



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

**TEMA:**

Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem.

**AUTOR:**

Guerrero Navia, Boonie Alberto

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

**TUTOR:**

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

13 de septiembre del 2019



**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.  
Guerrero Navia, Boonie Alberto como requerimiento para la obtención del  
título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

DIRECTOR DE CARRERA

---

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Guerrero Navia, Boonie Alberto**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación: “Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem”, 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.

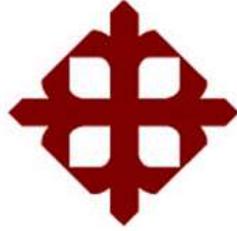
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

EL AUTOR

---

Guerrero Navia, Boonie Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Guerrero Navia, Boonie Alberto**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: “Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem”, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

EL AUTOR

---

Guerrero Navia, Boonie Alberto

# REPORTE DE URKUND

URKUND ★ Prof. rfaz Urkund Fernando Palacios Meléndez (edwin\_pa)

---

**Documento** [tesis 2.1 boonle guerrero - Diseño de un sistema de modulación duobinaria en redes ópticas utilizando optisystem.docx](#) (D55062604)

**Presentado** 2019-08-27 14:25 (-05:00)

**Presentado por** fernandopm23@hotmail.com

**Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.urkund.com

**Mensaje** RV: tesis boonle guerrero [Mostrar el mensale completo](#)

1% de estas 21 páginas, se componen de texto presente en 3 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	<a href="#">Jorge_Ortega_TT_2018.docx</a>
	<a href="#">TESIS NB.docx</a>
	<a href="#">TESIS.docx</a>
	<a href="#">387b465c-08cf-4e6c-946f-4059bb7e7916</a>
	<a href="http://www.oas.org/es/citei/Infocitei/2010/abril/ftth...">http://www.oas.org/es/citei/Infocitei/2010/abril/ftth...</a>

**Fuentes alternativas**

1 Advertencias. Reiniciar. Exportar. Compartir.

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

TEMA: Diseño de un sistema de modulación Duobinaria en redes ópticas utilizando Optisystem.

AUTOR: Guerrero Navia, Boonle Alberto

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

TUTOR: M. Sc. Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio

Guayaquil, Ecuador

## DEDICATORIA

Principalmente a Dios por darme fortaleza, salud y sabiduría quien siempre me guía en mis decisiones y logros personales.

A mis padres, Alberto Guerrero y Vivien Navia, con su implacable amor, dedicación, apoyo y motivación las cuales permiten alcanzar mis metas y ser un buen hijo y un buen profesional.

A mis hermanos y mi enamorada Gabriela Yáñez quienes siempre me ofrecieron su ayuda incondicional.

## EL AUTOR

---

Guerrero Navia, Boonie Alberto

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por la salud, fuerza e inteligencia que me brindo y las cuales ayudaron a finalizar esta etapa universitaria.

A mis padres Alberto Guerrero, Vivien Navia por siempre estar apoyándome y ayudándome en lo que siempre necesite y brindándome su cariño y aconsejándome que el mejor regalo para de un padre para un hijo siempre serán los estudios.

A mis hermanos siempre estuvieron dispuesto ayudarme en lo que se necesite.

A mi enamorada, amigos y compañeros cuales compartí aula en la universidad que siempre me alentaron, apoyaron y creyeron en que podría culminar mis estudios.

Y por último, pero no menos importante a mis docentes de las UCSG por ofrecerme a carta cabal sus conocimientos y sus buenos consejos.

**EL AUTOR**

---

Guerrero Navia, Boonie Alberto



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

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

**M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS**  
DECANO

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

**M. Sc. HERAS SANCHEZ, MIGUEL ARMANDO**  
DIRECTOR DE CARRERA

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

**M. Sc. PALACIOS MELÉNDEZ, EDWIN FERNANDO**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas.....	XIV
Resumen .....	XV
Capítulo 1: Descripción General .....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes. ....	3
1.3. Definición del Problema.....	4
1.4. Justificación del Problema.....	4
1.5. Objetivos del Problema de Investigación.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos. ....	4
1.6. Hipótesis.....	5
1.7. Metodología de Investigación.....	5
Capítulo 2: Fundamentación Teórica .....	6
2.1. Tecnologías de modulación.....	6
2.2. Modulación de no retorno a cero (NRZ). ....	9
2.3. Modulación con retorno a cero (RZ).....	10
2.4. Formato Duobinario.....	13
2.5. Propagación de señales en fibra ópticas.....	15
2.5.1. Pérdida óptica.....	15
2.5.2. Emisión espontánea amplificada. ....	16
2.5.3. Dispersión cromática (CD).....	16
2.5.4. Efectos no lineales.....	18
2.6. Amplificación óptica.....	24
2.6.1. Amplificador de fibra dopada por Erbium (EDFA).....	24

2.6.2. Amplificación de Raman.....	25
2.6.3. Amplificación Híbrida.....	26
CAPÍTULO 3: SIMULACION Y RESULTADOS OBTENIDOS .....	28
3.1. Software de simulación OptiSystem.....	28
3.2. Desarrollo de los escenarios de simulación.....	29
3.2.1. Descripción del escenario 1: reducción de efectos de FWM utilizando modulación Duobinaria.....	30
3.2.2. Configuración del escenario 1.....	31
3.2.3. Descripción del escenario 2.....	32
3.2.3.1. Formato de modulación de datos.....	34
3.2.4. Configuración del escenario 2.....	35
3.3. Análisis de resultado obtenidos.....	39
3.3.1. Análisis del escenario 1.....	39
3.3.2. Análisis del escenario 2.....	41
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	46
4.1. Conclusiones.....	46
4.2. Recomendaciones.....	47
Bibliografía.....	48

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2.1: Funciones de transmisión de (a) EAM, y (b) MZM.....	7
Figura 2.2: Características de transferencia de un MZM típico. La línea solida corresponde al campo y la línea discontinua corresponde a la intensidad (es decir, la magnitud cuadrada del campo). .....	9
Figura 2.3: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para NRZ a 10 Gbps. ....	9
Figura 2. 4: Transmisor RZ típico utilizando dos MZM en cascada. El primer MZN imparte los datos utilizando la modulación NRZ estándar. El segundo MZN acaricia los pulsos RZ. ....	10
Figura 2. 5: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para NRZ a 10 Gbps. ....	11
Figura 2. 6: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para RZ33 a 10Gbps.....	12
Figura 2. 7: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para CSRZ a 10 Gbps.....	12
Figura 2. 8: Transmisor típico LPF DB.....	14
Figura 2. 9: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para DB de 10 Gbps. ....	14
Figura 2. 10: Forma de onda de intensidad de base de datos típica que hace uso de cambios de fase en el medio de cada periodo de espacio.....	15
Figura 2. 11: Atenuación de una fibra de modo único estándar. La línea solida representa la forma típica observada en los años 90, la línea discontinua representa la forma real.....	16
Figura 2. 12: Variación medida del parámetro de dispersión D con longitud d onda para una fibra monomodo. ....	17
Figura 2. 13: Perfil de dispersión de varios tipos de fibra. SMF: fibra monomodo, DSF: dispersión de fibra desplazada, DFF: dispersión de fibra aplanada. ....	18
Figura 2. 14: Fenómeno de la modulación de la fase automática (SPM).....	20

Figura 2. 15: (a) Efecto FWM en el dominio espectral después de la propagación de la señal y las dos bombas en la fibra DSF (b) eficiencia FWM en función del espaciado de canales para diversos valores de dispersión..	21
Figura 2. 16: Efecto PMD en un pulso óptico.....	23
Figura 2. 17: Esquema de un amplificador dopado en fibra.....	25
Figura 2. 18: Esquema de un amplificador Raman.....	25
Figura 2. 19: Coeficiente de ganancia de Raman frente a la diferencia de frecuencia entre la señal y la bomba. ....	26
Figura 2. 20: Amplificador híbrido de fibra dopada Raman.....	27
Figura 2. 21: Bandas de amplificación cubiertas por diversas tecnologías de amplificación. ....	27

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Esquema experimental del escenario 1.....	31
Figura 3. 2: Simulación de red PON Híbrida de 4 canales con 16 suscriptores con una velocidad de transmisión de 10 Gbps. ....	36
Figura 3. 3: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación NRZ. ....	36
Figura 3. 4: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación RZ. ....	37
Figura 3. 5: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación CSRZ.....	37
Figura 3. 6: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación DB. ....	38
Figura 3. 7: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación Mod-DB.....	38
Figura 3. 8: Grafica espectral en la salida de fibra para modulación binaria.	39
Figura 3. 9: Grafica espectral en la salida de fibra para modulación Duobinaria. ....	40
Figura 3. 10: Supresión media del producto FWM en relación con el espaciado del canal. ....	41
Figura 3. 11: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación de retorno a cero (RZ). ....	42

Figura 3. 12: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación duobinario (DB).....	43
Figura 3. 13: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación de retorno a cero de portadora suprimida (CSRZ).....	43
Figura 3. 14: Diagrama de tasa de erro de bits (BER) para el formato de modulación de no retorno a cero (NRZ).....	44
Figura 3. 15: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación duobinario modificado (Mod-DB). ....	44
Figura 3. 16: Comparativa del rendimiento BER de los formatos RZ, NRZ, CSRZ, DB, Mod-DB para varias longitudes de fibra óptica.....	45
Figura 3. 16: Comparativa del factor Q de los formatos RZ, NRZ, CSRZ, DB, Mod-DB para varias longitudes de fibra óptica. ....	45

## Índice de Tablas

### Capítulo 2

Tabla 2. 1: Parámetros de fibras comerciales a 1550 nm..... 24

### Capítulo 3

Tabla 3. 1: Niveles de las señales ópticas en el caso binario y duobinario.. 40

## Resumen

El presente trabajo de titulación consistió en realizar el diseño de dos escenarios de simulación de un sistema de modulación duobinario y el segundo escenario se realizó la comparativa entre diferentes formatos de modulación como no retorno a cero (NRZ), retorno a cero (RZ), retorno a cero de portadora suprimida (CSZR), duobinario (DB) y duobinario modificado (Mod-DB) sobre redes ópticas pasivas híbridas (Hybrid PON) utilizando la plataforma de simulación OptiSystem 7.0. Los resultados obtenidos en los dos escenarios de simulación durante varias pruebas ejecutadas en OptiSystem indicaron que la modulación duobinaria es la óptima para enlaces de fibra óptica de gran alcance en redes DWDM y PON Híbridas. En los dos escenarios se mostraron excelentes valores de tasa de error de bits y factor de calidad (Q), es decir, que para el primer escenario 25 km y para el segundo 105 km. Los demás formatos de modulación son buenos, pero no para la distancia indicada para duobinario.

**Palabras claves:** MODULACIÓN, DUOBINARIO, NRZ, RZ, OPTISYSTEM, PON.

## Capítulo 1: Descripción General

### 1.1. Introducción.

Los formatos de modulación avanzados con amplitud y/o modulación de fase están atrayendo un intenso interés por mejorar la capacidad total y ampliar la distancia de enlace de los sistemas transmisión. Estas propuestas explotan la efectiva energía y los espectros de la señal. Para estos fines se han utilizado varias técnicas no coherentes de modulación, como la modulación por desplazamiento de amplitud (*Amplitude-Shift Keying, ASK*), la modulación por desplazamiento diferencial de fase (*Differential Phase-Shift Keying, DPSK*), y los formatos de retorno a cero (*Return to Zero, RZ*), no retorno a cero (*No Return to Zero, NRZ*) y Duobinario (*DuoBinary, DB*). Los formatos DB y modulación de fase continua (*Continuous Phase Modulation, CPM*) DB se han demostrado para ofrecer una alta eficiencia espectral.

En general, el formato de modulación Duobinario (DB) es un llamado formato de transmisión de respuesta parcial. Esta clase de formatos hace uso de correlación de bits para reducir el ancho espectral y luego potencialmente aumentar la eficiencia espectral. La correlación se introduce a través de cierta cantidad de interferencia entre símbolos de pulso controlado (ISI). (Chvojka, Haigh, Darwazeh, Ghassemlooy, & Zvanovec, 2019)

Los formatos de modulación DB (binario en forma de fase) se pueden generar modulando un modulador óptico interferométrico (MZIM) de doble unidad. Trabajos recientes han demostrado que los voltajes de conducción para el modulador se pueden reducir para generar señales ópticas DB de ancho de pulso variable.

La señal óptica duobinaria tiene espectro estrecho, tolerancia a la dispersión cromática y resistencia a la distorsión del filtro. Con muchas patentes tempranas de diferentes organizaciones, la modulación óptica duobinaria incluye aplicaciones para la adaptación de señales de 40 Gbps en redes de fibra existentes de 10 Gbps.

## 1.2. Antecedentes.

La transmisión basada en DB fue propuesta por primera vez en los años 1960 para comunicaciones de radiofrecuencia (RF). Su alta eficiencia espectral fue el aspecto que lo hizo atractivo en ese contexto. Más tarde, fue superado por esquemas de modulación multinivel que podrían alcanzar eficiencias espectrales aún más altas.

DB ha resurgido en el campo de las comunicaciones ópticas hace algunos años. En 1993 se realizó una propuesta usando DB que se basó en la modulación de amplitud de tres niveles, pero los problemas de sensibilidad obstaculizaron esta solución. En 1995, otros trabajos se desarrollaron para combinar DB con modulación de amplitud (*Amplitude Modulation, AM*) y fase (*Phase Modulation, PM*).

La base de datos óptica AM/PM se puede implementar fácilmente utilizando propiedades intrínsecas de moduladores Mach-Zehnder (MZ). Además, se puede recibir utilizando un receptor (Rx) de detección directa estándar, ya que el fotodetector actúa como decodificador, y presenta una fuerte tolerancia a la dispersión cromática gracias a la alta eficiencia espectral. Sin embargo, la implementación propuesta del transmisor (Tx) requiere filtros eléctricos especiales de retardo y adición y un modulador MZ de doble brazo.

En 1996 se implementó un formato duobinario diferente, llamada transmisión binaria en forma de fase (*Phase-Shaped Binary Transmission, PSBT*) (por sus efectos), que utiliza un filtro convencional de Bessel pasa bajo y un modulador de un solo brazo. En 2001, PSBT fue empleado con éxito para transmitir 80 canales a 40 Gbps, a más de 300 km, con un espaciado de canal de sólo 50 GHz. En la literatura técnica revisada se encontraron varias publicaciones de papers de revisión exhaustivos sobre las ventajas y desventajas del uso de la base de datos óptica.

Finalmente, las señales de respuesta parcial duobinaria y duobinaria modificada se implementan en sistemas de transmisión donde las

restricciones de ancho de banda están predeterminadas o donde se requieren por otras razones.

### **1.3. Definición del Problema.**

En la búsqueda de información relacionada al uso del software OptiSystem en los trabajos de titulación de la Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones no se han encontrado proyectos en donde se utilice el formato de modulación Duobinario, para lo cual se necesita diseñar un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas pasivas utilizando el software de simulación OptiSystem.

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

La herramienta de simulación OptiSystem es un software robusto y muy utilizado por profesionales y estudiantes para modelar redes de comunicaciones ópticas utilizando diferentes técnicas de modulación y que se pueden encontrar un sin número de investigaciones publicadas en congresos y revistas donde son publicados dichos proyectos. La intención final del presente trabajo es contribuir a la formación de ingenieros en telecomunicaciones a través del presente modelado del sistema duobinario en una red óptica pasiva y que a su vez permita el desarrollo de futuros temas de titulación utilizando otras técnicas de modulación.

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

En esta sección se describen tanto el objetivo general como los objetivos específicos que se plantean en el presente trabajo de titulación propuesto.

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

Realizar el diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem

#### **1.5.2. Objetivos Específicos.**

- Describir los fundamentos teóricos de las comunicaciones por fibra óptica.

- Elaborar los modelos de simulación del formato de modulación duobinario para reducción de efectos FWM en sistemas DWDM de dos canales y sobre redes ópticas pasivas híbridas.
- Evaluar los resultados obtenidos en los dos modelos de simulación propuestos utilizando el software OptiSystem.

### **1.6. Hipótesis.**

Para analizar los sistemas de comunicaciones por fibra óptica son necesarias herramientas de simulación que en este caso es OptiSystem. Esta plataforma es utilizada en el presente trabajo de titulación que permite la modelación de comunicaciones ópticas. En consecuencia, el proyecto permitirá que futuros profesionales en telecomunicaciones puedan leer el documento y así incentivar el uso de este robusto software.

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

De acuerdo a lo indicado por (Niño Rojas, 2011) en su libro de metodología de investigación, los enfoques que se utilizan en los proyectos son del tipo cualitativo y cuantitativo, en ciencias sociales y exactas (ingenierías), respectivamente. Es decir, que el presente documento emplea el enfoque cuantitativo, y este utiliza los siguientes tipos de investigación: descriptivo, analítico, experimental y casi-experimentales.

