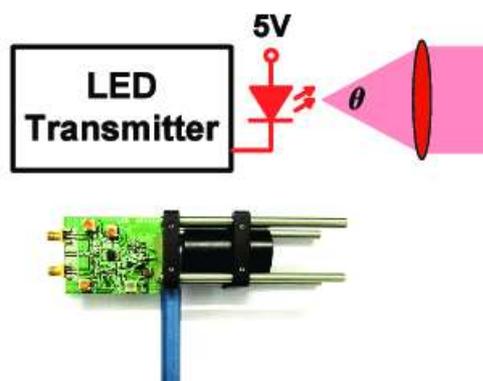
El principio básico de la comunicación por fibra óptica implica la transmisión de pulsos de luz a través de una fibra óptica. Este proceso se basa en el fenómeno de la reflexión interna total, donde la luz queda confinada dentro del núcleo de la fibra debido a la diferencia en los índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento circundante (Agrawal, 2019). Los componentes clave de un sistema de comunicación por fibra óptica incluyen:

#### 1. Transmisores (Fuentes de luz):

Los transmisores convierten las señales eléctricas en señales ópticas. Los dos tipos principales de fuentes de luz utilizadas en sistemas de fibra óptica son:

- a) Diodos emisores de luz (LEDs): Son rentables y adecuados para comunicaciones de corta a media distancia. Los LEDs emiten luz incoherente (ver Figura 2.2) y tienen un ancho espectral relativamente amplio (Mynbaev & Scheiner, 2020).

Figura 2. 2: Representación de un transmisor LED en un sistema de fibra óptica.



Fuente: (Binh et al., 2013)

- b) Diodos láser: Proporcionan una mayor potencia de salida, un ancho espectral más estrecho y tasas de modulación más rápidas en comparación con los LEDs. Los diodos láser son preferidos para

comunicaciones de larga distancia y alta velocidad. Los tipos comunes incluyen láseres Fabry-Perot (FP), láseres de realimentación distribuida (DFB), láseres de reflector de Bragg distribuido (DBR) y láseres de emisión superficial con cavidad vertical (VCSELs) (Kartalopoulos, 2017). La figura 2.3 muestra el módulo láser DBR.

Figura 2. 3: Módulo de transmisión láser DBR.

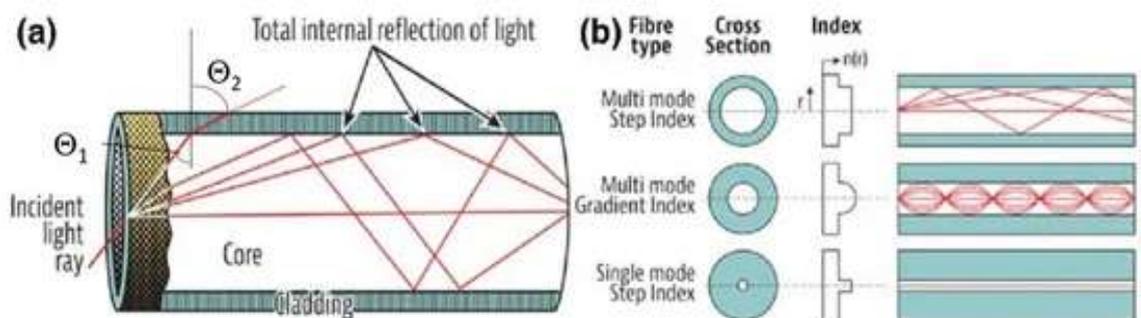


Fuente: (Kong et al., 2023)

## 2. Fibras ópticas:

Las fibras ópticas son el medio de transmisión en los sistemas de fibra óptica. Consisten en un núcleo, un revestimiento y una cubierta protectora externa. La Figura 2.4 muestra (a) el mecanismo de la reflexión total interna (*Total Internal Reflection, TIR*) y (b) los tipos de fibras multimodo y monomodo.

Figura 2. 4: (a) Mecanismo de TIR y (b) tipos de fibra óptica.



Fuente: (Rovera et al., 2023)

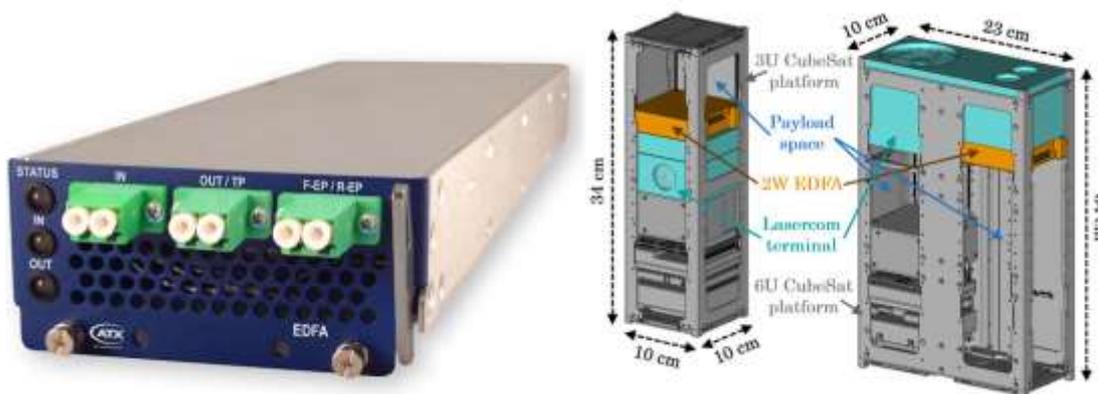
Hay dos tipos principales de fibras ópticas:

- a) Fibras monomodo: Tienen un diámetro de núcleo pequeño (típicamente 8-10  $\mu\text{m}$ ) y permiten que se propague solo un modo de luz. Se utilizan para aplicaciones de larga distancia y alto ancho de banda (Keiser, 2021).
- b) Fibras multimodo: Tienen un diámetro de núcleo más grande (típicamente 50-62.5  $\mu\text{m}$ ) y permiten que se propaguen múltiples modos de luz. Se utilizan para aplicaciones de distancia más corta y es más fácil acoplar la luz en ellas (Agrawal, 2019).

### 3. Amplificadores ópticos:

Para la transmisión de larga distancia, se utilizan amplificadores ópticos para aumentar la fuerza de la señal sin convertirla en una señal eléctrica. El tipo más común es el Amplificador de Fibra Dopada con Erbio (*Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA*) que se muestra en la Figura 2.5, que opera en la región de longitud de onda de 1550 nm (Mynbaev & Scheiner, 2020).

Figura 2. 5: Representación del amplificador de fibra óptica dopada con Erbio (EDFA).



Fuente: (Carrasco-Casado et al., 2022)

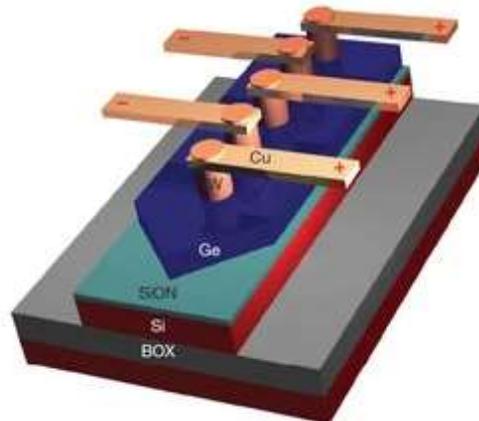
### 4. Receptores:

Los receptores convierten la señal óptica de vuelta en una señal eléctrica. Los componentes clave de los receptores ópticos incluyen:

- a) Fotodetectores: Convierten la luz en corriente eléctrica. Los tipos comunes son los fotodiodos p-i-n y los fotodiodos de avalancha (APDs) (Kartalopoulos, 2017).

- b) Amplificadores de transimpedancia (TIAs): Convierten la fotocorriente en una señal de voltaje y proporcionan una amplificación inicial (Keiser, 2021).
- c) Ecuilibradores: Compensan la distorsión de la señal que ocurre durante la transmisión (Agrawal, 2019).

Figura 2. 6: Representación del fotodetector de avalancha (APD).



Fuente: (Vinogradov, 2023)

### 5. Conectores y empalmes ópticos:

Estos componentes unen cables de fibra óptica y los conectan a transmisores y receptores. Los tipos comunes de conectores incluyen SC, LC y FC, tal como se observan en la figura 2.7. Los empalmes pueden ser mecánicos o por fusión, siendo los empalmes por fusión los que proporcionan menor pérdida (Mynbaev & Scheiner, 2020).

Figura 2. 7: Tipos de conectores que se utilizan en comunicaciones ópticas.



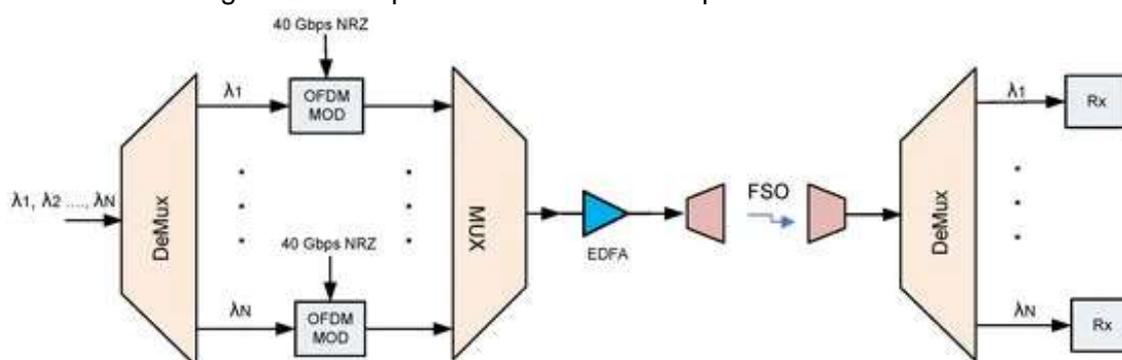
Fuente: (Rea, 2017)

## 6. Multiplexores de división de longitud de onda (WDMs):

Los WDMs permiten que múltiples señales ópticas a diferentes longitudes de onda (ver Figura 2.8) se transmitan simultáneamente a través de una sola fibra, aumentando la capacidad del sistema (Kartalopoulos, 2017).

La interacción de estos componentes permite la transmisión eficiente de datos a través de sistemas de fibra óptica. Los pulsos de luz generados por el transmisor se acoplan a la fibra óptica, donde se propagan con una pérdida y distorsión mínimas. En el extremo receptor, la señal óptica es detectada, amplificada y procesada para recuperar la información original.

Figura 2. 8: Representación de la multiplexación WDM.



Fuente: (El-Nahal et al., 2022)

### 2.1.2. Ventajas y desafíos.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica ofrecen numerosas ventajas sobre los sistemas tradicionales basados en cobre, pero también presentan desafíos únicos. Comprender estos factores es crucial para la implementación y gestión efectiva de las redes de fibra óptica.

Ventajas:

- ✓ Alto ancho de banda: los sistemas de fibra óptica pueden transmitir mucho más datos que los cables de cobre. Una sola fibra óptica puede transportar terabits de datos por segundo, satisfaciendo la demanda cada vez mayor de ancho de banda en las comunicaciones modernas (Keiser, 2021).
- ✓ Baja atenuación de la señal: las fibras ópticas experimentan mucha menos pérdida de señal en comparación con los cables de cobre, permitiendo distancias de transmisión más largas sin necesidad de

regeneración de señal. Esto es particularmente ventajoso para las comunicaciones de larga distancia (Agrawal, 2019).

- ✓ Inmunidad a la interferencia electromagnética: a diferencia de los cables de cobre, las fibras ópticas no se ven afectadas por la interferencia electromagnética o la interferencia de radiofrecuencia. Esto las hace ideales para entornos con alto ruido eléctrico (Mynbaev & Scheiner, 2020).
- ✓ Ligeras y compactas: los cables de fibra óptica son mucho más ligeros y delgados que los cables de cobre de capacidad equivalente. Esto facilita la instalación y reduce el espacio físico requerido para las rutas de cables (Kartalopoulos, 2017).
- ✓ Mayor seguridad: es extremadamente difícil intervenir un cable de fibra óptica sin detección, proporcionando un nivel más alto de seguridad para la transmisión de datos sensibles (Keiser, 2021).
- ✓ Bajo consumo de energía: los sistemas de fibra óptica generalmente requieren menos energía para la transmisión de señales en comparación con los sistemas basados en cobre, lo que lleva a ahorros de energía en redes a gran escala (Agrawal, 2019).

Desafíos:

- ✓ Costos de instalación: el costo de los componentes de fibra óptica ha disminuido con el tiempo, la instalación inicial de sistemas de fibra óptica aún puede ser más costosa que los sistemas basados en cobre, particularmente en términos de equipos especializados y mano de obra calificada (Mynbaev & Scheiner, 2020).
- ✓ Fragilidad: Las fibras ópticas son más delicadas que los cables de cobre y pueden dañarse si se doblan demasiado bruscamente o se someten a estrés físico. Esto requiere un manejo cuidadoso durante la instalación y el mantenimiento (Kartalopoulos, 2017).
- ✓ Reparaciones complejas: La reparación de cables de fibra óptica dañados a menudo requiere equipos y experiencia especializados, lo que puede llevar a tiempos de inactividad más largos en caso de roturas de cables (Keiser, 2021).