## **Capítulo 2: Fundamentación Teórica**

El objetivo principal de este capítulo es introducir los sistemas de comunicación óptica que incluyan elementos ópticos básicos, impedimentos de transmisión en fibra óptica y, a continuación, resumir los principios de varios formatos de modulación y sus características en el alcance de esta investigación. Se puede encontrar una buena comprensión de los sistemas y tecnologías de comunicación óptica.

### **2.1. Tecnologías de modulación.**

Hoy en día se usan comúnmente tres tecnologías básicas para modular la luz: modulación directa de láseres (DML), moduladores de electro-absorción (EAM) y moduladores de Mach-Zehnder (MZM). Una forma nueva e innovadora de utilizar estas tecnologías de modulación existentes generalmente dan lugar a un nuevo formato de modulación óptica. Estas tecnologías de modulación se pueden usar con formatos de modulación para encontrar técnicas de modulación novedosas y rentables con la finalidad de resolver necesidades de redes de nueva generación DWDM ópticas de alta velocidad de bits y alta eficiencia espectral. (Macho Ortiz, 2012)

#### **2.1.1. Modulación directa de láseres (DML)**

La modulación directa de láseres es la forma más fácil de imponer datos en un portador óptico. Los datos transmitidos se modulan en la corriente de accionamiento láser, que luego enciende y apaga la luz que emerge del láser. Este formato de modulación resultante es una modulación de intensidad binaria. Los láseres modulados directamente están ampliamente disponibles hasta velocidades de modulación de 2,5 Gbps, con una disponibilidad limitada de hasta 10 Gbps.

En algunas demostraciones de investigación, también se han alcanzado velocidades de datos de hasta 40 Gbps. La principal limitación de los DML para los sistemas de transmisión de alta velocidad de datos es su chirp (chirrido) inherente y altamente específico de los componentes, es decir, una modulación de fase residual que acompaña a la modulación de intensidad

deseada; este chirp (chirrido) láser amplía el espectro óptico restringiendo el espaciado denso del canal de la multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) y puede interactuar con la dispersión cromática de fibra y causar mayores distorsiones de señal. (Lerín, 2012)

### 2.1.2. Modulador de electro-absorción. (EAM)

Un modulador de electro-absorción es un dispositivo semiconductor que controla la intensidad de un rayo láser a través de una tensión eléctrica. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto Franz-Keldysh, es decir, un cambio del espectro de absorción causado por un campo eléctrico aplicado, que por lo general no implica la excitación de portadores por el campo eléctrico.

Los EAM suelen tener voltajes de accionamiento relativamente bajos y son rentables en la producción de volúmenes. Están disponibles para velocidades de modulación de alta velocidad de hasta 40 Gbps en la actualidad, con algunas demostraciones de investigación de hasta 80 Gbps. Sin embargo, al igual que los DML, exhiben algunos chirp residuales.

Tienen características de absorción dependientes de longitud de onda, relaciones de extinción dinámicas que normalmente no superan los 10 dB y capacidades limitadas de manejo de potencia óptica. Su pérdida de inserción de fibra a fibra es de aproximadamente 10 dB. La integración en chip con diodos láser evita la alta pérdida en la interfaz de fibra a chip de entrada y conduce a paquetes de transmisores compactos. (Pintor G., 2017)

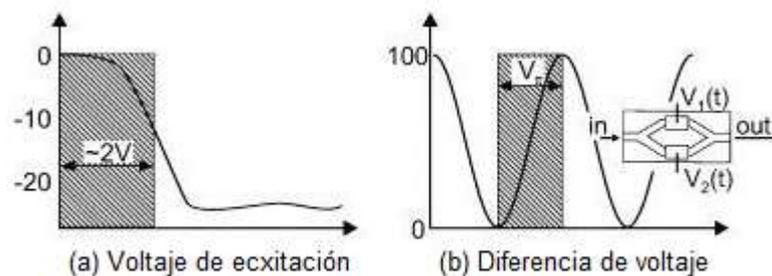


Figura 2.1: Funciones de transmisión de (a) EAM, y (b) MZM.  
Fuente: (Pintor G., 2017)

Estos EMLs, con potencias de salida en el orden de 0 dBm, están comúnmente disponibles hoy en día para modulaciones de hasta 10 Gbps. Las altas pérdidas de inserción se pueden eliminar mediante la integración con amplificadores ópticos semiconductores (SOA). La figura 2.1 (a) muestra las características de transmisión exponencial de un EAM en función del voltaje de excitación o tensión de accionamiento.

### 2.1.3. Modulador Mach-Zehnder. (MZM)

A diferencia de los moduladores de electro-absorción, los moduladores Mach-Zehnder funcionan según el principio de interferencia. La estructura del modulador se muestra en la figura 2.1 (b). Para Samani et al., (2019) la luz entrante se divide en dos trayectorias en un acoplador de entrada. Una trayectoria tiene un modulador de fase que permite que los dos campos ópticos adquieran alguna diferencia de fase en relación entre sí, controlados por las tensiones aplicadas  $V_{1,2}$ .

Estos dos campos interfieren en un acoplador de salida. La tensión eléctrica aplicada controla la interferencia destructiva o constructiva produciendo así modulación de intensidad. Debido a su buen rendimiento de modulación y la posibilidad de modular independientemente la intensidad y la fase del campo óptico, muchos formatos de modulación óptica avanzada se basan en el uso de estos MZM. Se pueden conducir con diferentes maneras de generar una variedad de formatos de modulación importantes fácilmente. Los MZM se implementan más convenientemente en  $LiNbO_3$  (Lerín, 2012).

El MZM manipula la luz a través del efecto electroóptico (EO). Cuando se aplica una tensión eléctrica a través de un material EO como  $LiNbO_3$  el índice de refracción efectivo de la guía de onda cambia. Mediante la aplicación de un retardo de fase diferencial entre dos trayectorias paralelas, la intensidad de la luz se modula después de la recombinación debido a interferencias constructivas y destructivas. Para lo cual, el campo eléctrico de salida del MZM es:

$$E_{salida}(t) = E_{entrada}(t) \left( \frac{\pi}{2} \left( V_d(t) + \frac{V_{bias}}{4} \right) \right) \exp\left[ i \frac{\pi V_{bias}}{4} \right] \quad (1)$$

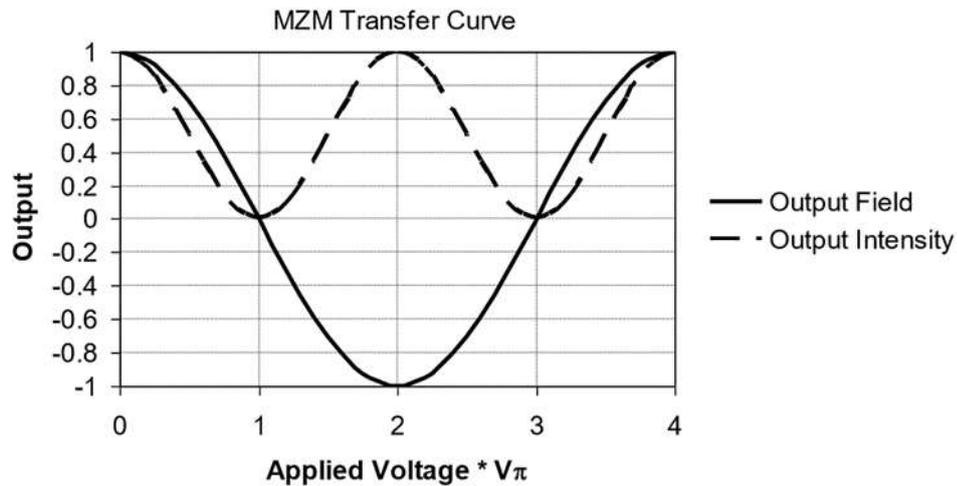


Figura 2.2: Características de transferencia de un MZM típico. La línea solida corresponde al campo y la línea discontinua corresponde a la intensidad (es decir, la magnitud cuadrada del campo).

Fuente: (Kawanishi, 2011; Samani et al., 2019)

## 2.2. Modulación de no retorno a cero (NRZ).

El formato de modulación de intensidad más sencillo es no retorno a cero (No Return to Zero, NRZ). NRZ se crea modulando entre 0 y  $V\pi$  en la curva de transferencia de MZM y se caracteriza por el hecho de que las marcas consecutivas no vuelven a cero entre bits. Por lo tanto, las cadenas largas de las marcas tienden a tener grandes cantidades de información de baja frecuencia. (Arora, Kumar, & Sharma, 2017)

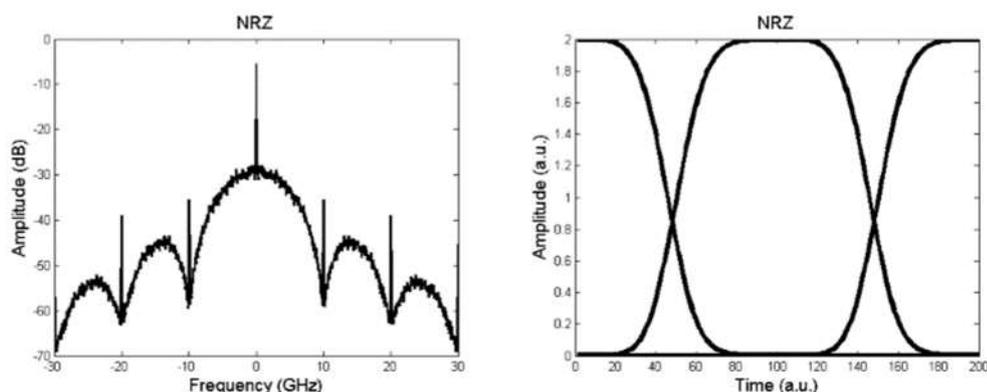


Figura 2.3: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para NRZ a 10 Gbps.

Fuente: (Lerín, 2012)

Además, dado que la tensión de conducción sólo oscila por  $V\pi$ , no se produce volteo de fase en el campo transmitido. La modulación óptica de NRZ se considera una forma unipolar de señalización NRZ y por lo tanto tiene un componente de DC fuerte que supera el 50% de la energía total para las

señales ER finita (suponiendo marcas de probabilidad y espacios iguales). La figura 2.3 muestra las características de la densidad de potencia espectral (*Power Spectral Density, PSD*) y el diagrama de ojos correspondiente para NRZ.

### 2.3. Modulación con retorno a cero (RZ).

A diferencia de NRZ, todos los formatos de modulación de RZ se caracterizan por el hecho de que las marcas adyacentes están separadas por períodos en los que la magnitud vuelve al nivel bajo (Breuer & Petermann, 1997). Los formatos de RZ ópticos se clasifican por su ciclo de trabajo y codificación de fase. Tres de los formatos RZ más típicos son 50% RZ (RZ50), 33% RZ (RZ33) y portadora suprimida RZ (CSRZ).

Un transmisor de RZ típico consta de dos MZM conectados en serie tal como se muestra en la figura 2.4. El primer MZM es modulado por la secuencia de datos de NRZ estándar para imprimir la información en la onda de luz. El segundo MZM es impulsado por una señal eléctrica sinusoidal y se utiliza como un tallador de pulsos asegurando así que las marcas consecutivas se separan por caídas hacia atrás de cero.

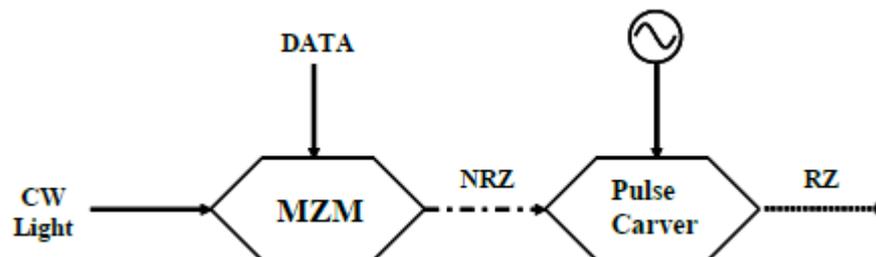


Figura 2. 4: Transmisor RZ típico utilizando dos MZM en cascada. El primer MZM imparte los datos utilizando la modulación NRZ estándar. El segundo MZM acaricia los pulsos RZ.

Fuente: (Jain, Bahl, & Banik, 2014)

Los beneficios de RZ son muchos: la recuperación del reloj de los datos transmitidos es más fácil, los efectos de interferencia inter-símbolo (*InterSymbol Interference, ISI*) son menos pronunciados, también se pueden lograr sensibilidades más altas y las sanciones de RB coherentes son más bajas. Sin embargo, los formatos RZ también tienen inconvenientes debido a sus espectros significativamente más amplios. Esto implica que los formatos

de RZ son espectralmente desperdiciados e inherentemente inferiores para lograr una alta eficiencia espectral. Otra consecuencia es que los formatos de RZ sufrirán mayores cantidades de sanciones de filtrado óptico, ya que los efectos de concatenación de filtros serán más severos.

La creación de las diferentes variedades de RZ depende de la naturaleza de la señal de conducción del tallador de pulsos. Para crear RZ50, la talla de pulso se conduce con sinusoides oscilantes de voltaje  $V\pi$  (pico a pico) a la velocidad de datos,  $R$ , que está sesgado en cuadratura (es decir, en  $V\pi$  tal como se muestra en la figura 2.2). Los pulsos resultantes tienen un ciclo de trabajo aproximado del 50% y no hay volteo de fase adicional. La figura 2.5 muestra los diagramas PSD y de ojo correspondiente a la modulación de retorno a cero (RZ).

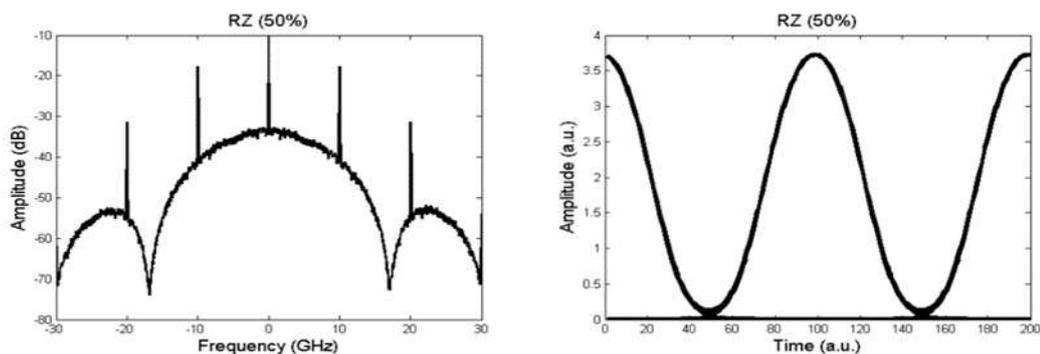


Figura 2. 5: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para NRZ a 10 Gbps.  
Fuente: (Lerín, 2012).

Para el RZ33 se crea conduciendo el tallador de pulsos con sinusoides oscilantes de  $2V\pi$  (pico a pico) a la mitad de la velocidad de datos,  $R/2$ , que está sesgada al máximo de la curva de transferencia. Los pulsados tallados tienen un ciclo de trabajo de aproximadamente 33% del período de bits. Este pulso efectivo más estrecho se traduce en una cantidad correspondientemente mayor de energía de alta frecuencia, tal como se muestra en la figura 2.6. Una vez más, no se produce ningún volteo de fase para RZ33.

Para el CSRZ se crea conduciendo el tallador de pulsos con sinusoides oscilantes de voltaje de  $2V\pi$  (pico a pico) a la mitad de la velocidad de datos,

R/2, que está sesgado en el nulo de la curva de transferencia. El efecto clave de este tipo de tallado por pulsos es que el ciclo de trabajo es de aproximadamente 67% y los pulsos adyacentes siempre tienen fase cero y  $\pi$  alterna. En otras palabras, el tono DC promedia a cero ya que los bits alternos tienen fase opuesta.

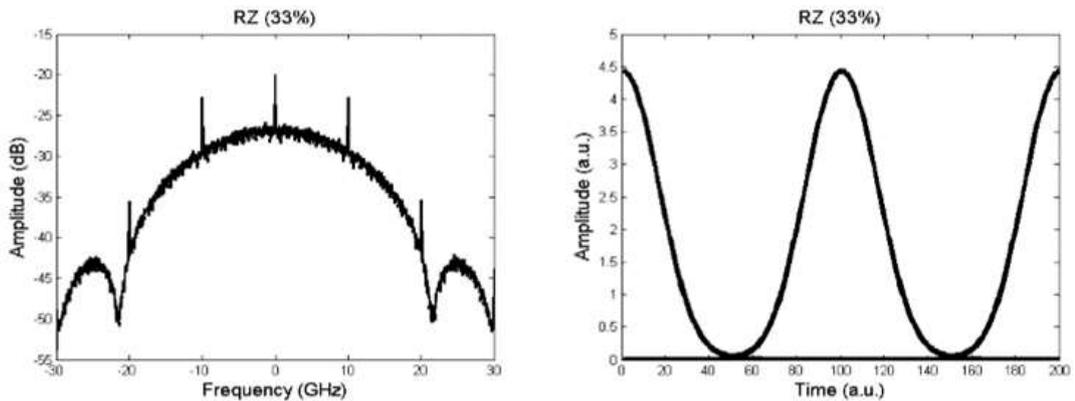


Figura 2. 6: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para RZ33 a 10Gbps.  
Fuente: (Lerín, 2012).