- ✓ **Dispersión:** en transmisiones de larga distancia, varias formas de dispersión (cromática, modal, de modo de polarización) pueden causar degradación de la señal. Aunque existen técnicas para mitigar estos efectos, añaden complejidad al diseño del sistema (Agrawal, 2019).
- ✓ **Efectos no lineales:** a altos niveles de potencia óptica, los efectos no lineales en la fibra pueden causar distorsión de la señal. Gestionar estos efectos se vuelve crucial en sistemas de alta capacidad y larga distancia (Mynbaev & Scheiner, 2020).
- ✓ **Compatibilidad con la infraestructura existente:** la integración de sistemas de fibra óptica con redes existentes basadas en cobre puede ser desafiante y puede requerir equipos de interfaz adicionales (Kartalopoulos, 2017).

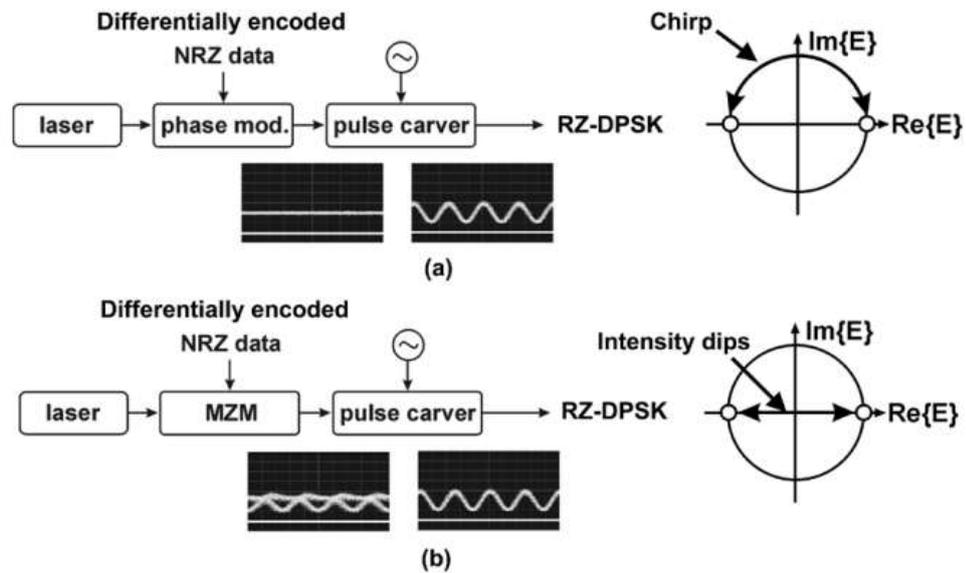
A pesar de estos desafíos, las ventajas de los sistemas de comunicación por fibra óptica han llevado a su adopción generalizada en varios sectores, desde las telecomunicaciones hasta los centros de datos y más allá. La investigación y el desarrollo continuos siguen abordando estos desafíos, mejorando aún más el rendimiento y la rentabilidad de las tecnologías de fibra óptica.

## **2.2. Modulación DPSK y sistemas DWDM**

La modulación por desplazamiento de fase diferencial (*Differential Phase-Shift Keying, DPSK*) y los sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densa (*Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM*) se han convertido en componentes integrales de las redes modernas de comunicación óptica (Mao et al., 2017). DPSK ofrece una mejor sensibilidad del receptor y tolerancia a las no linealidades de la fibra en comparación con la modulación tradicional de encendido-apagado (*On-Off Keying, OOK*).

Por otro lado, DWDM permite un uso eficiente del ancho de banda de la fibra al transmitir múltiples longitudes de onda en una sola fibra (Gill & Dewra, 2017). La Figura 2.9 muestra la representación de un transmisor usando modulación DPSK.

Figura 2. 9: Representación del transmisor DPSK, (a) implementación con modulador de fase, y (b) implementación con modulador Mach-Zehnder.



Fuente: (Abril A., 2008)

La combinación de la modulación DPSK con sistemas DWDM ha llevado a avances significativos en la comunicación óptica, permitiendo mayores velocidades de datos, distancias de transmisión más largas y una mejor eficiencia espectral. Esta sinergia ha sido particularmente crucial para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda en redes de larga distancia y metropolitanas (Zheng et al., 2018).

Investigaciones recientes como en Zdravecký et al., (2022) en la que mediante técnicas de amplificación optimizaba el rendimiento de sistemas de comunicación de fibra óptica. Además, se han centrado en optimizar los formatos de modulación DPSK para sistemas DWDM, incluyendo el desarrollo de esquemas de modulación avanzados como el Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (*Differential Quadrature Phase-Shift Keying, DQPSK*) y el DPSK Multiplexado por División de Polarización (*Polarization Division Multiplexing, PDM-DPSK*). Estos formatos avanzados ofrecen una eficiencia espectral aún mayor y una mejor tolerancia a las deficiencias de transmisión (Liu, 2019).

Además, la integración de técnicas de detección coherente con DPSK en sistemas DWDM ha abierto nuevas posibilidades para el procesamiento

avanzado de señales digitales (*Digital Signal Processing, DSP*) en el receptor, permitiendo la compensación de varias deficiencias de transmisión y mejorando aún más el rendimiento del sistema (Wang et al., 2015).

A medida que las redes ópticas continúan evolucionando, el papel de la modulación DPSK en los sistemas DWDM sigue siendo significativo, particularmente en escenarios donde se requiere un equilibrio entre rendimiento, complejidad y costo (Nanou et al., 2017).

### **2.2.1. Fundamentos de la modulación DPSK.**

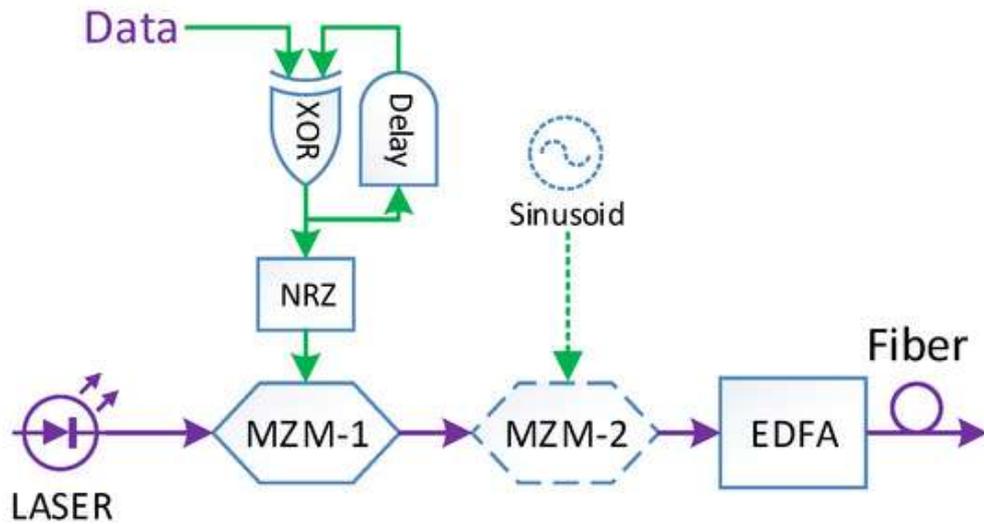
DPSK es una técnica de modulación de fase donde la información se codifica en la diferencia de fase entre símbolos consecutivos, en lugar de en la fase absoluta de cada símbolo. Este enfoque ofrece varias ventajas sobre las técnicas tradicionales de modulación de intensidad, particularmente en sistemas de comunicación óptica (Kikuchi, 2016).

En DPSK, un '1' binario se representa por un cambio de fase de  $\pi$  en relación con el bit anterior, mientras que un '0' binario se representa por ningún cambio de fase. Este esquema de codificación proporciona una robustez inherente contra el ruido de fase y permite diseños de receptores más simples en comparación con los sistemas de detección coherente (Zhao et al., 2019).

El proceso de modulación en DPSK típicamente involucra un modulador Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator, MZM*) impulsado por un precodificador diferencial. El precodificador convierte los datos binarios de entrada en un formato codificado diferencialmente adecuado para impulsar el MZM. El MZM luego imparte los cambios de fase apropiados sobre la portadora óptica (Li et al., 2023).

La Figura 2.10 muestra un diagrama esquemático de un proceso de modulación DPSK basado en MZM, que son los más utilizados en los sistemas de transmisión DPSK.

Figura 2. 10: Representación esquemática de la modulación DPSK en el transmisor.

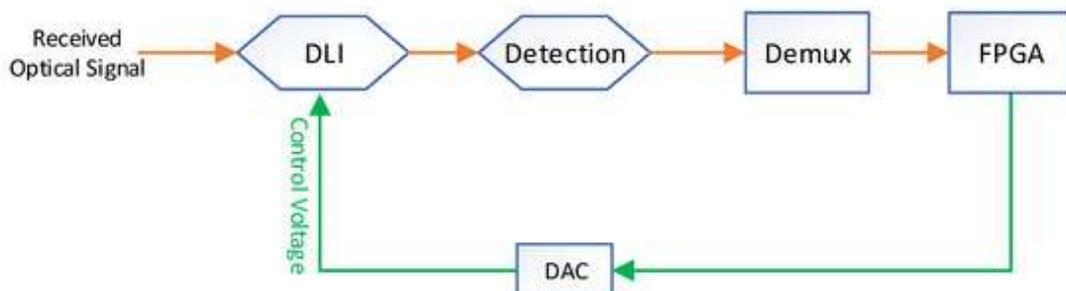


Fuente: (Zhou & Liang, 2021)

En el receptor, la demodulación DPSK se puede lograr utilizando detección directa con un interferómetro de línea de retardo (DLI) o técnicas de detección coherente. El enfoque basado en DLI, también conocido como detección diferencial, compara la fase de cada bit con la del bit anterior, convirtiendo la modulación de fase en modulación de intensidad que puede ser detectada por un fotodiodo estándar (Ip, 2018).

En la Figura 2.11 se muestra un receptor DPSK diseñado por Zhou & Liang, (2021). Este receptor se aplicó en un sistema de transmisión DWDM, y la tasa de símbolos fue de 43 Gbps. Fue aplicado en un dispositivo FPGA para procesar las tramas recibidas.

Figura 2. 11: Representación esquemática de la modulación DPSK receptor.



Fuente: (Zhou & Liang, 2021)

La detección coherente de DPSK, por otro lado, implica mezclar la señal recibida con un oscilador local y utilizar técnicas avanzadas de procesamiento

de señales digitales (DSP). Este enfoque ofrece una mejor sensibilidad y permite técnicas de ecualización avanzadas, pero a costa de una mayor complejidad del receptor (Abbass & Fyath, 2024).

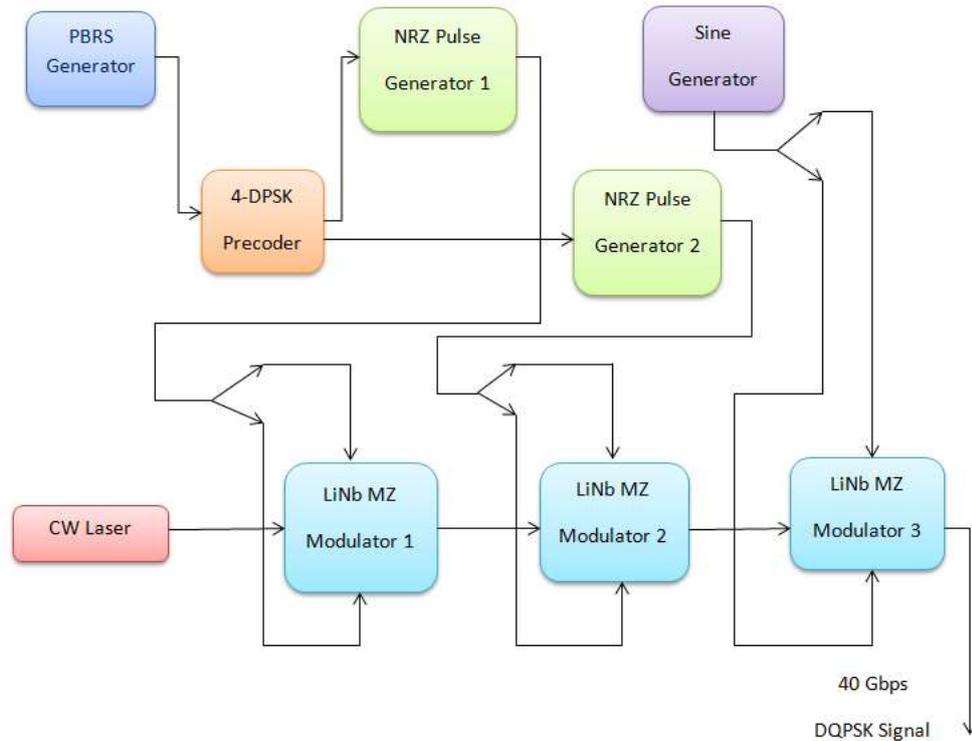
Una de las principales ventajas de DPSK es su mejora de 3 dB en la sensibilidad del receptor en comparación con la modulación de Encendido-Apagado (*On-Off Keying, OOK*) para la misma potencia óptica promedio. Esta mejora proviene del esquema de detección balanceada típicamente utilizado en los receptores DPSK, que efectivamente duplica la amplitud de la señal (Zheng et al., 2018).

DPSK también exhibe una mejor tolerancia a las no linealidades de la fibra, particularmente en sistemas con altas potencias de lanzamiento. Esto se debe a la naturaleza de intensidad constante de las señales DPSK, que reduce el impacto de la modulación automodulada de fase (*Self-Phase Modulation, SPM*) y la modulación de fase cruzada (*Cross-Phase Modulation, XPM*) en la transmisión por fibra (Anjum et al., 2019; Stojanovic & Changsong, 2016).

Se han desarrollado variantes avanzadas de DPSK, como DQPSK y PDM-DPSK, para mejorar aún más la eficiencia espectral y el rendimiento del sistema. DQPSK codifica dos bits por símbolo utilizando cuatro estados de fase, duplicando la eficiencia espectral en comparación con el DPSK estándar. PDM-DPSK utiliza ambos estados de polarización de la luz para duplicar la velocidad de datos sin aumentar la tasa de símbolos (Wang et al., 2015).

La Figura 2.12 muestra la implementación de un transmisor DQPSK denominado modulador I-Q que consta de un generador de secuencias de bits pseudoaleatorios (*Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS*), un precodificador DPSK, generadores de impulsos de No Retorno a Cero (Non-Return-to-Zero, NRZ) y tres MZM concatenados para conseguir estabilidad de fase. (Sharan et al., 2016)

Figura 2. 12: Representación esquemática del transmisor con modulación DQPSK.



Fuente: (Sharan et al., 2016)

La implementación de DPSK en sistemas prácticos requiere una cuidadosa consideración de varios factores, incluyendo el ancho de línea del láser, la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización (PMD). DQPSK reduce la tasa de símbolos en un factor de dos, con lo que se reducen los requisitos de ancho de banda del transmisor y el receptor, lo que permite un espaciado muy estrecho entre canales y una supresión eficaz de los efectos PMD y CD.

Se han desarrollado técnicas avanzadas de DSP, como la ecualización adaptativa y la recuperación de fase de portadora, para mitigar estas deficiencias y optimizar el rendimiento de DPSK en escenarios del mundo real (Nanou et al., 2017).

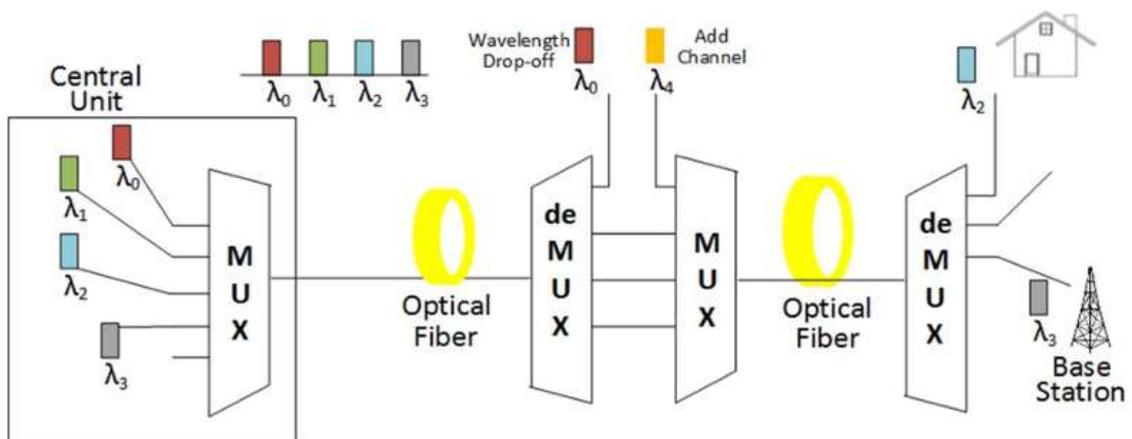
A medida que los sistemas de comunicación óptica continúan evolucionando, DPSK sigue siendo un formato de modulación relevante, particularmente en aplicaciones donde se requiere un equilibrio entre rendimiento, complejidad y costo. Sus ventajas inherentes y compatibilidad

con técnicas avanzadas lo convierten en una herramienta valiosa en el arsenal de los ingenieros de comunicación óptica (Gill & Dewra, 2017).

### 2.2.2. Características de los sistemas DWDM.

DWDM es una tecnología que ha revolucionado los sistemas de comunicación óptica al aumentar dramáticamente la capacidad de las redes de fibra óptica. La Figura 2.13 muestra el diagrama de bloques de los sistemas de comunicación óptica basados en DWDM, en los que varios usuarios transmiten sus datos a través de una única fibra desde la unidad central (*Central Unit, CU*) utilizando diferentes longitudes de onda (Ali et al., 2021).

Figura 2. 13: Representación esquemática de un sistema DWDM basada en redes ópticas.



Fuente: (Ali et al., 2021)

Las longitudes de onda se combinan mediante un multiplexor y se transmite una señal compuesta a través de la fibra. Una de las ventajas de utilizar DWDM es la flexibilidad de la red, ya que la longitud de onda de interés puede abandonarse en un nodo intermedio, como se muestra en la Figura 2.13.

Los sistemas DWDM multiplexan múltiples señales portadoras ópticas en una sola fibra óptica utilizando diferentes longitudes de onda de luz láser, creando efectivamente múltiples fibras virtuales dentro de una sola fibra física (Winzer, 2015). La característica clave de los sistemas DWDM es su capacidad para transmitir múltiples canales de alta capacidad sobre una sola fibra. Los sistemas DWDM comerciales actuales pueden soportar hasta 96

canales por fibra, con cada canal capaz de transportar 100 Gbps o más. Esto resulta en una capacidad total del sistema que puede superar los 10 Tbps por fibra (Zhang et al., 2018).

El espaciado de canales es un parámetro crítico en los sistemas DWDM. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) ha estandarizado las longitudes de onda DWDM, con espaciados de canal típicos de 100 GHz, 50 GHz, o incluso 25 GHz en sistemas avanzados. Un espaciado de canales más estrecho permite más canales por fibra, pero requiere un control y filtrado de longitud de onda más precisos (Zhao et al., 2019).

Los sistemas DWDM operan principalmente en la banda C (1530-1565 nm) y la banda L (1565-1625 nm) del espectro óptico, donde la atenuación de la fibra es menor y los amplificadores ópticos son más efectivos. Algunos sistemas avanzados también utilizan la banda S (1460-1530 nm) para aumentar aún más la capacidad (Ip et al., 2018).

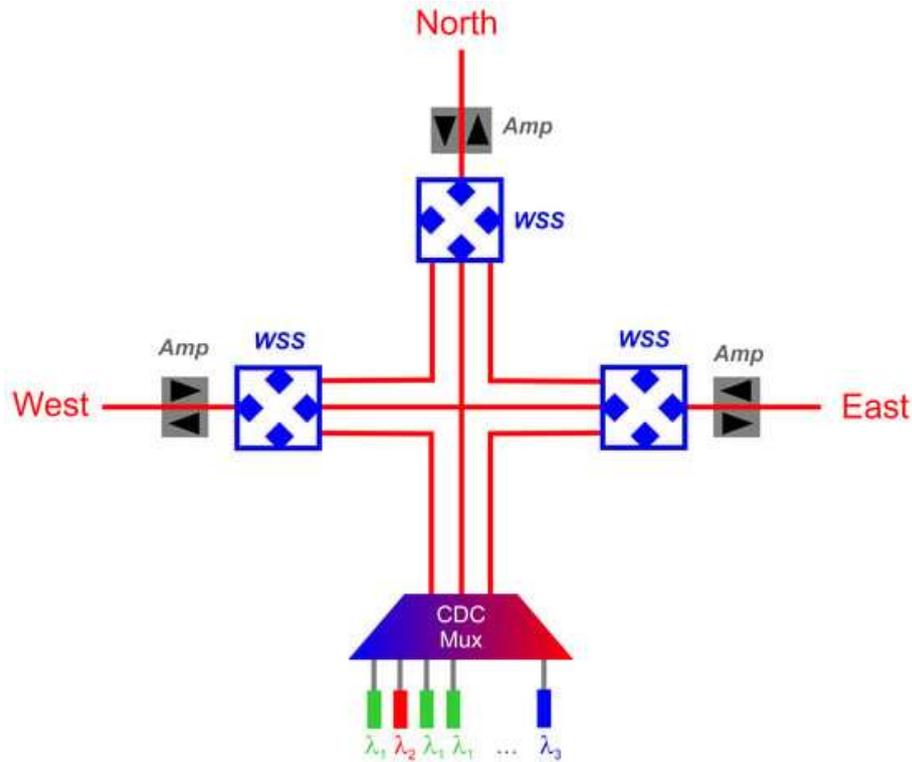
Los amplificadores ópticos, particularmente los EDFAs, son componentes cruciales en los sistemas DWDM. Permiten la transmisión de larga distancia al amplificar simultáneamente todos los canales de longitud de onda sin necesidad de conversión Óptico-Eléctrico-Óptico (Optical-Electrical-Optical, OEO) (Abbass & Fyath, 2024).

Los conmutadores selectivos de longitud de onda (*Wavelength Selective Switch, WSS*) y los multiplexores ópticos de adición-extracción reconfigurables (*Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexers, ROADMs*) son tecnologías clave que permiten redes DWDM flexibles y dinámicas. Estos componentes permiten la reconfiguración remota de las rutas de longitud de onda, permitiendo una gestión eficiente de la red y la implementación de conceptos de redes definidas por software (*Software-Defined Networking, SDN*) en el dominio óptico (Liu, 2019).

Por ejemplo, los multiplexores ópticos de adición sin color, sin dirección y sin retención reconfigurables (*Colorless, Directionless and Contentionless,*

CDC-ROADM) se han convertido en un elemento importante de los sistemas de transmisión óptica desplegados por los principales operadores de redes de todo el mundo. La figura 2.14 muestra un diagrama esquemático de un CDC-ROADM. Mediante los CDC-ROADM, los operadores de redes ópticas pueden conectar remotamente cualquier longitud de onda desde cualquier transpondedor a cualquier dirección (ver Figura 2.14).

Figura 2. 14: Representación esquemática de un CDC-ROADM convencional.



Fuente: (Kozdrowski et al., 2019)

La gestión de la dispersión es crítica en los sistemas DWDM debido a las diferentes velocidades de propagación de varias longitudes de onda en la fibra óptica. Se utilizan comúnmente fibras de compensación de dispersión (*Dispersion Compensation Fiber, DCF*) y formatos de modulación avanzados con compensación electrónica de dispersión para mitigar este efecto (Wang et al., 2015).

Los efectos no lineales, como la mezcla de cuatro ondas (*Four-Wave Mixing, FWM*) y XPM, se vuelven más pronunciados en los sistemas DWDM debido a la alta densidad de potencia en la fibra (Bahrami et al., 2020; Bahrani et al., 2018). Es necesario un cuidadoso diseño del sistema, incluyendo la

optimización del espaciado de canales y los niveles de potencia, para minimizar estos efectos (Muhammad et al., 2021).

Los formatos de modulación avanzados y las técnicas de detección coherente han mejorado significativamente las capacidades de los sistemas DWDM (Bahrami et al., 2020). Formatos como la Modulación por Desplazamiento de Fase en Cuadratura (*Quadrature Phase Shift Keying, QPSK*) y la Modulación de Amplitud en Cuadratura de 16 niveles (*16-Quadrature Amplitude Modulation, 16-QAM*), combinados con la multiplexación por polarización, han permitido tasas de datos por canal de 100 Gbps, 200 Gbps y más allá (Zheng et al., 2018).

La gestión y monitorización de los sistemas DWDM requieren técnicas sofisticadas de monitorización del rendimiento óptico, tales como los medidores de potencia óptica (*Optical Power Meter, OPM*). Estas incluyen el análisis del espectro óptico, la medición de la relación señal-ruido óptica (*Optical Signal-to-Noise Ratio, OSNR*). Por ejemplo, en Paz et al., (2018) se han investigado técnicas algoritmos avanzados de DSP para la compensación de deficiencias y la optimización del rendimiento de sistemas de comunicaciones ópticas.

A medida que los sistemas DWDM continúan evolucionando, la investigación se está centrando en expandir aún más su capacidad. Esto incluye la exploración de nuevas ventanas de transmisión, el desarrollo de amplificadores de banda ultra ancha, y la investigación de técnicas de multiplexación por división espacial (*Space Division Multiplexing, SDM*) para superar los límites de capacidad de las fibras monomodo (Li et al., 2023).

### **2.2.3. Ventajas de DPSK en sistemas DWDM.**

La integración de la modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (DPSK) en sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM) ofrece varias ventajas significativas, convirtiéndola en una opción atractiva para redes de comunicación óptica de alta capacidad y larga distancia (Zhao et al., 2019).

Una de las principales ventajas de DPSK en sistemas DWDM es su mejor sensibilidad del receptor en comparación con la modulación tradicional de encendido-apagado (OOK). DPSK ofrece una mejora de 3 dB en la sensibilidad del receptor para la misma potencia óptica promedio, lo que se traduce en un aumento de la distancia de transmisión o una reducción de los requisitos de amplificación óptica. Esta mejora es particularmente valiosa en sistemas DWDM de larga distancia donde es crucial maximizar el alcance entre los puntos de regeneración óptico-eléctrico-óptico (OEO) (Winzer, 2015).