Por lo tanto, el portador se suprime en promedio y, en su lugar, los tonos armónicos en  $\pm R/2$  aparecen en la figura 2.7. Convenientemente, este volteo de fase no afecta al diseño del receptor ya que la información de fase se pierde durante el proceso de detección de la ley cuadrada. Para el receptor, no hay diferencia entre un pulso +1 y un pulso -1. La motivación para incorporar el volteo de fase en la señal transmitida es impulsada por otras influencias como las no linealidades de propagación y los efectos de filtrado.

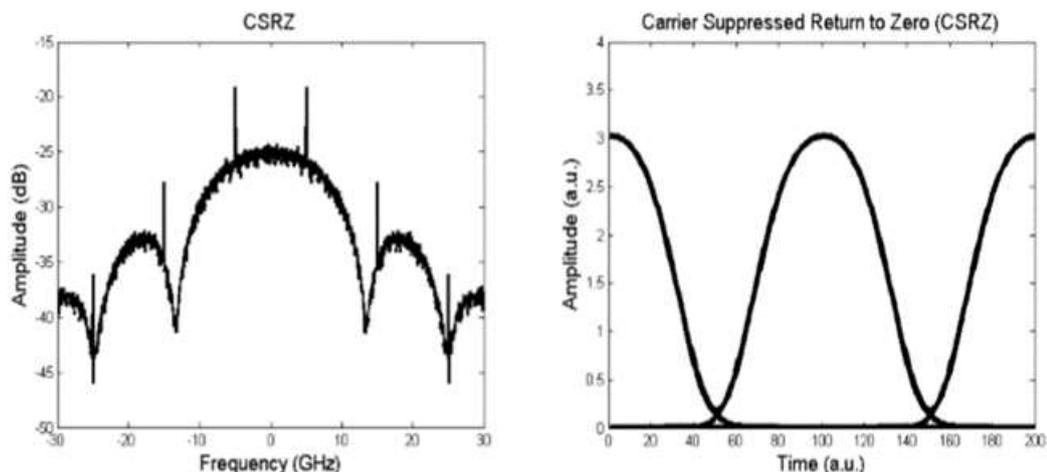


Figura 2. 7: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para CSRZ a 10 Gbps.  
Fuente: (Lerín, 2012).

## 2.4. Formato Duobinario.

Otra clase de señales moduladas de intensidad conocidas como señales de respuesta parcial. Estas señales son similares a CSRZ en el sentido de que algunos bits se voltean por  $\pi$  fase con respecto a otros. Sin embargo, la codificación de respuesta parcial implica que estos volteos de fase se colocan de acuerdo con el patrón de bits transmitido. Por lo tanto, las señales de respuesta parcial requieren una capa de codificación adicional y una electrónica de unidad diferente a la CSRZ.

El receptor óptico tiene tres funciones:

- (1) conversión de señal óptica a eléctrica,
- (2) amplificación, y
- (3) estimación del mensaje originalmente transmitido.

En estas tres funciones, el receptor óptico parece similar a un receptor de radio; sin embargo, es bastante diferente en la forma que realiza estas funciones. Típicamente en una radio, el receptor utiliza la detección heterodina de la señal de llegada que es mezclada con un oscilador local para producir una modulación de portadora de frecuencia intermedia que luego se amplifica y se filtra según sea necesario.

Un código de respuesta parcial particularmente importante en las comunicaciones ópticas es DB. DB tiene muchas propiedades interesantes que lo hace ventajoso en ciertas situaciones. Particularmente, DB se comprime espectralmente en comparación con NRZ, portadora suprimida (debido a la codificación de fase intrínseca) y altamente resistente a ISI. Estas características hacen de DB un candidato ideal para sistemas de alta eficiencia espectral y redes de área metropolitana.

Para lograr estos beneficios, sin embargo, el transmisor DB requiere equipo adicional y se sabe que es más sensible al error de tolerancia. El esquema del transmisor DB más común se muestra en la figura 2.8. La señal de datos sin procesar se pasa primero a través de un codificador diferencial. El codificador diferencial consta de una puerta XOR y un retardo de 1 bit. La

salida de este paso lógico crea correlaciones entre bits. La secuencia codificada pasa a través de un filtro pasa bajo (*Low Pass Filter, LPF*) que tiene un corte aproximado de alrededor  $R/4$ . Los datos binarios de 2 niveles se convierten en una forma de onda de 3 niveles a través de un filtrado de pasa bajo.

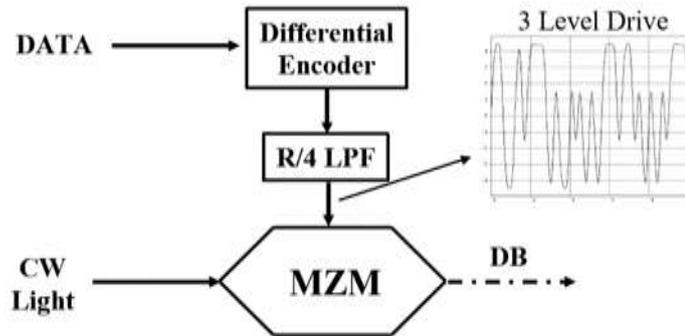


Figura 2. 8: Transmisor típico LPF DB.

Fuente:

Fuente: (Lerín, 2012).

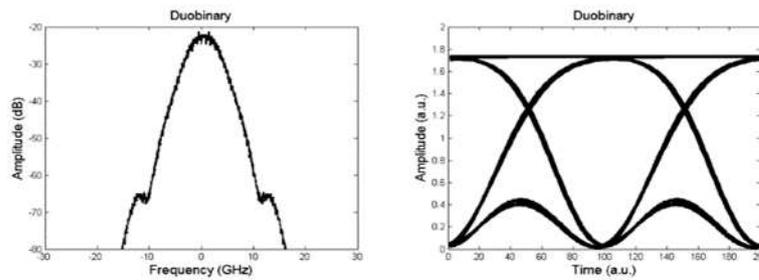


Figura 2. 9: Diagramas de densidad de potencia espectral (PSD) y diagrama de ojo para DB de 10 Gbps.

Fuente: (Lerín, 2012).

El LPF típico usado para el DB óptico son los filtros Bessel de 5to orden. El filtrado pasa bajo hace que la señal digital original de 2 niveles se convierta en una señal de 3 niveles como se ejemplifica en la señal de la figura 2.8. La forma de onda filtrada de 3 niveles está sesgada en el nulo de la curva de transferencia del MZM y modulación de luz de onda continua (CW) entre los puntos  $0$ ,  $V_{\pi}$  y  $2V_{\pi}$ . La luz modulada tiene un diagrama de la densidad espectral de potencia (PSD) y diagrama de ojo (véase la figura 2.9).

La señal DB seguirá un algoritmo de cambio de fase que dicta que se producirá un cambio de fase durante el medio del período de espacio. Las marcas separadas por espacios numéricos impares estarán  $180^{\circ}$  fuera de

fase entre sí, tal como se muestra en figura 2.10. Esta característica proporciona a DB una mayor inmunidad a los efectos de filtrado óptico y de dispersión cromática (CD) porque la energía superpuesta de las marcas separadas por un solo espacio (es decir, un patrón de 1 0 1 bits) tiende a cancelarse de forma destructiva, preservando así el nivel de espacio bajo. La ondulación cero tiene un efecto duplicado: causa una penalización de poder en exceso al mismo tiempo que mejora la inmunidad ISI.

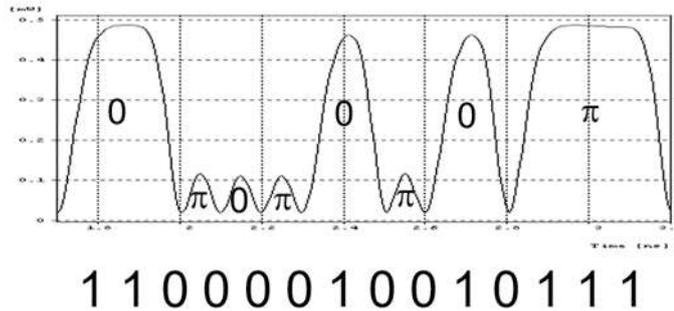


Figura 2. 10: Forma de onda de intensidad de base de datos típica que hace uso de cambios de fase en el medio de cada periodo de espacio.

Fuente: (Lerín, 2012).

## 2.5. Propagación de señales en fibra ópticas.

### 2.5.1. Pérdida óptica.

La pérdida óptica es un parámetro importante para la fibra. Cuando la señal óptica se transmite a través de la fibra, su potencia se pierde debido a la absorción de material y la dispersión de Rayleigh. La expresión de la pérdida de fibra se da de la siguiente manera:

$$P_t = P_0 \exp(-\alpha L) \quad (2)$$

Donde se llama constante de atenuación, generalmente expresada en dB/km;  $P_0$  es la potencia de la señal óptica a la entrada de una fibra de longitud  $L$ ; y  $P_T$  es la potencia transmitida. Las fibras de telecomunicaciones modernas exhiben una atenuación constante por debajo de 0,2db/km cerca de  $1,55 \mu m$  banda de longitud de onda a través de un ancho de banda de muchos THz.

La dispersión de Rayleigh es un mecanismo de dispersión fundamental que surge de las fluctuaciones de densidad aleatorias congeladas en la sílice fusionada durante la fabricación y domina en las longitudes de onda cortas.

La línea sólida representa la forma típica observada en los años 90, la línea discontinua representa la forma real en la Figura 2.11

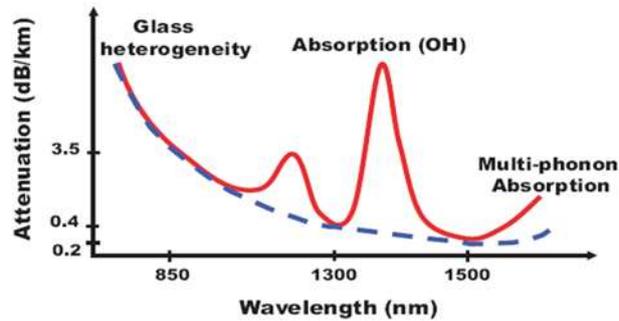


Figura 2. 11: Atenuación de una fibra de modo único estándar. La línea solida representa la forma típica observada en los años 90, la línea discontinua representa la forma real.

Fuente: (Lerín, 2012).

### 2.5.2. Emisión espontánea amplificada.

La emisión espontánea amplificada representa una fuente óptica de ruido gaussiano. Al igual que la ganancia del amplificador óptico, el espectro ASE es típicamente constante a través del espectro de señal. Sin embargo, las propiedades estadísticas de ASE pueden ser modificadas por interacciones no lineales durante la propagación de fibra. Si se colocan en cascada varios amplificadores ópticos para compensar periódicamente la pérdida de fibra, ASE se acumula en el sistema. Esta acumulación de ruido se refleja en relación señal/ruido óptico (*Optical Signal/Noise Ratio, OSNR*), que se degrada con cada amplificador a lo largo de la ruta de propagación. El OSNR se define típicamente como la potencia media de la señal óptica dividida por la potencia ASE, medida en ambas polarizaciones y en un ancho de banda de referencia óptica de 12.5 GHz.

### 2.5.3. Dispersión cromática (CD).

La dispersión cromática (CD) es una ampliación de la señal de entrada a medida que se desplaza por la longitud de la fibra. Es importante mencionar la fase óptica antes de cualquier explicación del CD o retraso del grupo debido a su relación matemática. El retardo de grupo se define como la primera derivada de la fase óptica con respecto a la frecuencia óptica. La dispersión cromática es el segundo derivado de la fase óptica con respecto a la frecuencia óptica. Estas cantidades se representan de la siguiente manera:

$$\text{Group Delay} = \frac{\partial \phi}{\partial \omega} \qquad \text{Chromatic Dispersion} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \omega^2} \quad (3)$$

Donde  $\phi$  = optical phase and  $\omega$  = optical frequency

La ampliación del espectro inducida por la dispersión sería muy importante incluso sin la no linealidad. Los efectos de la dispersión se pueden contabilizar ampliando la constante de propagación  $\beta$  de modo en una serie De Taylor sobre la frecuencia central  $\omega_0$ :

$$\beta(\omega) = n(\omega) \frac{\omega}{c} = \beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta_2(\omega - \omega_0)^2 + \dots \quad (4)$$

$$\text{where } \beta_m = \left. \frac{\partial^m \beta}{\partial \omega^m} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (m = 0, 1, 2 \dots)$$

Otro parámetro relativo a la dispersión de la fibra se utiliza más a menudo, que a menudo se conoce como parámetro de dispersión  $D$ . La relación entre  $D$  y  $\beta_1, \beta_2$  se muestra de la siguiente manera:

$$D = \frac{\partial \beta_1}{\partial \lambda} = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \beta_2 \approx \frac{\lambda}{c} \frac{\partial^2 n}{\partial \lambda^2} \quad (5)$$

Desde la ecuación (5), se puede ver que  $D$  tiene signo opuesto con respecto a  $\beta_2$ . La Figura 2.12 muestra la variación medida del parámetro de dispersión  $D$  con la longitud de onda para una fibra monomodo. En el régimen en el que la longitud de onda  $\lambda < \lambda_D, \beta_2 > 0$  ( $D < 0$ ), la fibra se dice que muestran una dispersión normal. En el régimen de dispersión normal, los componentes de alta frecuencia de la señal óptica viajan más lento que los componentes de baja frecuencia.

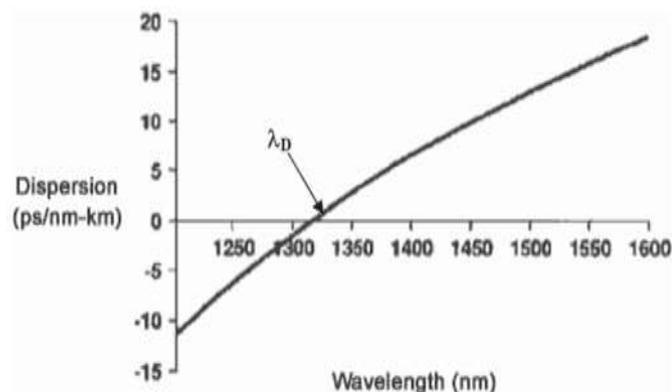


Figura 2. 12: Variación medida del parámetro de dispersión  $D$  con longitud d onda para una fibra monomodo.

Fuente: (Lerín, 2012).

La transmisión de solitón es posible en el régimen anómalo a través de un equilibrio entre la dispersión y los efectos no lineales. La dispersión juega un papel importante en la transmisión de la señal sobre las fibras. La interacción entre dispersión y no linealidad es un problema importante en el diseño del sistema de ondas ligeras. Existen otras fibras cuyas características han sido modificadas para tener un perfil de dispersión diferente a la sílice pura (Figura 2.13). Se tienen las siguientes fibras:

- ✓ **Dispersión cero** (DSF, fibra cambiada de dispersión) o pequeña dispersión (NZ-DSF, fibra de dispersión no cero pulsadas) alrededor de  $1,55\mu\text{m}$ . La principal ventaja de NZ-DSF se debe a la reducción de los efectos no lineales que requieren la coincidencia de fases como FWM (mezcla de cuatro ondas).
- ✓ **-Dispersión constante sobre una ventana grande** (DFF, Dispersión de fibra aplanada).

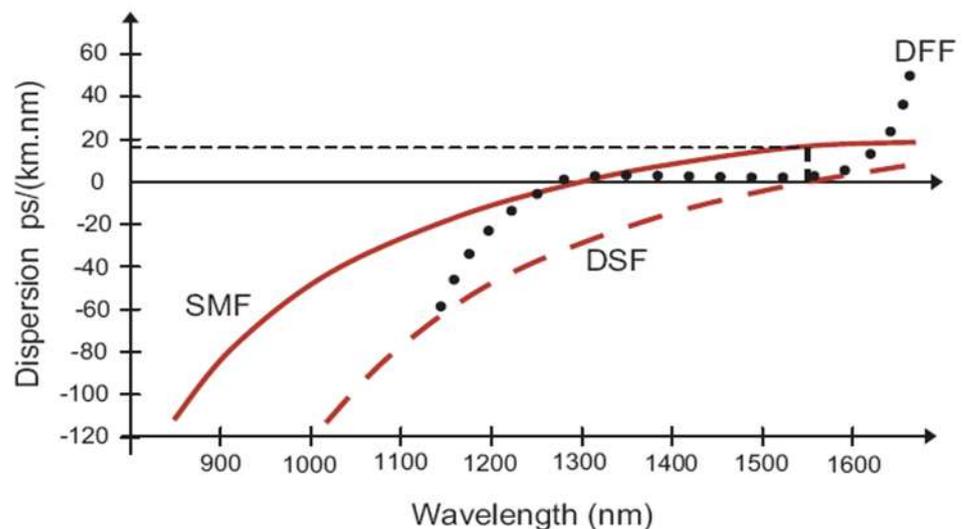


Figura 2. 13: Perfil de dispersión de varios tipos de fibra. SMF: fibra monomodo, DSF: dispersión de fibra desplazada, DFF: dispersión de fibra aplanada.

Fuente: (Lerín, 2012).

#### 2.5.4. Efectos no lineales.

Aunque el vidrio de sílice utilizado como material para la fabricación de fibras ópticas tiene coeficientes no lineales muy pequeños, los efectos no lineales en las fibras ópticas generalmente no son insignificantes. Esto se debe a que la intensidad óptica de una señal de propagación es alta a pesar del hecho de que la potencia de la señal es bastante baja (varios milivatios a decenas de milivatios).

La pequeña sección transversal de una fibra óptica hace que la intensidad sea muy alta, lo que en efecto es suficiente para inducir efectos significativos de no linealidad. Además, para los sistemas amplificados ópticamente, la distancia entre la regeneración es grande, por lo que los efectos no lineales pueden acumularse a largas distancias.

Los efectos no lineales se pueden dividir en dos casos basados en sus orígenes: dispersiones estimuladas y efectos ópticos Kerr. Este último es el resultado de la dependencia de intensidad del índice de refracción de una fibra óptica que conduce a una constante de fase que es una función de la intensidad óptica, mientras que la primera es el resultado de la dispersión que conduce a una intensidad dependiente de la atenuación constante.

Hay dos fenómenos de dispersión estimulados en una fibra óptica: la dispersión de Raman y la dispersión de Brillouin. La dependencia de intensidad del índice de refracción da como resultado modulación de fase automática (SPM), modulación de fase cruzada (XPM) y mezcla de cuatro ondas (FWM). Otra diferencia entre las dispersiones estimuladas y los efectos del índice de refracción no lineal es que la primera está asociada con potencias umbral en las que sus efectos se vuelven significativos. Todos estos efectos se resumen a continuación:

- ✓ **Modulación de la auto fase (SPM), modulación de fase cruzada (XPM):** SPM (modulación de fase automática) y XPM (modulación de fase cruzada) son los dos efectos no lineales más importantes que se originan a partir de la dependencia de intensidad del índice de refracción. SPM se refiere al cambio de fase auto inducido experimentado por un campo óptico durante su propagación en fibras ópticas.

XPM se refiere al desplazamiento de fase no lineal de un campo óptico inducido por un campo de propagación co-propagación en una longitud de onda diferente. Cuando dos campos ópticos en las frecuencias  $\omega_1$  y  $\omega_2$  polarizados a lo largo del eje  $x$  se propagan simultáneamente dentro de la fibra:

$$E = \frac{1}{2}x[E_1 \exp(-i\omega_1 t) + E_2 \exp(-i\omega_2 t) + c.c] \quad (6)$$

El desplazamiento de fase no lineal para el campo en  $\omega_1$  inducido por SPM y XPM se puede expresar como:

$$\phi_{NL} n_2 k_0 L (|E_1|^2 + 2|E_2|^2) \quad (7)$$

Donde  $n_2$  es el coeficiente de índice no lineal,  $k_0 = 2\pi/\lambda$  y  $L$  es la longitud de la fibra. En el lado derecho de la Ecuación (7), el primer término es el desplazamiento de fase no lineal inducido por SPM; y el segundo término es el cambio de fase no lineal inducido por XPM.

A partir de esta ecuación se puede decir que, para campos ópticos igualmente intensos, la contribución de XPM al desplazamiento de fase no lineal es dos veces en comparación con la de SPM. La figura 2.14 muestra un pulso (curva superior) que se propaga a través de un medio no lineal sufre un desplazamiento de auto frecuencia (curva inferior) debido a la modulación de auto fase. La parte frontal del pulso se desplaza a frecuencias más bajas, la parte posterior a frecuencias más altas. En el centro del pulso el cambio de frecuencia es aproximadamente lineal.

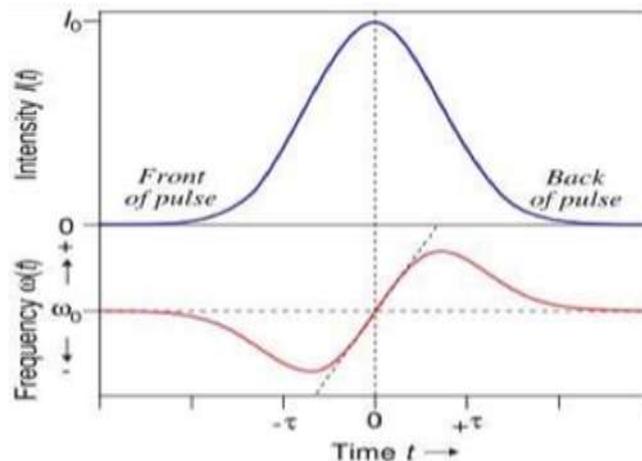


Figura 2. 14: Fenómeno de la modulación de la fase automática (SPM)  
Fuente: (Lerín, 2012).

- ✓ **Mezcla de cuatro ondas (FWM):** Cuando se lanza una señal óptica de alta potencia en una fibra, se pierde la linealidad de la respuesta óptica. La mezcla de cuatro ondas (FWM) es un tipo de efecto Kerr óptico, y

ocurre cuando la luz de dos o más longitudes de onda diferentes está presente en una fibra. Se puede decir que FWM ocurre cuando la luz de tres longitudes de onda diferentes se lanza en una fibra, dando lugar a una nueva onda, la longitud de onda de la cual no coincide con ninguna de las otras.

Cuando se aniquilan dos fotones de la bomba, se crean dos fotones: el primero en la frecuencia de la señal, el otro a una frecuencia complementaria llamada **idler** como se muestra en la Figura 2.15(a). En un contexto WDM, esta transferencia de potencia resultante perjudica la transmisión, ya que produce una conversación cruzada entre los canales.

Sin embargo, este proceso requiere una condición de coincidencia de fase que no se cumple espontáneamente cuando la dispersión cromática local no es cero. Por esta razón, FWM no será el efecto no lineal dominante en nuestro estudio en la Figura 2.15 (b). Sin embargo, se explota en varias aplicaciones como la conversión de frecuencia, demultiplexación o amplificación paramétrica. Por último, la conjugación de fase es una propiedad inherente de FWM que es particularmente útil.

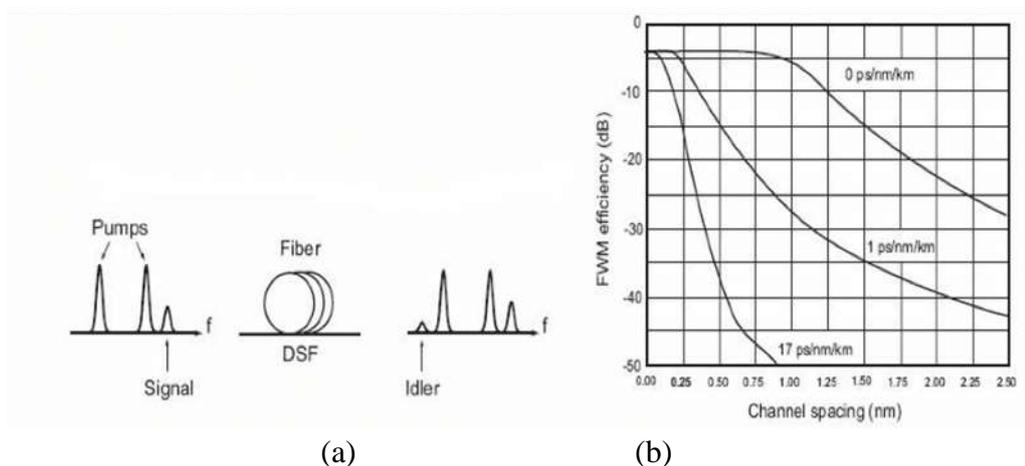


Figura 2. 15: (a) Efecto FWM en el dominio espectral después de la propagación de la señal y las dos bombas en la fibra DSF (b) eficiencia FWM en función del espaciado de canales para diversos valores de dispersión.

Fuente: (Lerín, 2012).

- ✓ **Dispersión de Brillouin estimulada:** La dispersión de Brillouin surge de la interacción de la luz con ondas de densidad de propagación o fonones acústicos. En este caso, la onda Stokes se genera opuesta a la dirección de la bomba en una frecuencia que es 11 GHz inferior. Esto significa que la potencia de salida de fibra ya no varía linealmente con la potencia incidente, sino que alcanza un umbral más allá del cual el exceso se refleja por completo.

Esta retro dispersión tiene un ancho de banda estrecho (hasta 10 MHz alrededor de  $1,55 \mu\text{m}$ ) que sólo se refiere fuentes continuas intensas. En nuestro trabajo, como el ancho del pulso es inferior a 1 ns, el poder requerido para obtener una dispersión significativa no se limita en esta banda, por lo tanto, se posterga este efecto.

- ✓ **Dispersión de Raman estimulada (SRS):** La dispersión de Raman surge de la interacción de la luz con los modos vibratorios de las moléculas constituyentes en el medio de dispersión; equivalentemente esto puede ser considerado como la dispersión de la luz de los fonones ópticos. En este caso, la onda Stokes generada se produce a una frecuencia 13 THz inferior a la frecuencia de la bomba.

Si el ancho de banda de este efecto es mayor (alrededor de 7 THz), sólo afectará a la propagación si el espectro de los pulsos superior a 13 THz: para pulsos intensos inferiores a 1 ps – en este caso la parte azul de la señal actúa como una bomba para su parte roja – o si el espectro contiene longitudes de onda espaciadas por este intervalo.

- ✓ **Dispersión del modo de polarización:** La dispersión del modo de polarización (PMD) se produce cuando diferentes planos de luz dentro de una fibra viajan a velocidades ligeramente diferentes, lo que hace imposible transmitir datos de forma fiable a altas velocidades. PMD es el de la deficiencia de correo para redes ópticas de mayor velocidad de datos (por encima de 40 Gbps).

Sin embargo, PMD no es sólo un problema a 40 Gbps; también es evidente en redes ópticas de 10 Gbps. Cuando la luz viaja hacia abajo una sola fibra de modo hacia el receptor, tiene dos modos de polarización que siguen la trayectoria de dos ejes. Se mueven hacia el receptor en ángulo recto entre sí.

Cuando el núcleo de la fibra que une la luz es asimétrico, la luz que viaja a lo largo de un eje de polarización se mueve más lento o más rápido que la luz polarizada a lo largo del otro eje. Este efecto puede extender el pulso lo suficiente como para que se superponga con otros pulsos o cambiar su propia forma para hacerlo indetectable en el receptor.

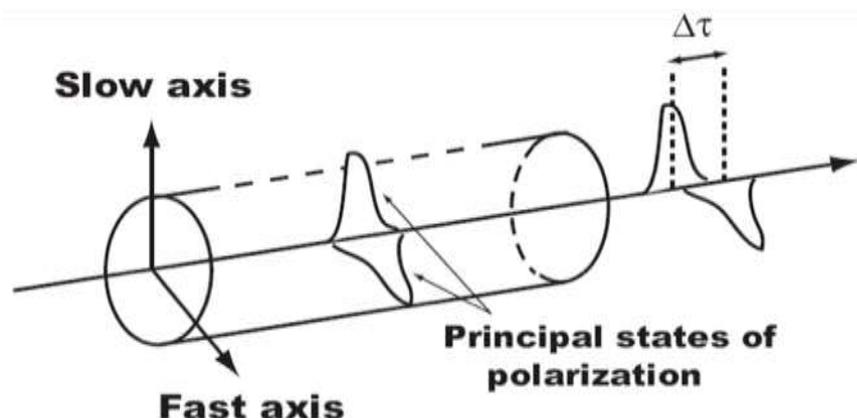


Figura 2. 16: Efecto PMD en un pulso óptico.  
Fuente: (Lerín, 2012).

Un pulso se propagará a través de esos dos ejes con diferentes velocidades de grupo. El retardo diferencial del grupo (DGD) entre los dos modos (Figura 2.16) da como resultado una ampliación del tiempo en la detección. En oposición a la dispersión cromática, estable y perfectamente conocida, PMD tiene una evolución aleatoria en el tiempo. Se puede mostrar que el DGD promedio aumenta con la raíz cuadrada de la longitud de la fibra. Las especificaciones de algunas fibras comerciales se presentan en la tabla 2.1

Tabla 2. 1: Parámetros de fibras comerciales a 1550 nm.

Fibra	Fabricante	D $\frac{ps}{km \cdot nm}$	S $\frac{ps}{(km \cdot nm)^2}$	$\alpha_0$ dB/km	$A_{eff}$ $\mu m^2$	PMD $ps/\sqrt{km}$
TrueWave™ RS	Lucent	4.5	0.045	0.22	55	< 0.1
LEAF™	Corning	4.2	0.09	0.22	72	< 0.1
TeraLight™ Ultra	Alcatel	8	0.052	< 0.22	63	< 0.04
Standart	Lucent, Corning Furukawa	16.9	0.055	0.23	87	< 0.1
Under-sea	Lucent	-3.1	0.05	0.215	50	< 0.1
Deeplight™	Pirelli	-2.2	< 0.12	< 0.23	70	< 0.1
Teralight™ Metro	Alcatel	8	0.058	< 0.25	63	< 0.08
DCF	Lucent	-100	-0.22	0.5	20	< 0.25
WB-DCF	Lucent	-95	-0.33	0.5	19	< 0.25
HS-DCF	Lucent	-100	-0.67	0.68	15	< 0.25

Fuente: (Lerín, 2012).

## 2.6. Amplificación óptica.

Hasta ahora, se ha centrado en la descripción y el modelado de los fenómenos físicos que ocurren en la fibra cuando se está propagando un campo eléctrico intenso. En este párrafo, se resumen diferentes soluciones técnicas centradas en la amplificación que permitieron eliminar algunas limitaciones y limitaciones físicas.

### 2.6.1. Amplificador de fibra dopada por Erbium (EDFA).

En el caso de un amplificador de fibra dopada por erbio (EDFA), se absorbe la energía de la bomba que opera a una de las longitudes de onda de absorción del ion de erbio (980 a 1480 nm). Los iones de erbio excitados son estimulados por cualquier señal alrededor de 1,5  $\mu m$  que se inyecta en la fibra.

El ion estimulado emite un fotón que tiene el mismo estado que el que vuelve al estado fundamental. Al mismo tiempo, se genera una emisión espontánea (SE) en la fibra con o sin la presencia de ninguna señal. Esta contribución no deseada se amplifica por el mismo mecanismo que la señal y

da lugar al ruido de emisión espontánea amplificada (ASE), que puede ser un problema para el aumento de los intervalos de fibra. La Figura 2.17 muestra un esquema simple del amplificador dopado de fibra.

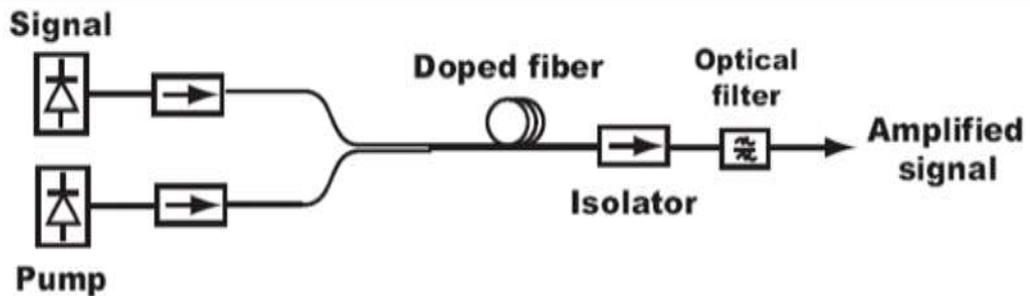


Figura 2. 17: Esquema de un amplificador dopado en fibra.  
Fuente: (Lerín, 2012).