DPSK también exhibe una mayor tolerancia a las no linealidades de la fibra, lo cual es una preocupación significativa en sistemas DWDM de alta potencia. La naturaleza de intensidad constante de las señales DPSK reduce el impacto de la automodulación de fase (SPM) y la modulación de fase cruzada (XPM). Esta mejor tolerancia no lineal permite mayores potencias de lanzamiento, lo que puede extender la distancia de transmisión o aumentar el número de canales de longitud de onda en el sistema (Nanou et al., 2017).

En sistemas DWDM, donde múltiples canales coexisten en proximidad espectral cercana, la resistencia de DPSK a la diafonía entre canales es particularmente ventajosa. El esquema de detección balanceada típicamente utilizado en los receptores DPSK ayuda a suprimir el ruido de modo común, incluyendo la diafonía de canales adyacentes. Esta característica permite un espaciado de canales más estrecho o un mejor rendimiento del sistema a un espaciado dado (Ip et al., 2018).

La compatibilidad de DPSK con técnicas de detección coherente es otra ventaja significativa en sistemas DWDM. El DPSK coherente permite el uso de algoritmos avanzados de procesamiento de señales digitales (DSP) en el receptor, permitiendo la compensación de deficiencias de transmisión como la dispersión cromática y la dispersión por modo de polarización (PMD). Esta capacidad es particularmente valiosa en sistemas DWDM de larga distancia donde estas deficiencias pueden ser significativas (Karlsson et al., 2017).

El esquema de detección balanceada de DPSK también proporciona una mejor resistencia a los efectos dependientes del patrón en comparación con OOK. Esta característica es beneficiosa en sistemas DWDM donde la interacción entre múltiples canales de alta velocidad puede exacerbar las no linealidades dependientes del patrón (Liu, 2019).

La eficiencia espectral de los sistemas DWDM puede mejorarse aún más utilizando variantes avanzadas de DPSK, como el Desplazamiento de Fase en Cuadratura Diferencial (DQPSK) o el DPSK Multiplexado por División de Polarización (PDM-DPSK). Estos formatos permiten mayores tasas de bits por canal de longitud de onda sin aumentar la tasa de símbolos, manteniendo así la compatibilidad con la infraestructura DWDM existente (Wang et al., 2015).

DPSK también ofrece ventajas en términos de procesamiento de señales totalmente ópticas en redes DWDM. Técnicas como la conversión de longitud de onda totalmente óptica y la regeneración totalmente óptica suelen ser más sencillas de implementar con señales moduladas en fase como DPSK en comparación con las señales moduladas en intensidad (Gill & Dewra, 2017).

La implementación de DPSK en sistemas DWDM puede suponer un ahorro de costes en determinados escenarios. Aunque los transmisores DPSK pueden ser más complejos que los transmisores OOK, el rendimiento mejorado puede reducir la necesidad de amplificación en línea o compensación de dispersión, lo que potencialmente reduce los costes generales del sistema (Zheng et al., 2018).

En los sistemas DWDM submarinos, donde maximizar la capacidad en distancias ultralargas es primordial, las ventajas de DPSK en términos de sensibilidad del receptor y tolerancia no lineal son particularmente valiosas. Estas características permiten aumentar el espaciado entre repetidores o las capacidades por fibra en estos entornos difíciles (Nanou et al., 2017).

A medida que los sistemas DWDM sigan evolucionando hacia mayores capacidades y arquitecturas de red más dinámicas, es probable que las

ventajas de DPSK sigan siendo relevantes. Su compatibilidad con técnicas DSP avanzadas y tecnologías emergentes como la multiplexación por división espacial (SDM) posiciona a DPSK como un formato de modulación valioso en el desarrollo continuo de los sistemas de comunicación óptica (Li et al., 2023).

### **2.3. Dispersión Cromática.**

La dispersión cromática es un fenómeno fundamental en las comunicaciones ópticas que impacta significativamente el rendimiento de los sistemas de fibra óptica. Se refiere a la naturaleza dependiente de la longitud de onda de la propagación de la luz en las fibras ópticas, causando que diferentes componentes espectrales de una señal óptica viajen a diferentes velocidades. Este efecto conduce al ensanchamiento de pulsos y a la distorsión de señales, limitando en última instancia la distancia de transmisión y la tasa de datos en los sistemas de comunicación óptica (Agrawal, 2019).

El concepto de dispersión cromática surge de la interacción entre la luz y las propiedades materiales de la fibra óptica. A medida que un pulso óptico se propaga a través de una fibra, experimenta dos tipos principales de dispersión: (1) material y (2) +guía de onda. La combinación de estos efectos resulta en la dispersión cromática total de la fibra (Keiser, 2021).

La dispersión material es inherente a la composición del vidrio de la fibra y se deriva de la variación del índice de refracción con la longitud de onda. Este fenómeno está estrechamente relacionado con las resonancias electrónicas y vibracionales del material. En las fibras de sílice, el índice de refracción generalmente disminuye con el aumento de la longitud de onda en la región espectral utilizada para las comunicaciones ópticas (típicamente 1300-1600 nm). En consecuencia, las longitudes de onda más largas viajan más rápido que las longitudes de onda más cortas, lo que lleva a la dispersión de pulsos (Kaminow et al., 2013).

La dispersión de guía de onda, por otro lado, es resultado de la estructura geométrica de la fibra y la distribución de luz entre el núcleo y el revestimiento. Depende de parámetros de la fibra como el radio del núcleo y

la diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento. La dispersión de guía de onda puede ser diseñada para compensar parcialmente la dispersión material, permitiendo la creación de fibras con dispersión desplazada y dispersión aplanada (Li & Nolan, 2008).

La dispersión cromática total en una fibra se expresa típicamente en términos del parámetro de dispersión  $D$ , medido en ps/(nm·km). Este parámetro cuantifica la dispersión temporal de un pulso por unidad de longitud de onda y por unidad de longitud de fibra. Matemáticamente, se puede expresar como:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \frac{d^2 n_{eff}}{d\lambda^2} \quad (2.1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $\lambda$  es la longitud de onda, y  $n_{eff}$  es el índice de refracción efectivo del modo de la fibra (Mynbaev & Scheiner, 2001).

Para fibras monomodo estándar (SMF), el parámetro de dispersión varía con la longitud de onda y típicamente cruza cero alrededor de 1310 nm. Esta longitud de onda se conoce como la longitud de onda de dispersión cero (ZDW). En longitudes de onda por debajo de la ZDW, la fibra exhibe dispersión normal ( $D < 0$ ), donde las longitudes de onda más largas viajan más lentas que las longitudes de onda más cortas. Por encima de la ZDW, la fibra muestra dispersión anómala ( $D > 0$ ), con longitudes de onda más largas viajando más rápido (Ghatak & Thyagarajan, 1998).

El manejo de la dispersión cromática es crucial en el diseño y optimización de sistemas de comunicación óptica. A medida que aumentan las tasas de datos y se extienden las distancias de transmisión, los efectos de la dispersión cromática se vuelven más pronunciados, llevando a la interferencia intersímbolo (ISI) y reduciendo la calidad de la señal. Se han desarrollado varias estrategias para mitigar estos efectos, incluyendo:

- ✓ Fibras de dispersión desplazada (DSF): Estas fibras están diseñadas para tener su longitud de onda de dispersión cero

desplazada a la región de 1550 nm, donde la atenuación de la fibra es mínima.

- ✓ Fibras compensadoras de dispersión (DCF): Estas fibras especializadas tienen una gran dispersión negativa para contrarrestar la dispersión positiva acumulada en las fibras estándar.
- ✓ Redes de Bragg en fibra (FBG): Estas variaciones periódicas en el índice de refracción de la fibra pueden ser diseñadas para proporcionar un retardo dependiente de la longitud de onda, compensando la dispersión cromática.
- ✓ Compensación de dispersión electrónica (EDC): Técnicas de procesamiento digital de señales implementadas en el receptor pueden ayudar a mitigar los efectos de la dispersión cromática.
- ✓ Conjugación de fase óptica: Esta técnica implica crear una réplica conjugada de fase de la señal a mitad de la transmisión para revertir los efectos de la dispersión en la segunda mitad del enlace (Ip & Kahn, 2008).

Comprender y manejar la dispersión cromática es esencial para el avance continuo de las tecnologías de comunicación óptica. A medida que avanzamos hacia tasas de datos más altas y distancias de transmisión más largas, las técnicas innovadoras de manejo de dispersión y los diseños de fibra jugarán un papel crucial en superar las limitaciones impuestas por este fenómeno físico fundamental.

### **2.3.1. Causas y Efectos de la Dispersión Cromática.**

Las causas fundamentales de la dispersión cromática en las fibras ópticas pueden atribuirse a dos factores principales: dispersión material y dispersión de guía de onda. Comprender estas causas es crucial para desarrollar estrategias efectivas para mitigar su impacto en los sistemas de comunicación óptica.

#### **1. Dispersión material:**

La dispersión material es una propiedad intrínseca del vidrio utilizado en las fibras ópticas, principalmente sílice. Surge de la dependencia del índice de refracción con la longitud de onda, que es una consecuencia de la interacción

entre la luz y las resonancias electrónicas y vibracionales del material (Paschotta, 2021). El índice de refracción de la sílice varía con la longitud de onda debido a varios factores:

- a) Resonancias electrónicas: En longitudes de onda ultravioleta, la energía del fotón se aproxima a la de las transiciones electrónicas en la sílice, causando una fuerte absorción y un cambio rápido en el índice de refracción.
- b) Resonancias vibracionales: En la región infrarroja, las vibraciones moleculares de la estructura de sílice influyen en el índice de refracción.
- c) Interacciones no resonantes: Entre estos extremos, donde ocurre la mayoría de las comunicaciones ópticas, el índice de refracción varía más lentamente pero aun significativamente con la longitud de onda.

La ecuación de Sellmeier proporciona una buena aproximación de esta dependencia de la longitud de onda:

$$n^2(\lambda) = 1 + \sum_{i=1}^m \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \quad (2.2)$$

donde  $B_i$  y  $C_i$  son coeficientes de Sellmeier determinados experimentalmente (Malitson, 1965).

## **2. Dispersión de Guía de Onda:**

La dispersión de guía de onda es resultado de la geometría de la fibra y la distribución de luz entre el núcleo y el revestimiento. Depende de varios factores:

- a) Diferencia de índice núcleo-revestimiento: La diferencia de índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento afecta cuán estrechamente se confina la luz en el núcleo.
- b) Diámetro del núcleo: El tamaño del núcleo influye en el diámetro del campo modal y, consecuentemente, en la cantidad de luz que se propaga en el revestimiento.

- c) Longitud de onda: Las longitudes de onda más largas tienden a extenderse más en el revestimiento, afectando el índice de refracción efectivo del modo guiado.

La dispersión de guía de onda puede expresarse matemáticamente usando la frecuencia normalizada  $V$  y el factor de retardo de grupo  $b$ :

$$D_{\omega} = -\frac{n_1 \Delta}{c\lambda} \left[ V \frac{d^2(V_b)}{dV^2} \right] \quad (2.3)$$

donde  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo,  $\Delta$  es la diferencia de índice relativa,  $c$  es la velocidad de la luz,  $\lambda$  es la longitud de onda, y  $V$  es la frecuencia normalizada (Gambling et al., 1979).

Los efectos de la dispersión cromática son de largo alcance y afectan significativamente el rendimiento de los sistemas de comunicación óptica. Los efectos principales incluyen:

### **1. Ensanchamiento de Pulsos:**

A medida que diferentes componentes espectrales de un pulso óptico viajan a diferentes velocidades, el pulso se ensancha en el tiempo a medida que se propaga a lo largo de la fibra. Este ensanchamiento puede cuantificarse por:

$$\Delta T = L \cdot D \cdot \Delta\lambda \quad (2.4)$$

donde  $\Delta T$  es el ensanchamiento del pulso,  $L$  es la longitud de la fibra,  $D$  es el parámetro de dispersión, y  $\Delta\lambda$  es el ancho espectral del pulso (Agrawal, 2019).

El ensanchamiento de pulsos conduce a varios efectos perjudiciales:

- a) Interferencia Intersímbolo (ISI): A medida que los pulsos se ensanchan, comienzan a superponerse con pulsos adyacentes, dificultando que el receptor distinga entre bits individuales.
- b) Reducción de la Apertura del Ojo: En el análisis de diagramas de ojo, la dispersión cromática causa que el ojo se cierre, reduciendo el margen de decisión para la detección de bits.

- c) Aumento de la Tasa de Error de Bit (BER): Como consecuencia de la ISI y la reducción de la apertura del ojo, la BER del sistema aumenta, degradando el rendimiento general.

## **2. Desvanecimiento de Potencia en Sistemas Analógicos:**

En sistemas ópticos analógicos, como los utilizados en aplicaciones de radio sobre fibra, la dispersión cromática puede causar desvanecimiento de potencia. Esto ocurre porque diferentes componentes de frecuencia de la señal modulada experimentan diferentes cambios de fase, llevando a interferencia destructiva en el receptor (Schmuck, 1995).