### 2.6.2. Amplificación de Raman.

La técnica de amplificación anterior requiere el dopaje de una fibra, utilizada como medio de ganancia. Existe otra solución en la que la ganancia se obtiene en la fibra donde se propaga la señal. La dispersión de Raman estimulada (SRS) es el fenómeno físico en el origen de la amplificación. Por lo tanto, la fibra de transmisión se puede utilizar como un medio de amplificación, por lo que se crea una fibra con ganancia.

La señal óptica se inyecta en la fibra con la bomba, normalmente a una longitud de onda 100 nm más corta y se amplifica gradualmente a lo largo de la fibra (Figura 2.18). La transferencia de energía se produce cuando el fotón de la bomba renuncia a la energía para crear un nuevo fotón en la longitud de onda de la señal más algo de energía residual, que se absorbe como fonones.

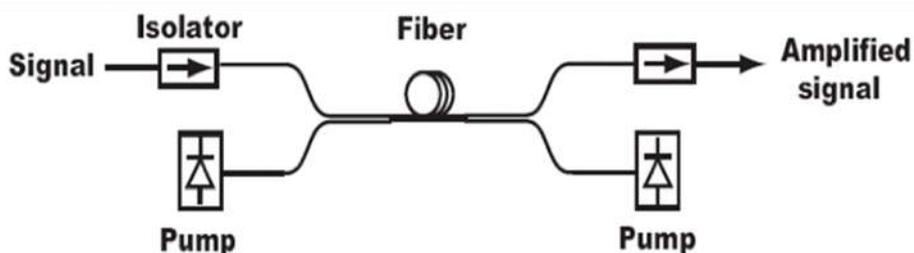


Figura 2. 18: Esquema de un amplificador Raman.  
Fuente: (Lerín, 2012).

Aunque este efecto se ha conocido y estudiado durante más de 30 años, la alta potencia de la bomba necesaria para obtener una ganancia de 10-15

dB retrasó su uso práctico. La llegada de EDFA también puso en marcha más investigaciones sobre esta tecnología. Sin embargo, la amplificación de Raman se utiliza con éxito con sistemas submarinos de ultra largo recorrido.

En este momento los diodos láser más potentes ahora están disponibles a un menor costo, lo que hace que el uso de esta tecnología sea más práctico. La capacidad de amplificar la señal en condiciones de bajo ruido es extremadamente importante para los sistemas de transmisión óptica. Distribuido a lo largo de la fibra, la ganancia de Raman mejora considerablemente el OSNR ya que al final de un intervalo de fibra.

Esta mejora suele ser representado por un factor de ruido equivalente que sería el mismo que el amplificador situado al final, produciendo la misma ganancia y la misma contribución de emisión espontánea. Por lo tanto, los amplificadores Raman tienen un factor de ruido equivalente menor que los EDFAs que en principio se limitan a valores superiores a 3 dB.

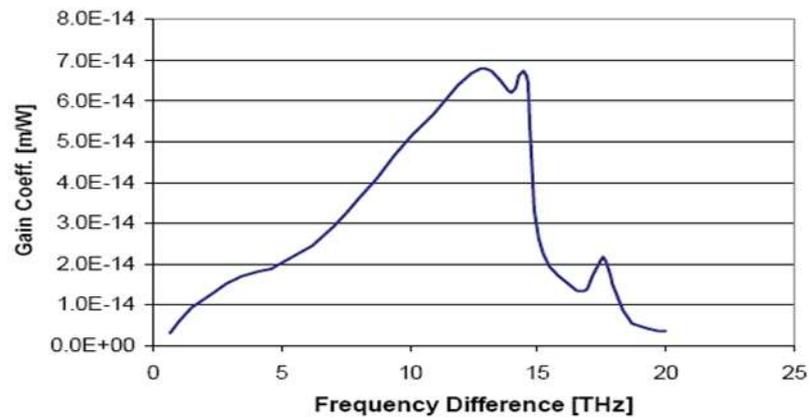


Figura 2. 19: Coeficiente de ganancia de Raman frente a la diferencia de frecuencia entre la señal y la bomba.  
Fuente: (Lerín, 2012).

### 2.6.3. Amplificación Híbrida.

Para una ganancia superior a 20 dB, la mejora equivalente del factor de ruido de la amplificación de Raman está limitada por la doble retro dispersión de Rayleigh. Impone un límite a la ganancia de Raman utilizable que no es más suficiente para compensar las pérdidas de fibra. Este es el caso de las transmisiones terrestres cuando se tienen en cuenta las pérdidas debidas a la compensación de dispersión y la multiplexación de caída sin

adición. Un EDFA de baja ganancia se agrega generalmente al amplificador Raman para superar estas limitaciones.

El factor de ruido resultante de esta la amplificación híbrida está totalmente determinada por el amplificador Raman colocado en primer lugar. La amplificación óptica no sólo se limita a las técnicas presentadas anteriormente. La amplificación paramétrica es un ejemplo importante con respecto al interés que provoca.

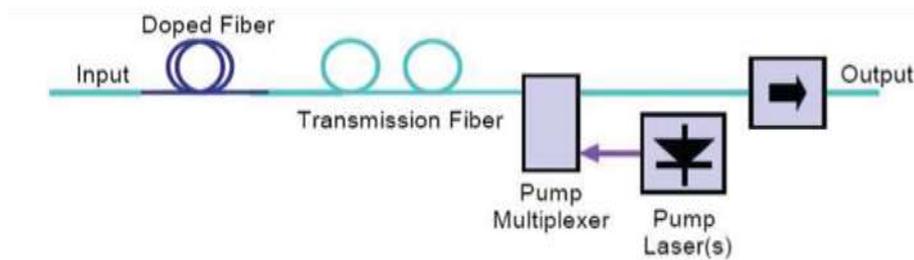


Figura 2. 20: Amplificador híbrido de fibra dopada Raman.  
Fuente: (Lerín, 2012).

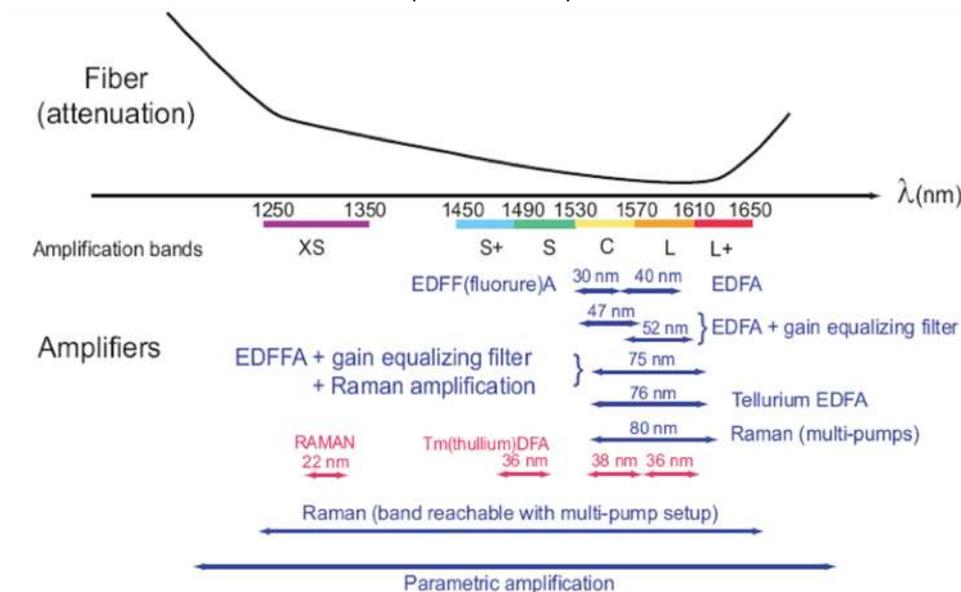


Figura 2. 21: Bandas de amplificación cubiertas por diversas tecnologías de amplificación.  
Fuente: (Lerín, 2012).

La Figura 2.20 muestra una de las muchas configuraciones posibles para el amplificador híbrido Raman donde la fibra dopada se bombea remotamente a través de la fibra de transmisión. La Figura 2.21 da una idea de las bandas cubiertas por diferentes tecnologías.

## CAPÍTULO 3: SIMULACION Y RESULTADOS OBTENIDOS

### 3.1. Software de simulación OptiSystem.

El software OptiSystem ha traído una nueva era en el campo de las telecomunicaciones como ayuda en investigaciones y propuestas de tesis de grado y posgrado. La razón detrás de tal éxito de la fibra óptica se debe a sus diversas propiedades como baja pérdida de transmisión, alto umbral de daño óptico y baja linealidad óptica. Todas estas propiedades cumplidas han permitido lograr la transmisión a larga distancia de las señales. Sin embargo, no importa cuán eficiente sea la fibra óptica, como todas las cuestiones tecnológicas, también están limitadas por los efectos de la dispersión. La dispersión conduce a la ampliación del pulso de las señales a medida que viajan a través de la fibra, lo que provoca la superposición de la señal. Esto crea errores en la salida del receptor, lo que se conoce como interferencia entre símbolos (ISI).

El funcionamiento de la implementación de OptiSystem está relacionado con el fenómeno de la reflexión interna total que se define como la condición cuando la luz incidente está en un ángulo que es mayor que un valor umbral (conocido como ángulo crítico) denotado por  $\theta_c$ , entonces la luz es totalmente reflejada de nuevo. No se produce refracción. La implementación de OptiSystem generalmente se clasifica como: (1) fibra monomodo (*Single Mode Fiber, SMF*), y (2) fibra multimodo (*Multi Mode Fiber, MMF*).

El tamaño del núcleo en SMF es típicamente de 9 micras, mientras que en MMF varía de 50 micras a 62.5 micras. Los modos en una fibra multimodo son los múltiples caminos por los cuales la luz puede viajar. Una longitud de onda específica se conoce como la longitud de onda de corte, para la cual una fibra monomodo puede convertirse en fibra multimodo cuando está por debajo de este valor umbral. Los efectos de distorsión ocurren más en la fibra multimodo debido a los diversos caminos tomados por la señal de luz para viajar.

Las siguientes son algunas partes de comunicación de orientación de investigación de OptiSystem:

- a. **Transmisor:** básicamente es la primera y más importante parte de la comunicación que consta de varios componentes, como la fuente de luz, una modulación del proveedor de impulsos, un modulador de intensidad y un generador de datos binarios.
- b. **Canal:** es un medio para el intercambio de información entre el punto único o múltiples puntos. En los sistemas de fibra óptica, el canal es de fibras de vidrio o guía de ondas que juegan un papel para pasar los pulsos ópticos del transmisor al receptor. En lo que respecta a la seguridad de la información confidencial, como en el ámbito militar, la fibra óptica es más segura que los medios eléctricos. El principio para la transmisión en la fibra óptica es la reflexión interna total y, debido a este fenómeno, el tamaño del núcleo y el revestimiento es demasiado pequeño. Para la realización de TIR dentro del cable de fibra óptica, se fabrica una cubierta de protección en la parte superior del revestimiento para evitar también las fugas y la protección.
- c. **Receptor:** para obtener la señal de información en forma eléctrica, se necesitan fotodetectores, que se encuentran dentro del receptor. Los fotones de luz se convierten y se utiliza un filtro de paso bajo adicional para eliminar los ruidos que se ven afectados por la señal mientras viajan a través de fibra óptica. En general, los detectores son de dos tipos, tales como P-i-N y el fotodetector de avalancha (APD).

### 3.2. Desarrollo de los escenarios de simulación.

En esta sección se detallan los dos escenarios de simulación que se diseñan sobre la plataforma de simulación OptiSystem. La primera parte se observa la reducción de efectos de la mezcla de cuatro ondas (FWM) utilizando el formato de modulación duobinario. La segunda parte se diseña un sistema PON Híbrido, pero comparando cinco formatos de modulación para comprobar que el formato duobinario es el más óptimo para enlaces de largo alcance.

### **3.2.1. Descripción del escenario 1: reducción de efectos de FWM utilizando modulación Duobinaria.**

Con el fin de satisfacer las enormes demandas de capacidad impuestas a la red de transmisión central por el crecimiento explosivo de las comunicaciones de datos, se está incrementando el número de canales ópticos en redes ópticas WDM densas (DWDM). Puesto que el ancho de banda de ganancia de los EDFA es limitado, estos requisitos para un número muy grande de canales significan que el espaciado del canal tendrá que ser pequeño.

Las normativas actuales de la UIT especifican que la red tiene espaciado de canales de 100 GHz, pero los sistemas se están considerando con un espaciado de canal de 50 GHz a 25 GHz. En este espacio, los efectos no lineales de la fibra óptica pueden inducir deficiencias graves del sistema y ahora se están desarrollando esquemas de modulación que son robustos para el comportamiento lineal y no lineal de la fibra. Se sabe que las técnicas de modulación duobinaria (normal y modificado) comprimen el espectro óptico, facilitando así el empaquetado más ajustado de los canales en la ventana de ganancia de EDFA.

También se ha informado de que la variante de 2 niveles de señalización duobinaria casi elimina el impacto de SBS ya que el componente portador óptico se suprime. La mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing, FWM*) es otro efecto no lineal que puede limitar el rendimiento de los sistemas WDM.

En este escenario de simulación, se demostrará experimentalmente que un formato de modulación duobinaria de 2 niveles suprime los efectos no lineales de FWM en dos canales WDM estrechamente espaciados. Esto es particularmente frecuente en redes ópticas que emplean fibra monomodo de dispersión desplazada (DSF).

Hasta nuestro conocimiento, esta es la primera demostración experimental de la misma. La configuración experimental se valida mediante el software de simulación OptiSystem.

### 3.2.2. Configuración del escenario 1.

Se llevaron a cabo dos experimentos; uno era determinar el nivel de productos FWM en un sistema binario modulado convencional, y otro para determinar el nivel de los productos FWM en un sistema duobinario de 2 niveles. La potencia media de lanzamiento se mantuvo tan constante como era posible para todos los experimentos. La configuración experimental se muestra en la figura 3.1.

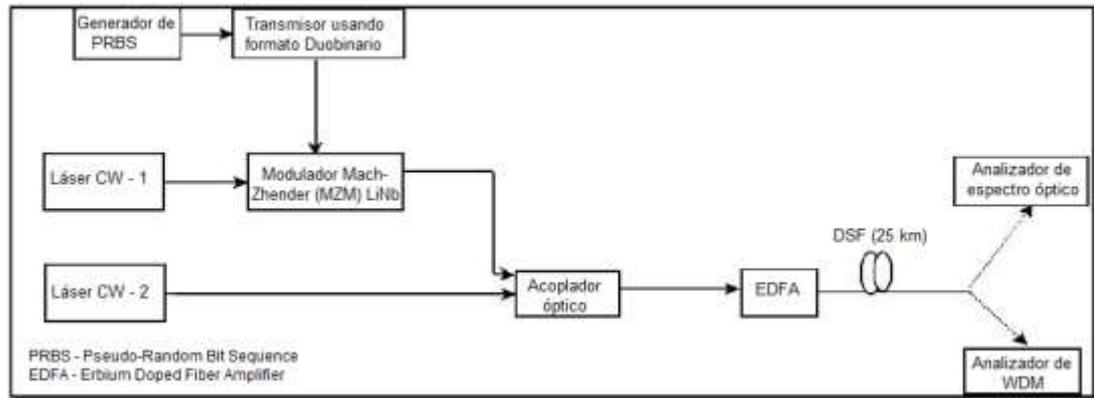


Figura 3. 1: Esquema experimental del escenario 1.

Elaborado por: Autor.

Un generador de secuencias binarias impulsa el transmisor óptico en ambos experimentos. El generador de patrones produce un PRBS a una velocidad de bits de 40 Gbps, y se utiliza un láser de onda continua (CW LASER-1) que está operando a longitud de onda 1552 nm y la potencia dada es de 4 mW, el transmisor óptico genera una señal óptica modulada (binario o duobinario dependiendo del experimento) que se combina con el segundo soporte óptico no modulado en el combinador óptico de 2 dB. El segundo diodo laser (CW LASER-2) funciona a una longitud de onda 1551 nm y la potencia dada es de 3 mW. Un amplificador de fibra dopada de erbio (EDFA) sigue al acoplador para aumentar la potencia de lanzamiento en la fibra a +10dBm.

Las señales se transportan a lo largo de 25 km de fibra de dispersión desplazada (DSF) operando a una dispersión cercana a cero. DSF se utiliza en este experimento para permitir la observación de un efecto no lineal significativo sin que requieran un intervalo de fibra muy largo. En este experimento DSF tiene factor de dispersión 0.63 ps/nm/km. El espectro

después de la propagación a través de la DSF se ve en un analizador de espectro óptico (OSA). El codificador duobinario utilizado consistía en una línea de retardo de un bit. La salida de la línea de retardo se agregó a la señal original para generar una señal media cero de tres niveles.