## **3. Efectos No Lineales Inducidos por Dispersión:**

La dispersión cromática interactúa con las no linealidades de la fibra de formas complejas:

- a) Inestabilidad de Modulación: En el régimen de dispersión anómala, la interacción entre la dispersión y la automodulación de fase puede llevar a la ruptura de ondas continuas en un tren de pulsos cortos.
- b) Mezcla de Cuatro Ondas (FWM): La dispersión cromática afecta las condiciones de ajuste de fase para FWM, influyendo en la eficiencia de este proceso no lineal en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM).
- c) Modulación de Fase Cruzada (XPM): La dispersión causa un desajuste entre pulsos en diferentes canales, afectando la fuerza de las distorsiones inducidas por XPM (Karlsson, 1998).

## **4. Limitaciones en la Distancia de Transmisión y la Tasa de Datos:**

La acumulación de dispersión cromática sobre largas distancias impone límites en el rendimiento del sistema:

- a) Limitación de Distancia: Para una tasa de bits y formato de modulación dados, hay una distancia máxima de transmisión más allá de la cual la señal se vuelve demasiado distorsionada para una detección confiable.

- b) Limitación de Tasa de Bits: Similarmente, para una distancia fija, hay una tasa de bits máxima alcanzable antes de que las distorsiones inducidas por dispersión se vuelvan inmanejables.

Estas limitaciones a menudo se expresan en términos del producto dispersión-longitud, L·D, que proporciona una medida de la tolerancia del sistema a la dispersión cromática (Kaminow et al., 2013).

### **5. Rendimiento Dependiente de la Longitud de Onda:**

Debido a la dependencia de la longitud de onda de la dispersión cromática, diferentes canales en un sistema WDM pueden experimentar niveles variables de distorsión inducida por dispersión. Esto puede llevar a desafíos en el diseño del sistema y necesitar estrategias de compensación de dispersión específicas para cada canal (Kikuchi, 2016).

### **6. Deterioros en Sistemas Coherentes:**

En sistemas ópticos coherentes avanzados, la dispersión cromática afecta la fase de la señal óptica. Aunque el procesamiento digital de señales puede compensar gran parte de este efecto, la dispersión residual aún puede impactar el rendimiento del sistema, particularmente en presencia de ruido de fase del láser y efectos no lineales (Alimi et al., 2021).

Comprender estas causas y efectos es crucial para diseñar sistemas de comunicación óptica robustos. Informa el desarrollo de técnicas de manejo de dispersión, guía la elección de formatos de modulación y esquemas de detección, e influye en el diseño de las propias fibras ópticas. A medida que las tasas de datos continúan aumentando y las redes se vuelven más complejas, abordar los desafíos planteados por la dispersión cromática sigue siendo un área clave de investigación y desarrollo en las comunicaciones ópticas.

## **Capítulo 3: Diseño, Simulación y Análisis de Resultados**

### **3.1. Descripción del diseño e implementación de un sistemas DWDM para optimización de enlaces mediante modulación de fase.**

En los sistemas de transmisión óptica DWDM de alta velocidad, el uso de formatos de modulación adecuados con buena eficiencia espectral ayuda a mitigar eficazmente las deficiencias de transmisión no lineales. La investigación sobre el impacto de los efectos no lineales en la degradación de la señal, que limitan la velocidad y la longitud de los enlaces DWDM, ha sido significativa.

PSK es una técnica de modulación digital que codifica la información mediante variaciones en la fase de la señal. Mientras que la modulación de fase ha demostrado un rendimiento superior en los sistemas de comunicación eléctrica, sus beneficios potenciales están siendo cada vez más explorados en sistemas de codificación óptica. La aplicación de PSK en comunicaciones ópticas muestra un potencial prometedor para mejorar la eficiencia y fiabilidad de la transmisión de datos.

Este capítulo se examina el rendimiento del formato de modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) en sistemas de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM). DPSK ha demostrado en la revisión de la literatura ser un potencial significativo para actualizar la infraestructura de transmisión DWDM existente de 10 Gbps para soportar tecnología de 40 Gbps. Estos formatos de modulación avanzados ofrecen una mejor eficiencia espectral y resistencia a las deficiencias de transmisión, convirtiéndolos en opciones atractivas para las comunicaciones ópticas de alta velocidad.

### **3.2. Diseño de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM.**

En esta sección se explora la viabilidad de la modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial (DPSK) para un enlace óptico de Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM) de larga distancia y alta capacidad, operando a 1.28 Tbps. La investigación se lleva a

cabo mediante un modelo de diseño propuesto, basado en estudios de simulación de un sistema de transmisión de 32 canales. Este enfoque permite una evaluación exhaustiva del rendimiento de DPSK en redes ópticas avanzadas, considerando factores como la eficiencia espectral y las deficiencias de transmisión.

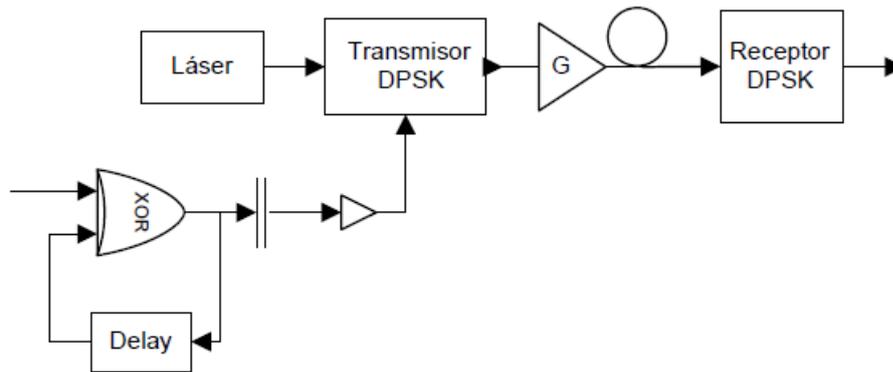
Los avances recientes en el diseño de DPSK han relajado los estrictos requisitos del ancho de línea de la fuente láser para mayores velocidades de bits. Existen diversas variantes de DPSK para optimizar la distribución del espectro, permitiendo sistemas de comunicación óptica de larga distancia y alta capacidad. Notablemente, se tiene la variante DPSK de Retorno a Cero (RZ-DPSK) y DPSK de Retorno a Cero con Supresión de Portadora (CSRZ-DPSK) y que las mismas demuestran un rendimiento de transmisión superior en comparación con DPSK estándar debido a la reducción de los efectos de Automodulación de Fase (SPM).

La modulación de amplitud constante en estos esquemas mitiga las deficiencias no lineales al reducir los efectos dependientes del patrón, como la modulación de Fase Cruzada (XPM), haciendo que la rotación de polarización no lineal inducida por XPM sea constante y predecible. Aunque los formatos DPSK y CSRZ exhiben una tolerancia similar a las no linealidades de la fibra, la sensibilidad mejorada del DPSK resulta en un rendimiento general superior del sistema.

### **3.2.1. Precodificador DPSK.**

La modulación DPSK se basa en la detección diferencial, la misma que requiere de la pre-codificación de la secuencia transmitida para garantizar una recuperación fiable de los datos en el receptor. El precodificador utilizado en los sistemas DPSK comparte similitudes con el requerido para la modulación duobinaria. Un sistema DPSK óptico típico incorpora un esquema de precodificador, generalmente posicionado en la parte inferior izquierda del diagrama del sistema (ver Figura 3.1), como parte de sus componentes esenciales para el procesamiento y transmisión eficaz de señales.

Figura 3. 1: Diagrama de bloques para el Transmisor DPSK



Elaborador por: Autor.

El precodificador en un sistema DPSK típicamente consiste en una puerta XOR con un bucle de retroalimentación de un bit de retraso desde su salida. La función de pre-codificación puede representarse matemáticamente como:

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \quad (3.1)$$

Donde  $a_k$  denota la secuencia de datos binarios original,  $b_k$  representa la secuencia binaria precodificada, y  $\oplus$  significa la operación lógica XOR. Después de bloque de DC y un amplificador, la secuencia se transforma en  $c_k \in \{+1, -1\}$ , que impulsa el modulador DPSK. El proceso de codificación asigna un 1 binario cuando el bit de entrada actual difiere del bit codificado anteriormente, y un 0 binario cuando coinciden.

Tabla 3. 1: Etapas de conversión de señales en sistemas de transmisión DPSK

| Tiempo K                            | -1       | 0        | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        |
|-------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Datos enviados $a_k$                |          | 0        | 1        | 1        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| Datos codificados diferencial $b_k$ | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        |
| Señal de control MZM $c_k$          | -1       | -1       | +1       | -1       | -1       | +1       | +1       | +1       |
| Voltaje de control MZM $\pm V_\pi$  | $-V_\pi$ | $-V_\pi$ | $+V_\pi$ | $-V_\pi$ | $-V_\pi$ | $+V_\pi$ | $+V_\pi$ | $+V_\pi$ |
| Campo Eléctrico MZM $\pm E$         | $+E$     | $+E$     | $-E$     | $+E$     | $+E$     | $-E$     | $-E$     | $-E$     |
| Fase enviada $\phi$                 | 0        | 0        | $\pi$    | 0        | 0        | $\pi$    | $\pi$    | $\pi$    |
| Diferencia de fase $ \phi $         |          | 0        | $\pi$    | $\pi$    | 0        | $\pi$    | 0        | 0        |

Elaborado por: Autor.

La conversión de señales digitales en varias etapas de un sistema de transmisión DPSK se ilustra en la Tabla 3.1. Este proceso requiere un bit de

referencia inicial para comenzar la codificación diferencial, que puede establecerse como "0" o "1" lógico. En este caso particular, el bit de referencia se establece como "0" en el instante de tiempo  $K = -1$ . Esta inicialización es crucial para mantener la integridad de los datos transmitidos a lo largo de los procesos de codificación y decodificación.

### **3.2.2. Configuración práctica del transmisor DPSK para generación de señales y sus variantes.**

En la modulación DPSK, donde la información se codifica en la fase óptica, el diseño de modulador más directo utiliza un modulador de fase. Idealmente, este dispositivo altera solo la fase de la señal, manteniendo una amplitud constante. Sin embargo, los moduladores de fase prácticos tienen un ancho de banda electro-óptico limitado, lo que resulta en transiciones de fase de  $180^\circ$  no instantáneas. Esta limitación introduce chirp entre las transiciones de símbolos, que, en presencia de dispersión cromática o efectos no lineales, puede comprometer la calidad de la transmisión. Estas restricciones requieren una consideración cuidadosa en el diseño de sistemas de comunicación óptica de alta velocidad.

En implementaciones reales, los transmisores DPSK generalmente utilizan un Modulador Mach-Zehnder (MZM) para la generación de señales. Específicamente, NRZ-DPSK puede producirse utilizando un solo MZM. Esta configuración requiere polarizar el MZM en un punto nulo, con la señal de excitación NRZ eléctrica amplificada al doble del voltaje de media onda ( $2V_\pi$ ). Consecuentemente, la fase de salida alterna entre 0 y  $\pi$  para picos de intensidad consecutivos en la curva de transmisión del MZM. Al utilizar un amplificador de RF de alta potencia con un voltaje pico a pico ( $V_{p-p}$ ) aproximadamente igual a  $2V_\pi$ , la fase de salida puede modularse entre 0 y  $\pi$ , generando efectivamente una señal PSK óptica.

Cuando los datos eléctricos se someten a una codificación diferencial antes de llegar al amplificador del controlador MZM, la salida óptica del MZM se convierte en una señal DPSK. El uso de un modulador de intensidad para la generación de DPSK, en lugar de un modulador de fase puro, asegura

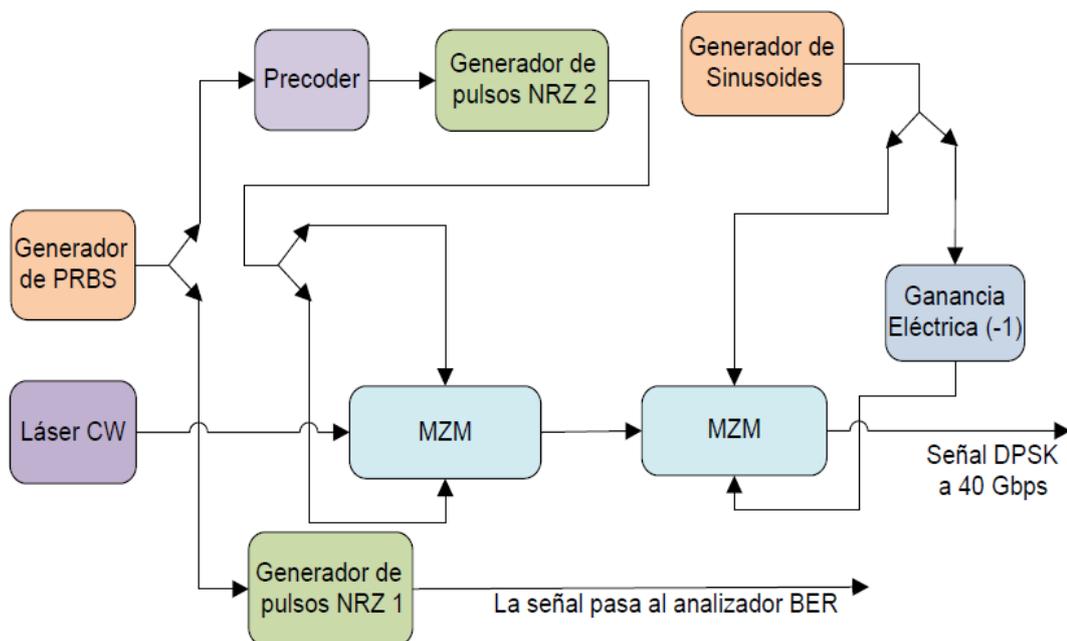
cambios de fase precisos en  $180^\circ$ . Aunque este método introduce cierta modulación de intensidad residual entre bits, no interfiere con la decodificación de la señal DPSK.

DPSK puede generarse con pulsos RZ incorporando un conformador de pulsos RZ junto al modulador DPSK. Esta configuración produce un tren de pulsos RZ periódico en la salida del transmisor, con la fase de cada pulso modulada entre 0 y  $\pi$  según los datos. En consecuencia, en DPSK existen dos formas principales: NRZ-DPSK y RZ-DPSK, cada una con características y aplicaciones distintas en sistemas de comunicación óptica.

### Configuración del Transmisor RZ-DPSK

La Modulación por Desplazamiento de Fase Diferencial con Retorno a Cero (RZ-DPSK) ofrece una mejor tolerancia del sistema a la distorsión no lineal y permite distancias de transmisión más largas en comparación con su contraparte NRZ. Si bien RZ-DPSK mantiene la codificación de datos binarios de un cambio de fase de "0" o " $\pi$ " entre bits adyacentes, emplea anchos de pulso óptico más estrechos. La generación de señales ópticas RZ-DPSK requiere un modulador de intensidad adicional en comparación con los sistemas NRZ-DPSK.

Figura 3. 2: Esquemático del diseño del transmisor DPSK.



Elaborado por: Autor.

La configuración del transmisor RZ-DPSK (véase la Figura 3.2) incorpora este modulador adicional para dar forma al ancho del pulso, resultando en una señal más robusta para la comunicación óptica de larga distancia. Este enfoque combina los beneficios de la modulación por desplazamiento de fase con las ventajas del modelado de pulsos NRZ, ofreciendo una solución convincente para redes ópticas de alto rendimiento.

La generación de una señal RZ-DPSK implica un proceso de múltiples pasos. Inicialmente, una señal NRZ se codifica utilizando un precodificador, que luego impulsa un modulador de fase electro-óptico para producir una señal óptica NRZ-DPSK convencional. Esta señal NRZ-DPSK es posteriormente modulada por una señal de reloj a través de un modulador de intensidad electro-óptico, impulsado por una señal eléctrica sinusoidal a la mitad de la tasa de datos.

Para la generación de la señal DPSK, el Modulador Mach-Zehnder (MZM) se polariza en su punto de valle y se impulsa con una señal eléctrica binaria de amplitud  $2V\pi$ , en lugar del  $V\pi$  estándar. Esta configuración asegura una modulación de fase adecuada mientras incorpora el formato de retorno a cero, mejorando la robustez de la señal para la transmisión óptica de larga distancia.

En la modulación RZ-DPSK, la señal de excitación alterna entre puntos de cresta adyacentes con una diferencia de fase de  $\pi$ . Este formato a veces se denomina DPSK Modulado en Intensidad (IM-DPSK) debido a su modulación de intensidad adicional sincronizada con los bits. A diferencia del DPSK convencional, la potencia óptica de la señal en RZ-DPSK no es constante, lo que potencialmente aumenta la sensibilidad a no linealidades relacionadas con la potencia, como la Automodulación de Fase (SPM).

Las señales RZ-DPSK presentan pulsos ópticos más estrechos, resultando en un espectro más amplio en comparación con NRZ-DPSK. Esta ampliación espectral puede aumentar la susceptibilidad a la dispersión cromática, requiriendo esquemas apropiados de compensación de dispersión.

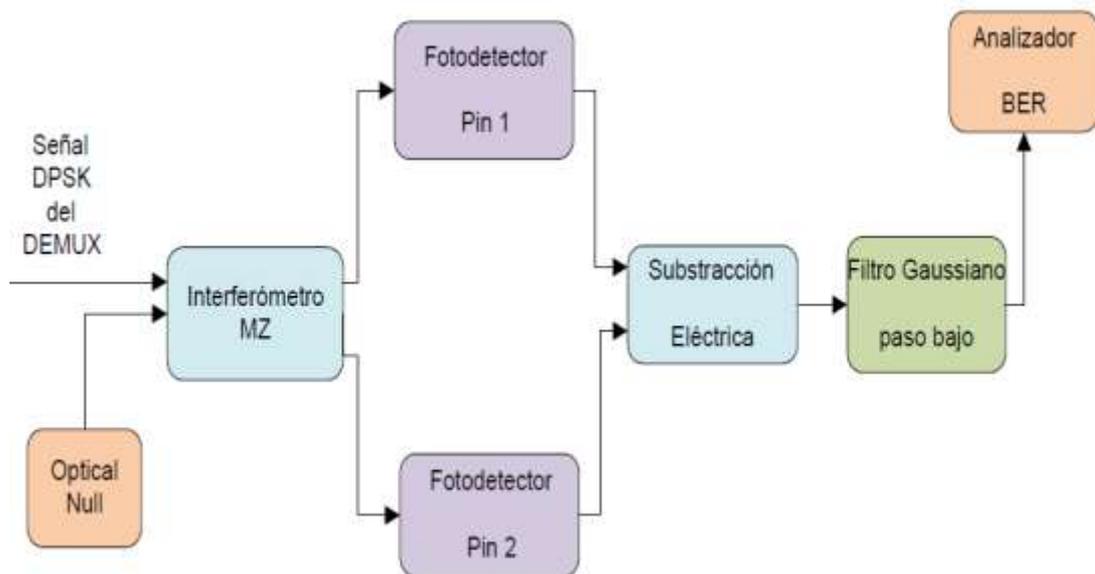
La demodulación efectiva de estos pulsos codificados en el receptor es crucial para el rendimiento del sistema. Las características únicas de RZ-DPSK presentan tanto ventajas como desafíos en los sistemas de comunicación óptica, requiriendo una consideración cuidadosa en el diseño e implementación del sistema.

### 3.2.3. Configuración práctica del receptor DPSK.

Un componente crucial en los sistemas DPSK es el demodulador, que transforma la modulación de fase en modulación de intensidad para la detección por fotodiodo en el receptor. La demodulación de señales PSK tradicionalmente requiere conocimiento de la fase de la portadora para recuperar con precisión los bits de información. En canales que inducen rotaciones o distorsiones de fase, se vuelven necesarias técnicas para estimar la fase de la portadora en la recepción.

La arquitectura del receptor DPSK (ver Figura 3.3), diseñada para el presente trabajo de simulación, emplea un esquema de detección basado en un Interferómetro de Retardo MZ (Mach-Zehnder). Esta configuración incorpora un MZDI y un receptor balanceado de fotodetector dual, eficazmente interfásico con las secuencias de bits ópticos entrantes.

Figura 3. 3: Esquemático del diseño del receptor DPSK.



Elaborado por: Autor.

En los sistemas DPSK, las dos fotocorrientes generadas en el receptor se combinan mediante sustracción lógica, duplicando efectivamente el nivel de la señal. Este proceso resulta en una mejora de 1.5 dB en el factor Q del receptor para un nivel dado de señal óptica de entrada. La oscilación de amplitud de la señal DPSK entre "1" y "-1" ofrece una mejora teórica de 3 dB en la sensibilidad del receptor en comparación con los sistemas convencionales de Modulación por Encendido y Apagado (OOK), donde la señal varía solo entre "0" y "1".

### **3.3. Descripción del sistema y modelo de simulación numérica**

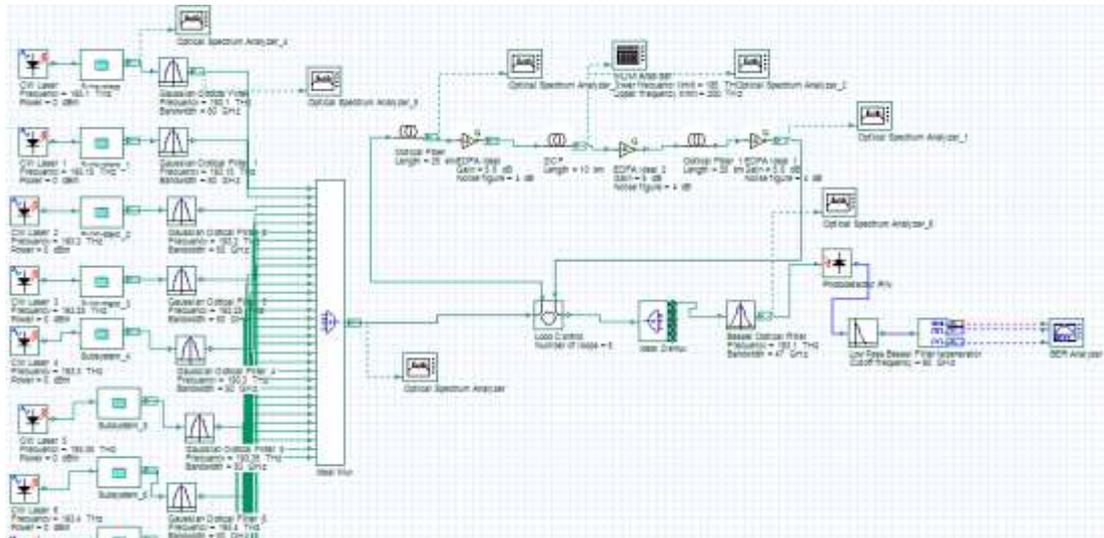
En un sistema de transmisión por fibra óptica, el modelado de las señales implica la generación, propagación y recepción de la señal transmitida. En toda simulación es necesario elegir entre la exactitud y el tiempo. Por lo general, se requiere mucho tiempo y recursos para la investigación, desarrollo, prueba y mejora de los modelos complejos que se necesitan para implementar cualquier simulación de un sistema óptico.

Gracias a la disponibilidad de simuladores de sistemas ópticos profesionales, dotados de algoritmos de simulación sofisticados, interfaces gráficas de usuario fáciles de utilizar y precios razonables, se optó por recurrir al simulador OptiSystem 7.0 con el fin de evaluar las prestaciones de transmisión de varios formatos de modulación de fase. Además, este simulador incorpora módulos de simulación para componentes fotónicos activos y pasivos, diferentes tipos de fibra, diversos módulos integrados de procesamiento digital de señales, así como analizadores en el dominio del tiempo y de la frecuencia, fuentes de señales eléctricas, filtros y otros subsistemas relacionados.

Se diseñó un enlace óptico de un solo canal utilizando los formatos DPSK y DQPSK a 40 Gbps para maximizar su rendimiento. Posteriormente, se aumentó gradualmente el número de canales hasta alcanzar 32, con un espaciamiento de 50 GHz entre ellos, logrando así una capacidad total de 1.28 Tbps. El análisis de simulación se llevó a cabo en la banda C (1530 nm - 1565 nm) utilizando diferentes tipos de fibra, con el objetivo de evaluar el rendimiento del sistema con los formatos de modulación aplicados.

El esquema propuesto del sistema DWDM de 32 canales se muestra en la Figura 3.4, con la frecuencia central del primer canal en 193.1 THz. En la literatura, estos formatos se han estudiado con un espaciamiento de canales de 50 GHz, pero con un menor número de canales o a una tasa de transmisión de datos inferior. En este trabajo de titulación, ambos formatos se analizan bajo diferentes arreglos de compensación de dispersión.

Figura 3. 4: Diseño del sistema óptico de alta velocidad utilizando multiplexación DWDM.



Elaborado por: Autor.

Se han analizado los arreglos de compensación previa, posterior y simétrica para investigar el desempeño en la mitigación de no linealidades en este diseño propuesto. En el esquema de precompensación, se utiliza un DCF de 10 km antes de una fibra monomodo de 50 km de longitud para compensar la dispersión y las no linealidades. La ganancia de los EDFA utilizados en el enlace es de 5 dB y 11 dB, respectivamente. En el esquema de postcompensación, para contrarrestar la dispersión acumulada, se emplea un DCF de 10 km después de un SMF de 50 km.

En el esquema de compensación simétrica, se utiliza un DCF de 10 km entre un SMF de 50 km, como se muestra en la Figura 3.4. En este caso, se emplean tres EDFA en línea con ganancias de 5.5 dB, 5 dB y 5.5 dB, respectivamente. Se observó que el esquema de postcompensación ofrece un rendimiento óptico tanto para los formatos DPSK como DQPSK, por lo tanto, este esquema se ha utilizado en el análisis actual. Los resultados se

han evaluado en función del valor de Q y la apertura del diagrama de ojo para múltiples tramos de transmisión que se extienden hasta 1600 km en un caso específico.

### 3.4. Discusión de resultados obtenidos

La Tabla 3.2 muestra una comparación de la cantidad de bucles atravesados utilizando distintos tipos y órdenes de filtros. En este análisis, se ajusta el orden del filtro del multiplexor, mientras que el filtro del demultiplexor permanece con un orden fijo de 2.