Esta señal se amplificó y se aplicó a un modulador Mach-Zehnder equilibrado de una sola unidad que estaba sesgado con una transmisión mínima. Esto genera una señal óptica de dos niveles que mostraba un desplazamiento de fase en el campo óptico para los dos extremos de las señales de tres niveles. Dado que la secuencia de datos de entrada era un PRBS, no era necesario incluir una etapa de codificación previa de codificación diferencial como se utilizaría con datos aleatorios.

### **3.2.3. Descripción del escenario 2.**

Con un número creciente de aplicaciones y el tráfico de red, la fibra óptica se utiliza ampliamente en la parte de acceso de la red. La red óptica pasiva abarca la red conectada por fibra óptica entre la oficina central (CO) y el suscriptor final. Los elementos de red entre la CO y el suscriptor constituyen la red de distribución óptica (*Optical Distribution Network, ODN*). En el ODN solo se utilizan dispositivos pasivos. La oficina central tiene la terminal de línea óptica (*Optical Line Terminal, OLT*) que conecta el PON con la red principal. La unidad de redes ópticas (*Optical Network Units, ONU*) termina la red óptica pasiva (*Passive Optical Network, PON*) y proporciona una serie de servicios al usuario como voz, vídeo, datos, etc.

La ventaja de utilizar una PON es que se utilizan fibras de menor longitud y el equipo de oficina central es compartido por un número de suscriptores. Hay diversas variantes de PON como el EPON que es basada en la multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing, TDM*) y en la multiplexación por división de longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*). En una red EPON, la información en la dirección descendente se transmite a todos los suscriptores que comparten las fibras y para la transmisión ascendente de las ONUs, se utiliza el protocolo de acceso

múltiple como el acceso múltiple de división de tiempo (*Time Division Multiple Access, TDMA*).

Las tramas Ethernet se utilizan que tiene una velocidad de transmisión ascendente y descendente simétrica de 1 Gbps. Las longitudes de ondas de 1490 nm y 1310 nm se utilizan para el tráfico descendente y el tráfico ascendente respectivamente. Los servicios de superposición como el vídeo RF (analógico) reserva la longitud de onda de 1550 nm. IEEE 802.3 fue modificado a IEEE 802.3av para formar 10 Gbps en una EPON que soporta el funcionamiento simultáneo de 10 Gbps en una longitud de onda descendente y 1 Gbps en una longitud de onda diferente para el funcionamiento ascendente en la mismo PON. Actualmente hay 40 millones de puertos EPON instalados.

En una red WDM PON, varios PON virtuales coexisten en la misma arquitectura PON. A cada ONU se le asigna una longitud de onda específica. La transmisión hacia/desde una ONU ocurre a través de la longitud de onda asignada. Logrando así una mejor privacidad y escalabilidad, ya que cada ONU recibe solo su propia longitud de onda, pero el costo de los componentes WDM y el costo de configuración inicial de la red WDM son muy altos. También la temperatura puede hacer que la longitud de onda se desvíe.

Por lo tanto, se necesitan las medidas de control de temperatura adecuadas. WDM-PON proporciona una mejor privacidad y se mejora la escalabilidad, ya que cada ONU está dedicada a una sola longitud de onda, pero el inconveniente es que es bastante caro y el ancho de banda no se utiliza en su máxima extensión. Con el fin de combinar los beneficios de EPON y WDM PON, se propone una PON híbrida en el que un subconjunto de ONUs comparten una sola longitud de onda y, por lo tanto, combina las ventajas de EPON y WDM PON.

El papel de los formatos de modulación; se ha demostrado que los componentes ópticos, los amplificadores ópticos y las fibras ópticas son los principales actores para proporcionar una alta eficiencia espectral en las redes

ópticas. El formato de modulación especifica cómo se convierte la secuencia de bits de dominio eléctrico a óptico. La información se transporta en amplitud, fase o polarización de la señal.

El enfoque está en el análisis de diferentes formatos de modulación, tales como: (1) NRZ (no retorno a cero), (2) RZ (retorno a cero), (3) CSRZ (retorno a cero de portador suprimida), (4) DB (Duobinario), y (5) Mod-DB (Duobinario Modificado), todos serán modelados sobre una PON híbrida.

### **3.2.3.1. Formato de modulación de datos.**

En el formato de modulación RZ, la señal vuelve a cero entre cada pulso incluso si se produce un número de 0s o 1s consecutivos en la señal. No se requiere que se envíe un reloj separado junto con la señal, pero utiliza el doble del ancho de banda para lograr la misma velocidad de datos en comparación con el formato que no es de retorno a cero. Los pulsos RZ se amplían más rápidamente por dispersión y esto lo hace más robusto para el efecto de la no linealidad ya que el efecto de no linealidad es proporcional a la intensidad de la señal.

Para la sensibilidad requerida del receptor, la potencia transmitida también se puede reducir empleando el formato de señal RZ en lugar de la NRZ. Esto implica que la distancia de transmisión se puede aumentar en comparación con la señal NRZ para la misma potencia transmitida. En NRZ, los unos se representan generalmente por voltaje positivo y los ceros se representan generalmente por un voltaje negativo, sin condición neutra o de reposo. Es el formato de modulación más utilizado debido a su menor ancho de banda de señal por un factor de 2 en comparación con el formato de modulación RZ. También se puede configurar fácilmente. Sin embargo, está influenciado por la interferencia entre símbolos, la dispersión y la no linealidad.

En el formato de modulación CSRZ que es un formato de modulación pseudo-multinivel la información se codifica en los niveles de intensidad (que representan el lógico y cero), pero para cada bit, la fase se cambia por  $\pi$ . Debido a esta alternancia de fase no tiene ningún componente de DC. El

portador se suprime en el espectro. El ancho de banda también es menor en comparación con el formato de retorno a cero convencional. También se considera que es más tolerante a las deficiencias no lineales en un canal y proporciona una eficiencia espectral mejorada en sistemas de alta velocidad binaria.

En el formato de modulación duobinario, se utilizan dos niveles de intensidad para la codificación de la información y la fase se cambia por el valor de  $\pi$  sólo para 1 bits separados por un número impar de 0 bits. La ventaja del formato DB es que tiene una mayor tolerancia a los efectos de la dispersión cromática y tiene un ancho espectral reducido. Se puede utilizar para la transmisión en largos intervalos de fibra sin la necesidad de compensación de dispersión.

El formato de modulación duobinaria modificado tiene un ancho de banda óptico mucho más estrecho en comparación con un formato Duobinary. Esto conduce a una mayor tolerancia de dispersión y mayor tolerancia a la no linealidad de la fibra. Aquí, se voltean las fases de dos grupos de "uno" que envuelven un "cero" aislado, lo que conduce a una generación de pulsos fantasma reducida causada por la mezcla intracanal de cuatro ondas. Se requieren dos moduladores ópticos para obtener esta señal; uno para generar señal duobinaria de NRZ y el otro para convertir los datos de NRZ a señal RZ. Sin embargo, esto conduce a un mayor costo de transmisión.

Teniendo en cuenta todos los formatos de modulación anteriores, cada uno con sus propios pros y contras, el objetivo principal de este documento es analizar los formatos de modulación para entender qué formato proporciona un alcance más largo en una red PON híbrida.

#### **3.2.4. Configuración del escenario 2.**

En el modelo considerado para la simulación, el sistema de acceso óptico de una PON Híbrida consta de 4 canales, cada canal consta de un divisor pasivo conectado a 4 ONUs, tal como se muestra en la figura 3.2. La velocidad de transmisión es de 10 Gbps por canal con frecuencia central como

193.1 THz. El espaciado de canal se elige para ser 100 GHz, que es el espaciado recomendado según la recomendación ITU-T G.694.1. La simulación se lleva a cabo utilizando OptiSystem 7.0.

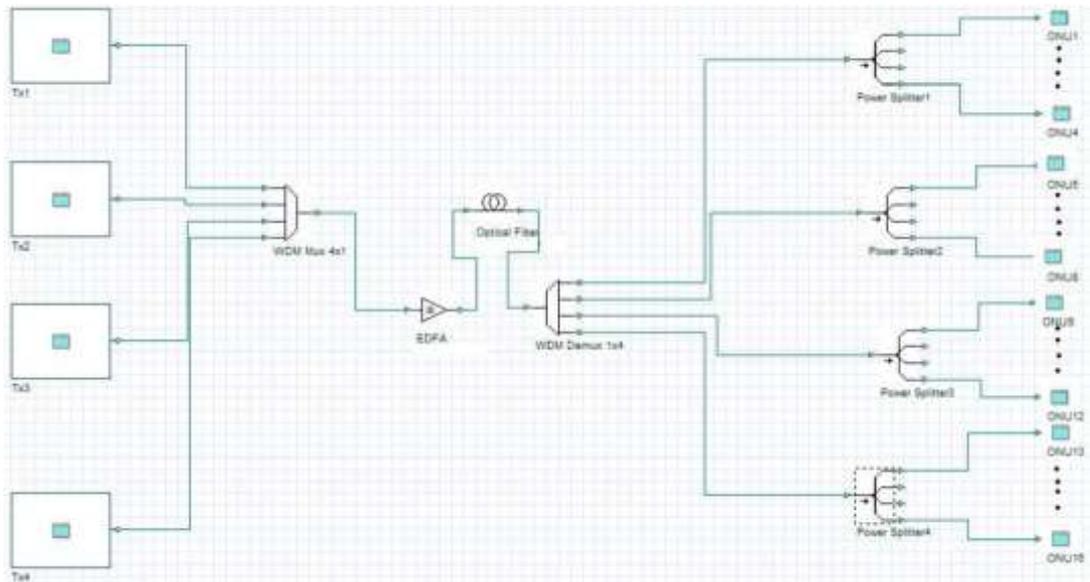


Figura 3. 2: Simulación de red PON Híbrida de 4 canales con 16 suscriptores con una velocidad de transmisión de 10 Gbps.  
Elaborado por: Autor.

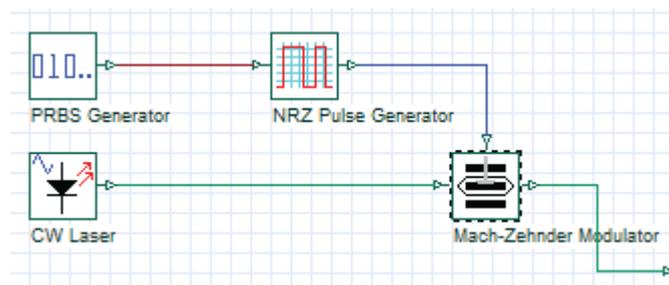


Figura 3. 3: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación NRZ.  
Elaborado por: Autor.

La OLT interconecta la red de acceso con la red de proveedores de servicios. La OLT se encuentra en la oficina central (CO) y el receptor óptico se coloca en la ONU en las instalaciones del suscriptor. La OLT consiste en un transmisor óptico. Aquí sólo se considera la transmisión descendente. La red de distribución óptica contiene un multiplexor WDM, un amplificador EDFA y un demultiplexor WDM. Todos los elementos de la ODN están conectados a las ONUs a través de una fibra de modo único (SMF). La pérdida de inserción de 3 dB es que los transmisores que emplean diferentes formatos de modulación son proporcionados por el multiplexor y el demultiplexor. Los

transmisores que emplean diferentes formatos de modulación se muestran en las figuras 3.3 a 3.7.

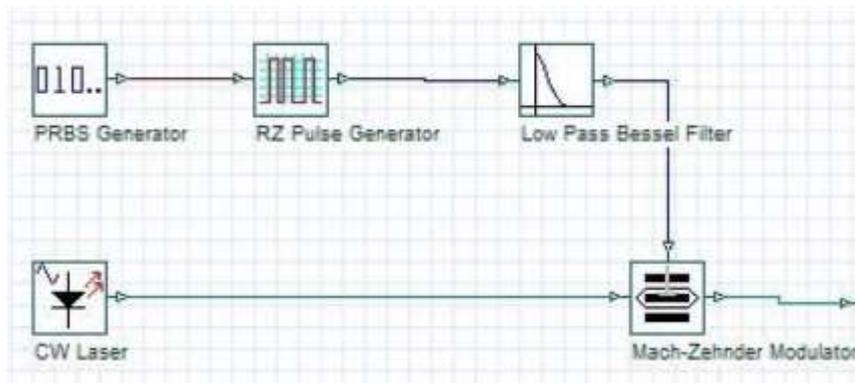


Figura 3. 4: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación RZ.  
Elaborado por: Autor.

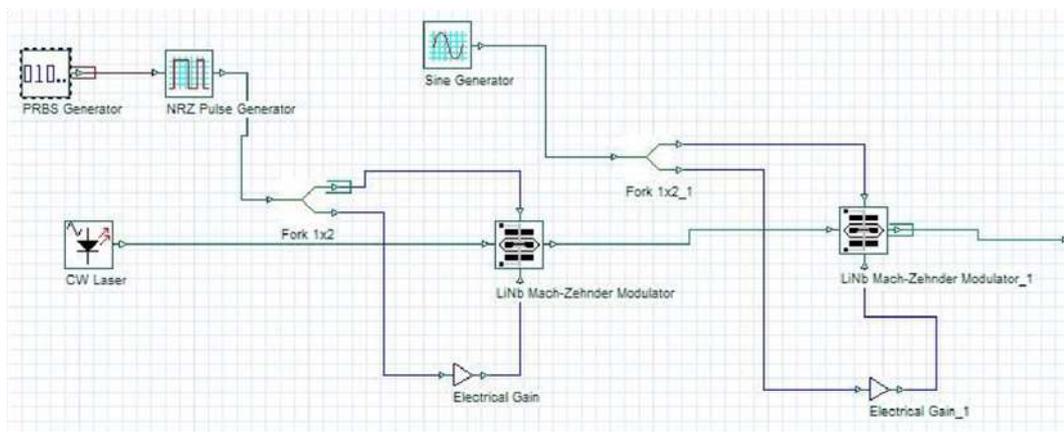


Figura 3. 5: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación CSRZ.  
Elaborado por: Autor.

Un generador PRBS (Pseudo Random Bit Sequence) se utiliza para generar pulsos de NRZ. Este generador tiene una velocidad de bits de 10 Gbps. La señal eléctrica se proporciona entonces al modulador Mach-Zehnder (MZM). El MZM tiene un láser de onda continua (CW). Esto se muestra en la figura 3.3. El láser CW tiene una potencia de salida de +2dBm y un ancho de línea de 10MHz. La señal óptica de salida se obtiene de la salida del MZM.

La figura 3.4 muestra un transmisor de RZ. En esto, la única diferencia entre este transmisor y el transmisor de NRZ es que la señal eléctrica es generada por el generador de impulsos de RZ seguido de un filtro de Bessel de paso bajo de la 5to orden.

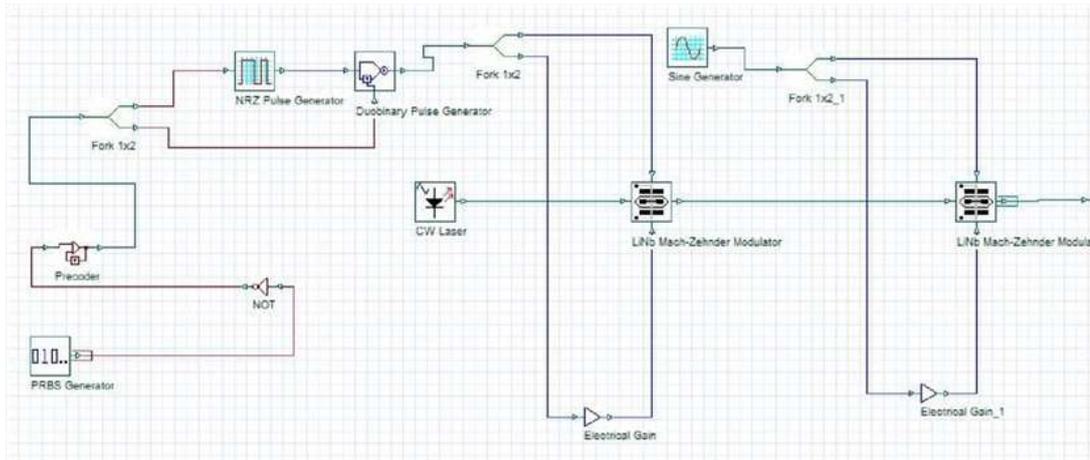


Figura 3. 6: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación DB.  
Elaborado por: Autor.