Tabla 3. 2: Rendimiento del sistema DWDM para filtro de 3er y 4to orden.

| Orden del Filtro | Nº de Bucles | Valor Q con Filtro Bessel | Valor Q con Filtro Gaussiano | Valor Q con Filtro Rectangular |
|------------------|--------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 3                | 1            | 22.85                     | 23.48                        | 18.25                          |
|                  | 5            | 22.46                     | 22.37                        | 18.92                          |
|                  | 10           | 20.77                     | 19.58                        | 18.32                          |
|                  | 15           | 20.14                     | 16.30                        | 16.56                          |
|                  | 20           | 17.22                     | 15.78                        | 16.12                          |
|                  | 25           | 16.97                     | 13.76                        | 13.88                          |
| 4                | 1            | 22.68                     | 23.39                        | 19.01                          |
|                  | 5            | 22.18                     | 21.28                        | 18.90                          |
|                  | 10           | 22.24                     | 18.23                        | 18.29                          |
|                  | 15           | 19.89                     | 16.61                        | 16.58                          |
|                  | 20           | 18.46                     | 15.74                        | 15.87                          |

Elaborado por: Autor.

A continuación, se presentan las discusiones de los resultados obtenidos:

#### 1. Filtros de Orden 3

- **Filtro Bessel:** la calidad Q muestra una ligera disminución a medida que aumenta el número de bucles, comenzando en 22.85 con 1 bucle y bajando a 16.97 con 25 bucles. El filtro Bessel tiende

a perder algo de rendimiento en calidad Q con más bucles, pero mantiene valores relativamente altos en comparación con el filtro rectangular.

- **Filtro Gaussiano:** la calidad Q también presenta una ligera disminución en la mayoría de los casos, comenzando en 23.48 con 1 bucle y cayendo a 13.76 con 25 bucles. Aunque el filtro Gaussiano empieza con una calidad Q más alta que el Bessel, su rendimiento disminuye más significativamente con el número de bucles.
- **Filtro Rectangular:** la calidad Q muestra una ligera mejora con el aumento del número de bucles, comenzando en 18.25 con 1 bucle y subiendo a 13.88 con 25 bucles. El filtro rectangular es el menos eficiente en términos de calidad Q en comparación con los otros filtros, pero muestra una tendencia positiva a medida que aumentan los bucles.

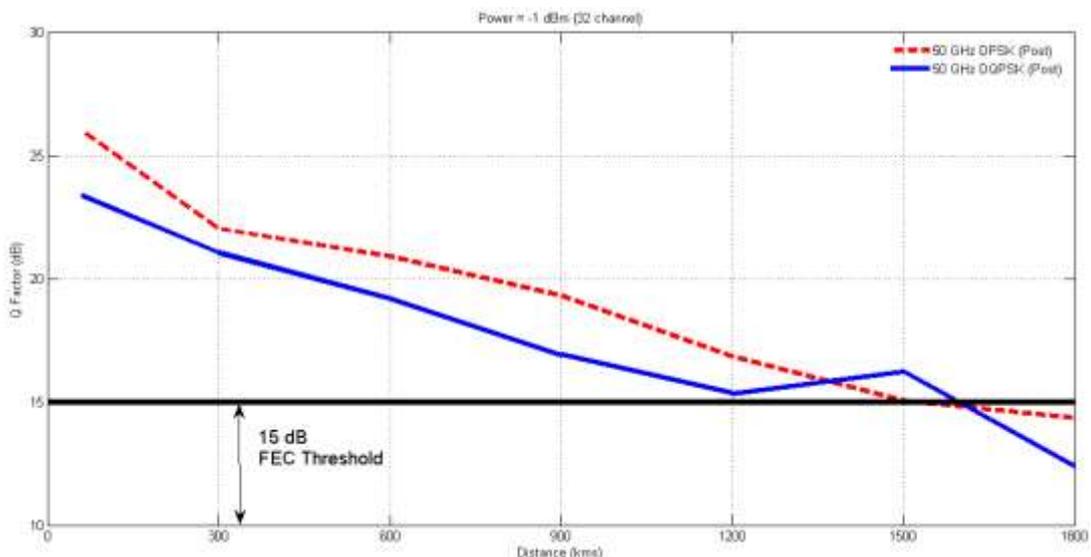
## 2. Filtros de Orden 4

- **Filtro Bessel:** la calidad Q comienza en 22.68 con 1 bucle y muestra una ligera disminución a 18.46 con 20 bucles. Similar al filtro de orden 3, el filtro Bessel de orden 4 pierde algo de rendimiento en calidad Q con el aumento de bucles, pero sigue siendo competitivo en comparación con el filtro rectangular.
- **Filtro Gaussiano:** la calidad Q muestra una ligera disminución desde 23.39 con 1 bucle a 15.74 con 20 bucles. La calidad Q del filtro Gaussiano disminuye de manera consistente con el número de bucles, pero comienza con valores más altos que el Bessel y el rectangular.
- **Filtro Rectangular:** la calidad Q muestra una ligera mejora a medida que aumentan los bucles, empezando en 19.01 con 1 bucle y subiendo a 15.87 con 20 bucles. El filtro rectangular sigue siendo el de menor calidad Q en comparación con los filtros Bessel y Gaussiano, aunque su rendimiento mejora ligeramente con más bucles.

Los resultados obtenidos en el receptor experimentan una degradación debido a la pérdida de potencia motivada por las limitaciones de los componentes del sistema y degradaciones del canal. En el caso de los EDFA, el ruido espontáneo de emisión acumulado hace que la figura de ruido ( $F_n$ ) mínima requerida para EDFS sea 3 dB, incluso en el caso ideal. En este sentido, con el fin de observar el rendimiento del sistema óptico diseñado considerando que la  $F_n = 4 \text{ dB}$  para un caso totalmente compensado. En este sentido, las fibras DCF y SMF cumplen dichas especificaciones. Finalmente, la señal se transmite a lo largo de N tramos de 60 km cada uno, que comprenden 50 km de SMF y 10 km de DCF, respectivamente.

Para mantener una degradación adecuada de efectos no lineales, es necesario que la potencia de transmisión hacia la SMF sea baja: -1 dBm, 0 dBm y 1 dBm. En la Figura 3.5 se observa que, a una potencia de lanzamiento de -1 dBm, el esquema DPSK funciona mejor que el DQPSK hasta una distancia de 1500 km, a partir de la cual el valor Q cae por debajo del umbral de 15 dB; sin embargo, el esquema DQPSK sigue proporcionando un valor Q aceptable hasta una distancia de transmisión de 1700 km.

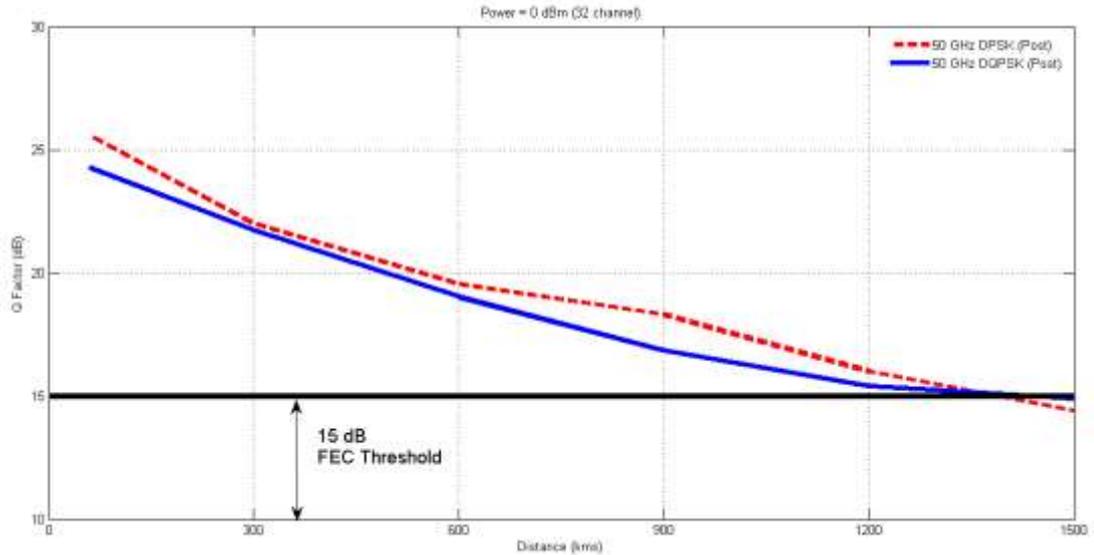
Figura 3. 5: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una  $P_{in} = -1 \text{ dBm}$ .



Elaborado por: Autor.

Cuando se aumenta la potencia de transmisión a 0 dBm, ambos esquemas muestran un rendimiento similar y proporcionan una distancia de funcionamiento segura de 1400 km, tal como se muestra en la Figura 3.6.

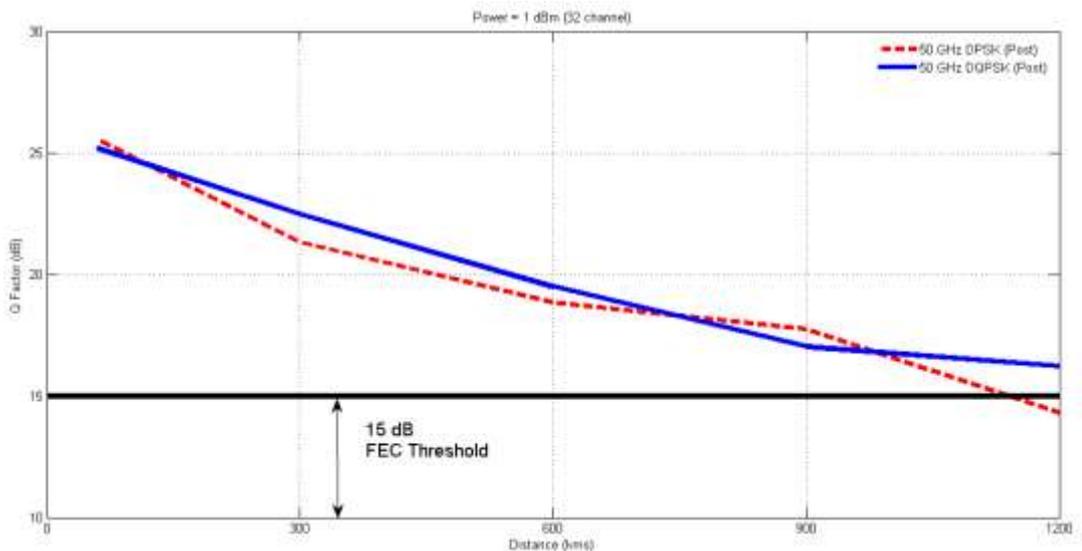
Figura 3. 6: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una  $P_{in} = 0$  dBm.



Elaborado por: Autor.

Si se aumenta la potencia de transmisión a 1 dBm, se observa que la DQPSK se comporta sistemáticamente mejor que DPSK y alcanza una distancia de transmisión segura de 1.200 km, frente a los 900 km de la DPSK, tal como se muestra en la Figura 3.7.

Figura 3. 7: Gráfica comparativa de distancia de transmisión contra Factor Q con una  $P_{in} = 1$  dBm



Elaborado por: Autor.

## Conclusiones.

- Este trabajo de titulación tuvo como propósito principal investigar y evaluar la modulación DPSK y también se añadió una variante que es DFSK y ambas son eficientes en el uso del espectro, que mediante simulaciones se evalúa el desempeño de enlaces de transmisión óptica. Se examinaron tanto sistemas que modulan la intensidad de la luz como aquellos que modulan su fase, con el fin de comprender cómo estas técnicas afectan la transmisión en sistemas WDM de alta velocidad.
- La elección de un esquema de modulación se basó generalmente en un equilibrio entre la eficiencia espectral (maximizar el uso del ancho de banda disponible) con el objetivo de alcanzar altas tasas de datos a un costo reducido y con una implementación que no sea demasiado compleja.
- Durante la evaluación del rendimiento del sistema de transmisión de datos a alta velocidad que emplea multiplexación DWDM para 32 canales, cada uno operando a 40 Gbps utilizando las modulaciones DPSK y DFSK bajo diferentes esquemas de compensación de dispersión: antes de la transmisión (pre), después de la transmisión (post), y una combinación de ambos (simétrico). Los resultados mostraron que, cuando se incrementa la potencia de la señal, el rendimiento disminuye debido a los efectos ópticos no lineales. Finalmente, se concluye que la compensación posterior a la transmisión es la estrategia más efectiva para mantener un rendimiento óptimo del sistema.

## **Recomendaciones.**

A continuación, se recomiendan tres trabajos a futuro que se pueden desarrollar a partir del presente trabajo de titulación:

- Evaluación comparativa de la técnica DPSK con otros formatos de modulación avanzada en sistemas DWDM-GPON.
- Análisis del impacto de la compensación de dispersión dinámica en la transmisión DWDM-GPON utilizando la modulación DPSK.
- Desarrollo de nuevos algoritmos de recuperación de señal para sistemas DWDM-GPON basados en modulación DPSK.

## Bibliografía

- Abbass, A. M., & Fyath, R. (2024). High-Capacity Coherent WDM Networks Empowered by Probabilistic Shaping and End-to-End Deep Learning. *Journal of Telecommunications and Information Technology*, 71–81. <https://doi.org/10.26636/jtit.2024.2.1482>
- Abril A., J. (2008). *DPSK regeneration: Phase and amplitude noise suppression based on Kerr medium* [Master Thesis, Institute of High-Frequency and Quantum Electronics (IHQ)]. [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6794/Thesis\\_pdf\\_final.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6794/Thesis_pdf_final.pdf)
- Ali, F., Muhammad, F., Habib, U., Khan, Y., & Usman, M. (2021). Modeling and minimization of FWM effects in DWDM-based long-haul optical communication systems. *Photonic Network Communications*, 41(1), 36–46. <https://doi.org/10.1007/s11107-020-00913-9>
- 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>
- Anjum, O. F., Bottrill, K., Horak, P., Jung, Y., Suzuki, M., Yamamoto, Y., Hasegawa, T., Richardson, D. J., Parmigiani, F., & Petropoulos, P. (2019). Channel Selective Wavelength Conversion by Means of Inter Modal Four Wave Mixing. *Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2019*, W4F.4. <https://doi.org/10.1364/OFC.2019.W4F.4>
- Bahrami, A., Lord, A., & Spiller, T. (2020). Quantum key distribution integration with optical dense wavelength division multiplexing: A review. *IET Quantum Communication*, 1(1), 9–15. <https://doi.org/10.1049/iet-qtc.2019.0005>

- Bahrani, S., Razavi, M., & Salehi, J. A. (2018). Wavelength Assignment in Hybrid Quantum-Classical Networks. *Scientific Reports*, 8(1), 3456. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21418-6>
- Binh, P. H., Trong, V. D., Hung, D. D., Renucci, P., Balocchi, A., & Marie, X. (2013). Demonstration of 300 Mbit/s free space optical link with commercial visible LED. *2013 IEEE 11th International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/NEWCAS.2013.6573602>
- Carrasco-Casado, A., Shiratama, K., Kolev, D., Trinh, P. V., Ishola, F., Fuse, T., & Toyoshima, M. (2022). Development and Space-Qualification of a Miniaturized CubeSat's 2-W EDFA for Space Laser Communications. *Electronics*, 11(15), 2468. <https://doi.org/10.3390/electronics11152468>
- Delgado M., J., Shinada, S., Furukawa, H., & Wada, N. (2017). Ultra-High-Capacity Optical Packet Switching Networks with Coherent Polarization Division Multiplexing QPSK/16QAM Modulation Formats. *Photonics*, 4(4), 27. <https://doi.org/10.3390/photonics4020027>
- Downie, J. D., Hurley, J., Ten, S., Towery, C., Sharma, M., Mauro, Y., Malouin, C., Zhang, B., Bennike, J., Schmidt, T., & Saunders, R. (2010). DWDM 43 Gbit/s DPSK transmission over 1200 km with no inline dispersion compensation. *Electronics Letters*, 46(1), 60. <https://doi.org/10.1049/el.2010.2816>
- El-Nahal, F., Xu, T., AlQahtani, D., & Leeson, M. (2022). A Bidirectional Wavelength Division Multiplexed (WDM) Free Space Optical Communication (FSO) System for Deployment in Data Center Networks (DCNs). *Sensors*, 22(24), 9703. <https://doi.org/10.3390/s22249703>
- Fares, A., Saouchi, K., Brik, F., Saouchi, M. O., & Boukhatem, N. (2021). Performance of 60 GHz DPSK-RoF-WDM System Using Optical DSB-SC for Long Distance Networks. *2021 IEEE 1st International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic*

*Control and Computer Engineering MI-STA*, 695–699.  
<https://doi.org/10.1109/MI-STA52233.2021.9464398>

- Gill, M. S., & Dewra, S. (2017). Analysis of DWDM System Using DPSK Modulation Technique with Raman–EDFA Hybrid Optical Amplifier. *Journal of Optical Communications*, 38(4). <https://doi.org/10.1515/joc-2016-0056>
- Hsu, C.-H., Jiang, S.-Y., Hsieh, S.-E., Yeh, C.-H., Lai, Y.-T., Chen, L.-Y., Liaw, S.-K., & Chow, C.-W. (2022). Hybrid Self-Protected Fiber-FSO WDM-PON System with Fiber Breakage Prevention. *Photonics*, 9(11), 822. <https://doi.org/10.3390/photonics9110822>
- Ip, E. (2018). Optical Coherent Detection and Digital Signal Processing of Channel Impairments. En G.-D. Peng (Ed.), *Handbook of Optical Fibers* (pp. 1–70). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2\\_54-1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-1477-2_54-1)
- Kikuchi, K. (2016). Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications. *Journal of Lightwave Technology*, 34(1), 157–179. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2463719>
- Kong, L., Lv, W., He, H., Yuan, Y., & Du, L. (2023). Design of Control Circuit for Tunable Semiconductor Laser for Fiber Sensing. *Hardware*, 1(1), 4–28. <https://doi.org/10.3390/hardware1010003>
- Kozdrowski, S., Żotkiewicz, M., & Sujecki, S. (2019). Optimization of Optical Networks Based on CDC-ROADM Technology. *Applied Sciences*, 9(3), 399. <https://doi.org/10.3390/app9030399>
- Li, J., Ma, J., Liu, J., Lu, J., Zeng, X., & Luo, M. (2023). Modulation Format Identification and OSNR Monitoring Based on Multi-Feature Fusion Network. *Photonics*, 10(4), 373. <https://doi.org/10.3390/photonics10040373>

- Liu, X. (2019). Evolution of Fiber-Optic Transmission and Networking toward the 5G Era. *iScience*, 22, 489–506. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.11.026>
- Liu, X., Chandrasekhar, S., & Winzer, P. J. (2014). Digital Signal Processing Techniques Enabling Multi-TbVs Superchannel Transmission: An overview of recent advances in DSP-enabled superchannels. *IEEE Signal Processing Magazine*, 31(2), 16–24. <https://doi.org/10.1109/MSP.2013.2285934>
- Mao, Y.-Y., Wu, C.-Q., Sheng, X.-Z., Liu, B., Ullah, R., & Tian, F. (2017). Multi-Channel NRZ/RZ-DPSK to CSRZ-DPSK Format Conversion Based on Nonlinear Polarization Rotation of SOA. *Chinese Physics Letters*, 34(10), 104201. <https://doi.org/10.1088/0256-307X/34/10/104201>
- Muhammad, F., Ali, F., Abbas, G., Abbas, Z. H., Haider, S., Bilal, M., Piran, Md. J., & Suh, D. Y. (2021). Palliation of Four-Wave Mixing in Optical Fibers Using Improved DSP Receiver. *Electronics*, 10(5), 611. <https://doi.org/10.3390/electronics10050611>
- Nanou, M., Politi, C., Stavdas, A., Georgoulakis, K., & Glentis, G.-O. (2017). High-Speed, High-Performance DQPSK Optical Links with Reduced Complexity VDFE Equalizers. *Photonics*, 4(1), 13. <https://doi.org/10.3390/photonics4010013>
- Paz, J. L., Alvarado, Y. J., Lascano, L., & Costa-Vera, C. (2018). Three levels of propagation of the Four-wave mixing signal. *Results in Physics*, 11, 414–421. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.041>
- Rea. (2017). *Fibra Óptica: Unidad de Apoyo para el Aprendizaje*. [https://repositorio-uapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2757/mod\\_resource/content/1/UAPA-Fibra-Optica/index.html](https://repositorio-uapa.cuaieed.unam.mx/repositorio/moodle/pluginfile.php/2757/mod_resource/content/1/UAPA-Fibra-Optica/index.html)
- Rovera, A., Tancau, A., Boetti, N., Dalla Vedova, M. D. L., Maggiore, P., & Janner, D. (2023). Fiber Optic Sensors for Harsh and High Radiation

- Environments in Aerospace Applications. *Sensors*, 23(5), 2512.  
<https://doi.org/10.3390/s23052512>
- Sharan, L., Agrawal, V. M., & Chaubey, V. K. (2016). Link Optimization and Performance Analysis of a 40 Gbps DQPSK Modulated Ultra DWDM System with 32 Orthogonally Polarized channels. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 15(4), 349–364. <https://doi.org/10.1590/2179-10742016v15i4715>
- Shravya, R., Taniya, F., & Krishna Maanas, Reddy. S. (2023). Transformation of Fiber Optic Communication Systems. *IJIREEICE*, 11(3).  
<https://doi.org/10.17148/IJIREEICE.2023.11306>
- Stojanovic, N., & Changsong, X. (2016). An Efficient Method for Skew Estimation and Compensation in Coherent Receivers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 28(4), 489–492.  
<https://doi.org/10.1109/LPT.2015.2500029>
- Vinogradov, S. (2023). Avalanche Photodiodes and Silicon Photomultipliers of Non-Planar Designs. *Sensors*, 23(12), 5369.  
<https://doi.org/10.3390/s23125369>
- Wang, D., Zhang, M., Li, Z., Cui, Y., Liu, J., Yang, Y., & Wang, H. (2015). Nonlinear decision boundary created by a machine learning-based classifier to mitigate nonlinear phase noise. *2015 European Conference on Optical Communication (ECOC)*, 1–3.  
<https://doi.org/10.1109/ECOC.2015.7341753>
- Winzer, P. J. (2015). Scaling Optical Fiber Networks: Challenges and Solutions. *Optics and Photonics News*, 26(3), 28.  
<https://doi.org/10.1364/OPN.26.3.000028>
- Zdravecký, N., Ovseník, L., Oravec, J., & Lapčák, M. (2022). Performance Enhancement of DWDM Optical Fiber Communication Systems Based on Amplification Techniques. *Photonics*, 9(8), 530.  
<https://doi.org/10.3390/photonics9080530>

Zhao, J., Liu, Y., & Xu, T. (2019). Advanced DSP for Coherent Optical Fiber Communication. *Applied Sciences*, 9(19), 4192. <https://doi.org/10.3390/app9194192>

Zhou, J., & Liang, D. (2021). Intelligent Matching of the Control Voltage of Delay Line Interferometers for Differential Phase Shift Keying-Modulated Optical Signals. *Photonics*, 8(10), 428. <https://doi.org/10.3390/photonics8100428>



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



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

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Cali Bustamante, David Miguel** con C.C: # **092314347-3** autor del Trabajo de Titulación: **Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 23 de agosto del 2024

f. \_\_\_\_\_

Nombre: Cali Bustamante, David Miguel

C.C: 092314347-3



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



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

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

|  |   |   |       |
|--|---|---|-------|
| <b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>   | Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión  |   |       |
| <b>AUTOR(ES)</b>   | Cali Bustamante, David Miguel   |   |       |
| <b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>   | M. Sc. Zamora Cedeño, Néstor Armando  |   |       |
| <b>INSTITUCIÓN:</b>  | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil   |   |       |
| <b>FACULTAD:</b>   | Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo  |   |       |
| <b>CARRERA:</b>  | Ingeniería en Telecomunicaciones  |   |       |
| <b>TÍTULO OBTENIDO:</b>  | Ingeniero en Telecomunicaciones   |   |       |
| <b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>   | 23 de agosto del 2024   | <b>No. DE PÁGINAS:</b>  | 59 p. |
| <b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>  | Teoría de Telecomunicaciones, Comunicaciones Ópticas  |   |       |
| <b>PALABRAS CLAVES/<br/>KEYWORDS:</b>                                  | Transmisión, Dispersión, Compensación, Modulación, Desplazamiento, Multiplexación.  |   |       |
| <b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>                            | <p>El presente documento se presenta el desarrollo del trabajo de titulación denominado “Evaluación de la técnica de modulación DPSK en sistemas DWDM de 40 Gbps para transmisión de largas distancias con esquemas de compensación de dispersión”. En el primer capítulo se describe el trabajo de investigación en la que se define el problema, justificación, objetivo general y los específicos. En el segundo capítulo se presenta los fundamentos teóricos de sistemas de comunicaciones ópticas, tipos de modulaciones y multiplexaciones. En el Capítulo 3, se presenta el desarrollo investigativo que tiene como propósito evaluar la técnica de modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) en una red óptica pasiva (PON) basado en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda densas (DWDM) con una capacidad de transmisión de 40 Gbps para enlaces de larga distancia. El rendimiento del sistema propuesto fue evaluado en términos del factor de calidad Q y de la tasa de error binario (BER), incrementando progresivamente la distancia de transmisión para cubrir zonas más extensas.</p> |   |       |
| <b>ADJUNTO PDF:</b>  | <input checked="" type="checkbox"/> SI  | <input type="checkbox"/> NO   |       |
| <b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>  | <b>Teléfono:</b> +593 96 918 2035   | <b>E-mail:</b> <a href="mailto:dcalib585@gmail.com">dcalib585@gmail.com</a> |       |
| <b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN:<br/>COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b> | <b>Nombre:</b> Ubilla González, Ricardo Xavier  |   |       |
|  | <b>Teléfono:</b> +593 99 952 8515   |   |       |
|  | <b>E-mail:</b> <a href="mailto:ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec">ricardo.ubilla@cu.ucsg.edu.ec</a>   |   |       |
| <b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>                                  |   |   |       |
| <b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>                              |   |   |       |
| <b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>   |   |   |       |
| <b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>                                |   |   |       |