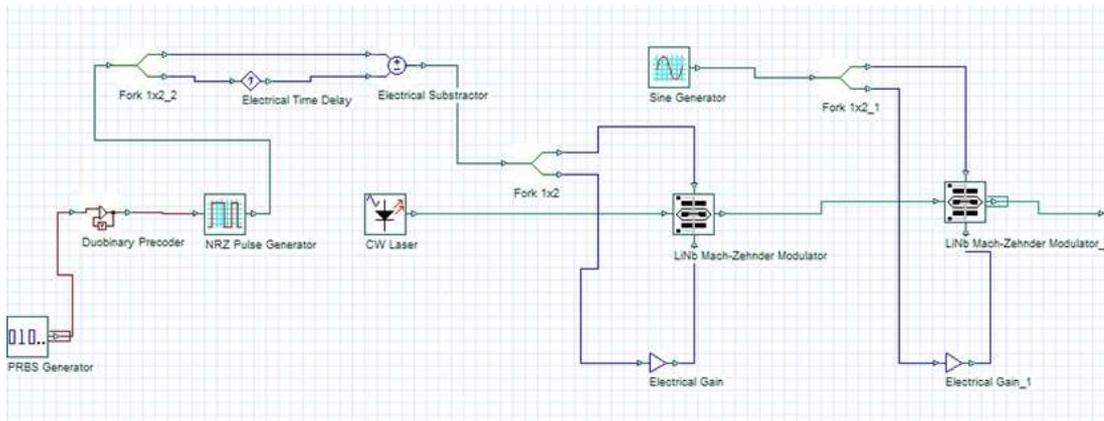


Figura 3. 7: Transmisor óptico para implementar el formato de modulación Mod-DB.  
Elaborado por: Autor.

En el transmisor CSRZ, la modulación se realiza en dos etapas. La modulación de fase o intensidad se lleva a cabo por el primer modulador Mach-Zehnder (MZM). Se aplica una señal sinusoidal con frecuencia igual a la mitad de la velocidad binaria al segundo modulador MZM. Esto aplica una fase óptica alternativa entre la clase de tiempo para los intervalos de tiempo vecinos, tal como se muestra en la figura 3.5.

La figura 3.6 muestra el transmisor duobinario. Una señal de NRZ duobinaria se crea primero utilizando un precodificador y un generador de pulsos duobinario. La salida de la que entonces conduce el primer modulador MZM que luego es seguido por un segundo modulador. Se utiliza una señal sinusoidal para conducir el segundo modulador. En el transmisor duobinario modificado (Mod-DB) se muestra en la figura 3.7, la fase de los bits '1's se

modifica sólo después de que aparezca un bit '0' que alterna entre 0 y  $\pi$  para los bits '1'.

### 3.3. Análisis de resultado obtenidos.

#### 3.3.1. Análisis del escenario 1.

Con un espaciado de canal de 1 nm, el nivel de los productos de la mezcla de cuatro ondas (FWM) de primer orden se midió tanto para el caso binario como para el caso duobinario. Las figuras 3.8 y 3.9 muestran las gráficas de espectro obtenidas con el analizador de espectro óptico, mientras que la tabla 3.1 proporciona los valores numéricos de los niveles de los cuatro componentes marcados desde P1 a P4 en la figura 3.8.

P1 y P2 son las portadoras, mientras que P3, P4 son los productos de la mezcla de cuatro ondas (FWM). Al igual que en este experimento, se ha utilizado el láser CW-1 que está operando a 1552 nm, es decir, en términos de frecuencia  $f_1=193.165243$  THz y para el láser CW-2 operando a 1551nm es decir en términos de frecuencia  $f_2=193.2897$  THz. Debido al efecto de FWM se observan dos productos FWM no deseados en

$$P_3 \text{ a } 2f_1 - f_2$$

$$P_4 \text{ a } 2f_2 - f_1$$

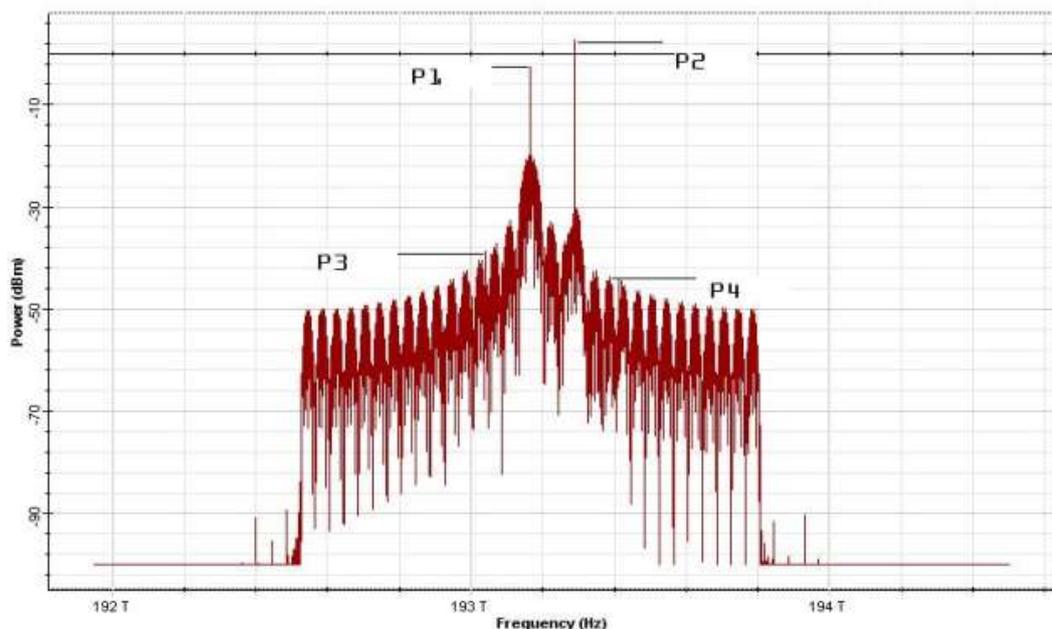


Figura 3. 8: Grafica espectral en la salida de fibra para modulación binaria.  
Elaborado por: Autor.

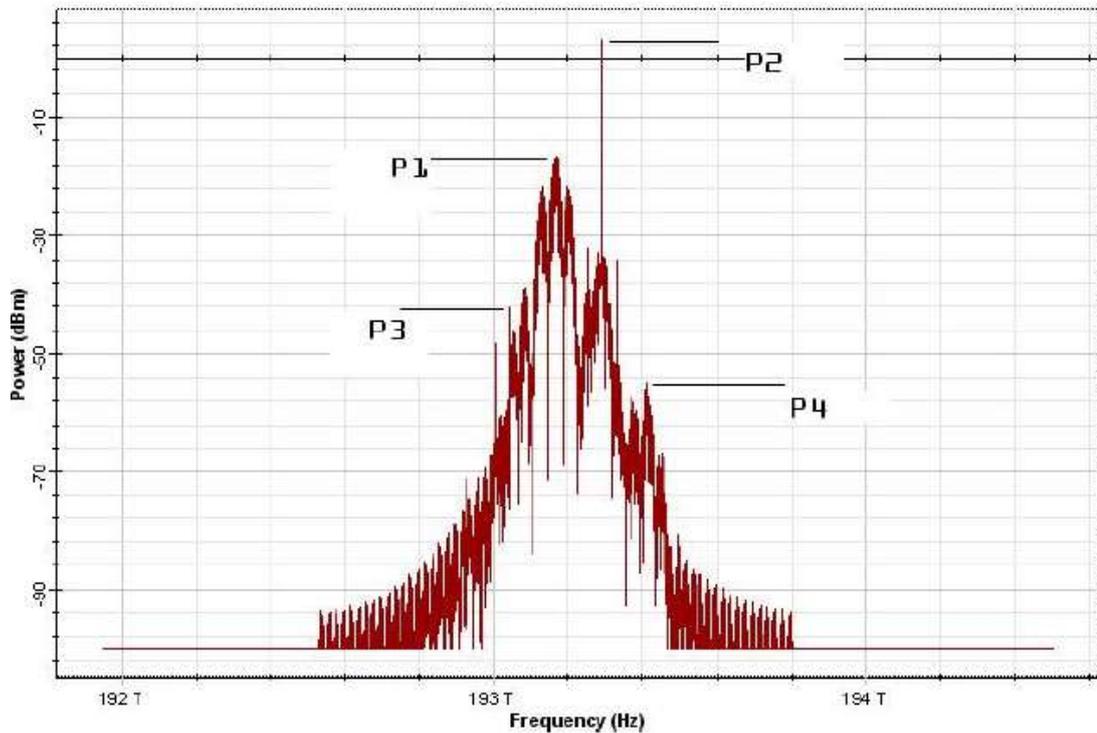


Figura 3. 9: Grafica espectral en la salida de fibra para modulación Duobinaria.  
Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 1: Niveles de las señales ópticas en el caso binario y duobinario.

	P1 (dBm)	P2 (dBm)	P3 (dBm)	P4 (dBm)
Binario	-2.39946	2.7133	-38.6648	-44.1354
Duobinario	-16.6742	2.98635	-42.5242	-54.539

Elaborado por: Autor.

Los resultados anteriores muestran que la codificación duobinaria suprime los productos de FWM en 3.8594 dB en el caso P3 y 10.4036 dB en el caso P4. Como otro experimento, se investigó la dependencia de la supresión de los productos de FWM en el espaciado del portador óptico. El espaciado del canal fue variado de 0.25 nm a 1 nm para los casos binarios y duobinario, respectivamente. Los resultados presentados en la tabla 3.1 muestran cómo el nivel promedio de los productos de FWM en relación con los niveles promedio de los dos portadores ópticos varía sobre este rango de espaciado de canal. Como se puede ver, la adopción de ganancias duobinaria de supresión en el producto de FWM que van desde alrededor de 10 dB a alrededor de 1 dB, sobre esta gama de separaciones.

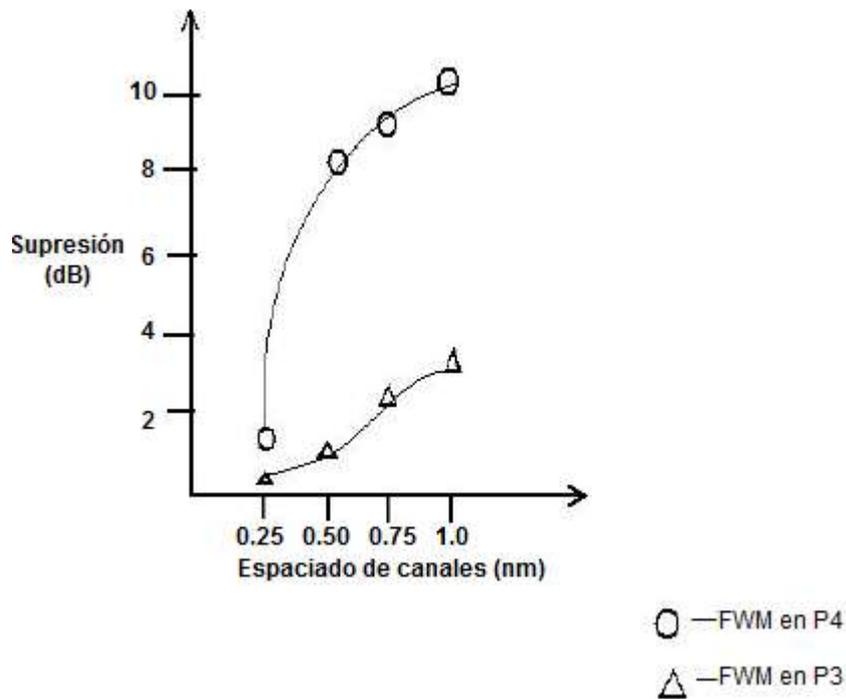


Figura 3. 10: Supresión media del producto FWM en relación con el espaciado del canal.

Elaborado por: Autor.

### 3.3.2. Análisis del escenario 2.

En este escenario se han analizado cinco formatos de modulación diferentes, tales como: (1) no retorno a cero (NRZ), (2) retorno a cero (RZ), (3) retorno a cero de portadora suprimida (CSRZ), (4) duobinario (DB), y (5) duobinaria modificada (Mod-DB) con el objetivo de identificar el formato de modulación más adecuado para la red óptica pasiva híbrida (Hybrid PON, HPON). En las figuras 3.11 a 3.15 se muestran los diagramas de ojo obtenidos simulando los diferentes formatos de modulación. Para lo cual la tasa de error de bits (BER) se analiza para diferentes longitudes de fibra óptica (km) para cada uno de los formatos de modulación, tal como se puede apreciar en las gráficas de la figura 3.16. La BER de menos de  $10^{-9}$  se utiliza para evaluar el rendimiento de la red. Mientras, que en la figura 3.17 se muestra el factor Q (calidad) alcanzado por los diferentes formatos de modulación.

La distancia máxima hasta la cual la transmisión es posible es de 105 Km. Se alcanza una velocidad de error de bits de  $<10^{-9}$  para esta distancia mediante el uso de formato de modulación DB cuando se utiliza un EDFA de una potencia de salida de +20dBm. La longitud óptima de EDFA se eligió en

función de los resultados de optimización mediante la simulación. Esto es necesario para elegir la ganancia y la longitud correctas de EDFA con el fin de proporcionar suficiente potencia para la transmisión sin causar efectos no lineales.

El formato de modulación duobinario modificado (Mod-DB) da como resultado una distancia de transmisión de 75 km en las mismas condiciones y el formato de modulación de retorno a cero (RZ) con solo 45 km. Los peores resultados se obtienen de los formatos de modulación de retorno a cero de portador suprimida (CSRZ) y no retorno a cero (NRZ) que muestra una  $BER > 10^{-9}$ . Aunque el formato de modulación de no retorno a cero (NRZ) es ampliamente utilizado, la distancia máxima de transmisión restablecida es muy menor, ya que tiene menos tolerancia a los efectos de dispersión y se encuentra como altamente inadecuado para una red de acceso híbrido.

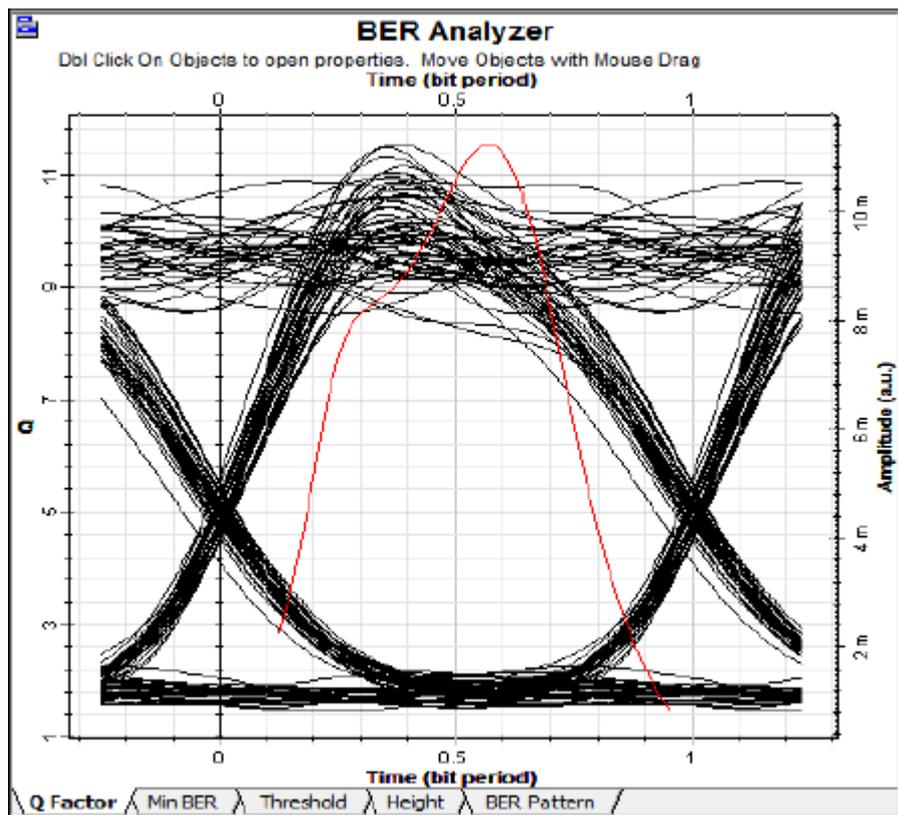


Figura 3. 11: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación de retorno a cero (RZ).

Elaborado por: Autor.

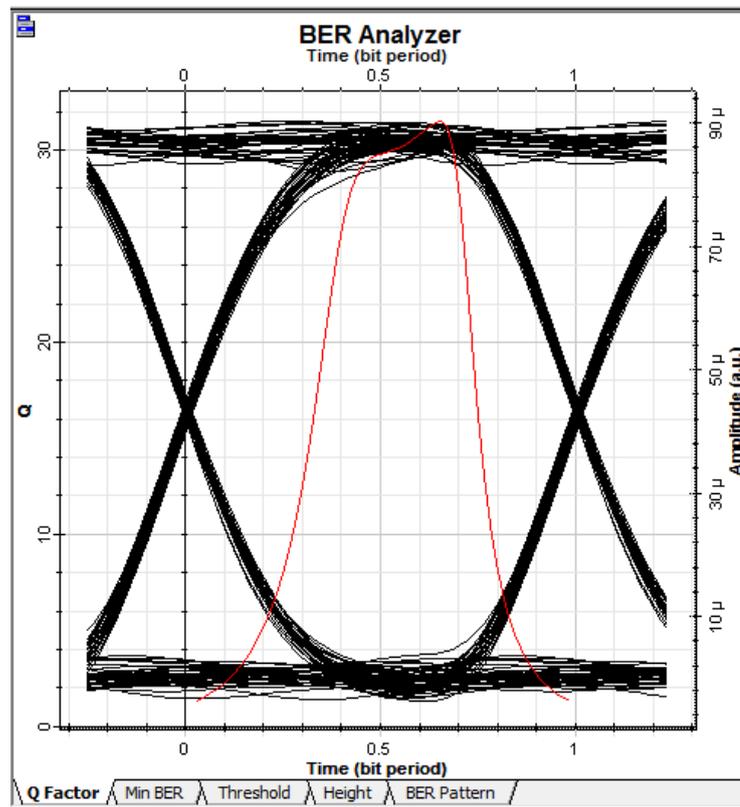


Figura 3. 12: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación duobinario (DB).  
Elaborado por: Autor.

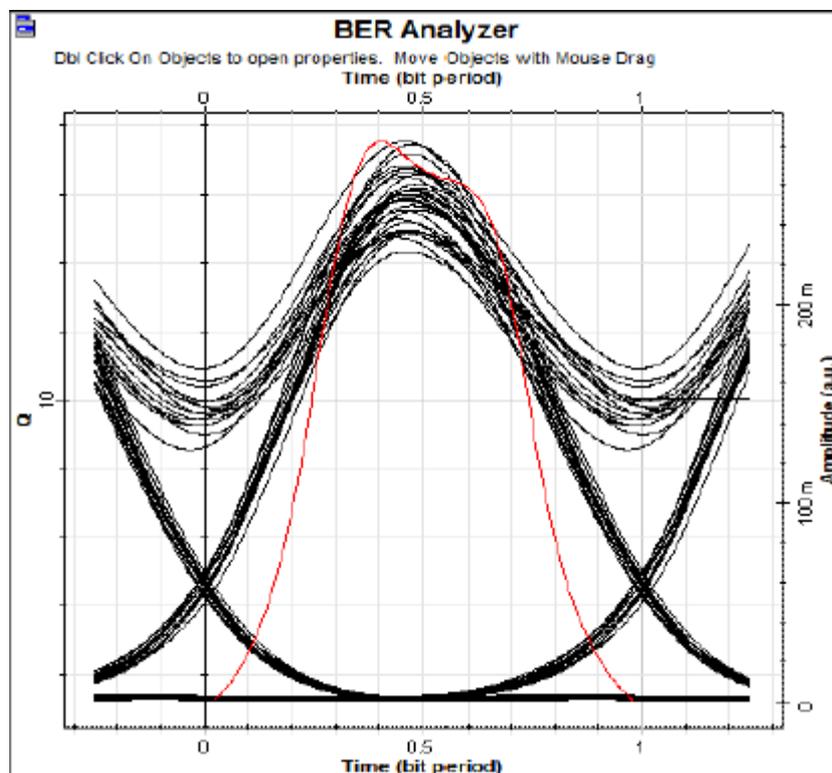


Figura 3. 13: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación de retorno a cero de portadora suprimida (CSRZ).  
Elaborado por: Autor.

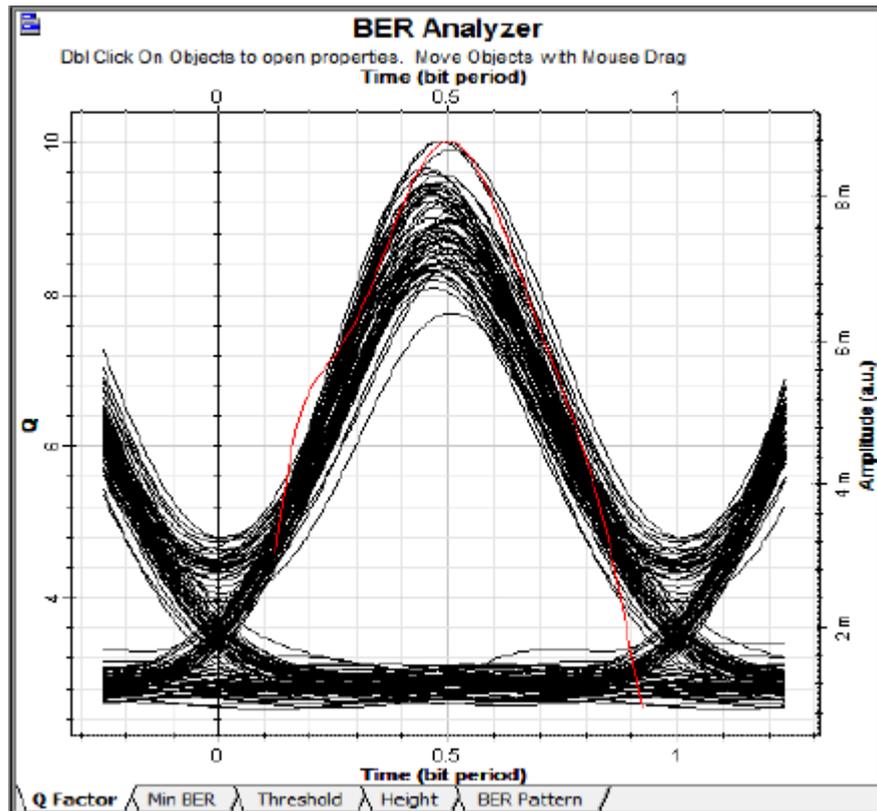


Figura 3. 14: Diagrama de tasa de erro de bits (BER) para el formato de modulación de no retorno a cero (NRZ).

Elaborado por: Autor.

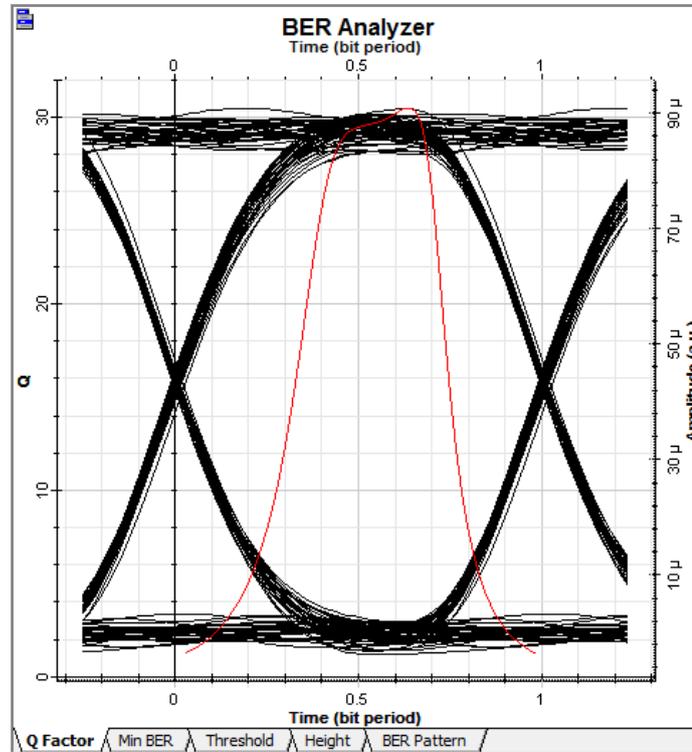


Figura 3. 15: Diagrama de tasa de error de bits (BER) para el formato de modulación duobinario modificado (Mod-DB).

Elaborado por: Autor.

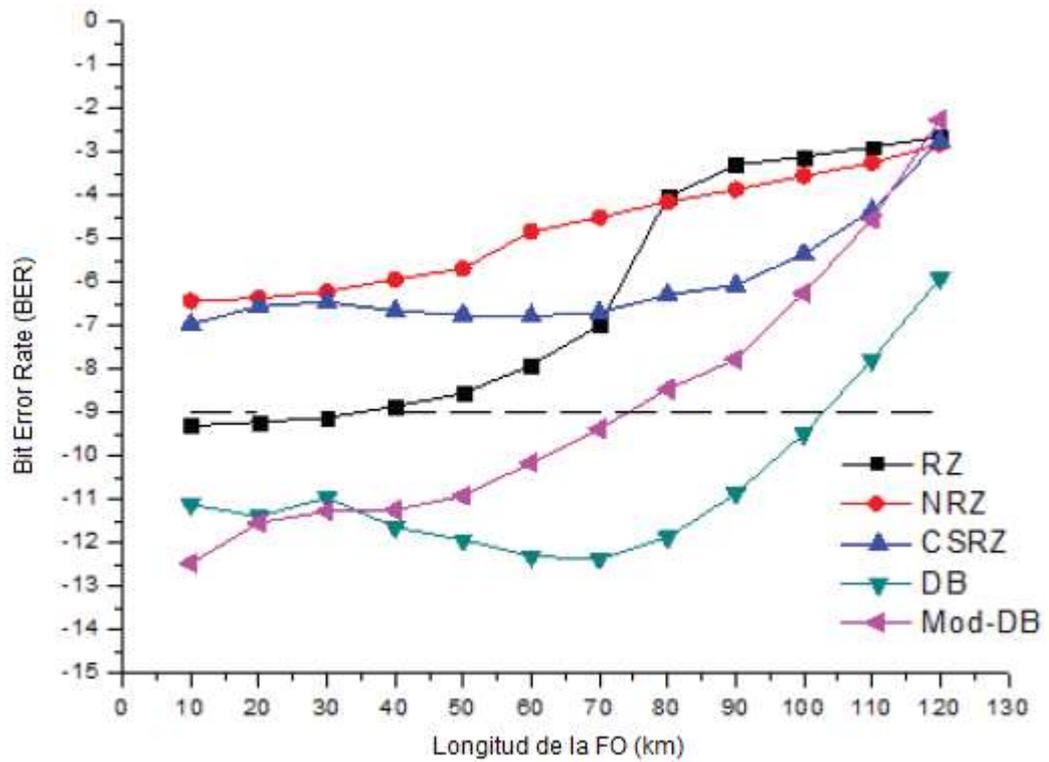


Figura 3. 16: Comparativa del rendimiento BER de los formatos RZ, NRZ, CSRZ, DB, Mod-DB para varias longitudes de fibra óptica.  
Elaborado por: Autor.

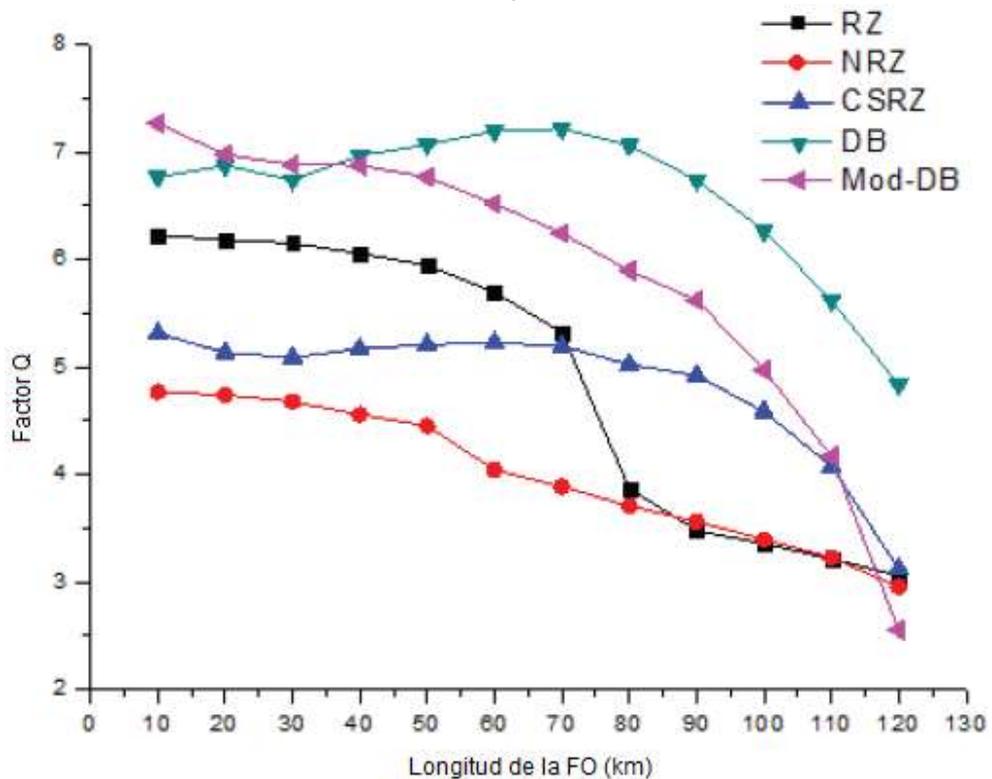


Figura 3. 17: Comparativa del factor Q de los formatos RZ, NRZ, CSRZ, DB, Mod-DB para varias longitudes de fibra óptica.  
Elaborado por: Autor.

## **CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1. Conclusiones.**

Este trabajo proporciona una verificación experimental de que el uso de un esquema de codificación duobinaria que puede reducir significativamente el nivel de los productos de mezcla de cuatro ondas. La supresión observada varió de 10dB a 1dB, dependiendo de la separación del canal. La supresión es mayor para espacios de canales más estrechos, lo que sugiere que a medida que los sistemas DWDM alcanzan un mayor número de canales, el duobinario se convierte en un método de codificación muy atractivo. Esto no solo se debe a su ancho espectral más estrecho y, en consecuencia, a una mayor tolerancia a la dispersión y a las posibilidades de espaciado de canales más estrechos, sino también a su tolerancia SBS ya comprobada y, como se muestra en este documento, su tolerancia a los efectos de FWM.

La distancia máxima de transmisión depende de muchos factores, como el tipo de fibra, las fuentes de luz, la frecuencia de transmisión y el ancho de banda. Se eligió la fibra monomodo (SMF) como tipo de fibra, fuente de luz láser, transmisión de frecuencias en el rango de 1300 nm a 1580 nm, el ancho de banda se comparte entre una serie de ONUs en la red híbrida y esto hizo necesario analizar el papel del formato de modulación para determinar la distancia de transmisión de la fibra.

El formato NRZ comúnmente utilizado produce el peor resultado en comparación con otros formatos de modulación utilizados para el segundo escenario (NRZ, RZ, CSRZ, DB y Mod-DB). El formato de modulación DB ayuda a lograr la distancia de transmisión más larga de hasta 105 km con una  $BER < 10^{-9}$  y Mod-DB mostró una distancia de transmisión de 75 km. El rendimiento del formato de RZ a distancias inferiores a 35 km es bueno. Por lo tanto, para la transmisión de corta distancia, se puede preferir RZ debido a su facilidad de implementación.

Este trabajo proporcionó una verificación experimental de que el uso de un esquema de codificación duobinaria puede reducir significativamente el

nivel de los productos de mezcla de cuatro ondas. La supresión observada varió de 10dB a 1dB, dependiendo de la separación del canal. La supresión es mayor para espacios de canales más estrechos, lo que sugiere que a medida que los sistemas DWDM alcanzan un mayor número de canales, el duobinario se convierte en un método de codificación muy atractivo. Esto no solo se debe a su ancho espectral más estrecho y, en consecuencia, a una mayor tolerancia a la dispersión y a las posibilidades de espaciado de canales más estrechos, sino también a su tolerancia SBS ya comprobada y, como se muestra en este documento, su tolerancia a los efectos de FWM.

#### **4.2. Recomendaciones.**

A partir del presente trabajo de titulación se pueden desplegar los siguientes proyectos:

- a. Desarrollo de una red 10GE PON para un mejor manejo de aumento del tráfico utilizando el formato de modulación duobinario.
- b. Beneficios y límites de los formatos de modulación para comunicaciones ópticas

## Bibliografía

- Arora, P., Kumar, S., & Sharma, D. (2017). Performance Analysis of NRZ and RZ Modulation Schemes in Optical Fiber Link Using EDFA. *International Journals of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 7(8), 161–168.
- Breuer, D., & Petermann, K. (1997). Comparison of NRZ- and RZ-modulation format for 40-Gb/s TDM standard-fiber systems. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(3), 398–400. <https://doi.org/10.1109/68.556086>
- Chvojka, P., Haigh, P. A., Darwazeh, I., Ghassemlooy, Z., & Zvanovec, S. (2019). Duobinary Modulation for Visible Light Communications. *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, 52–56. <https://doi.org/10.1109/EuCNC.2019.8801992>
- Kawanishi, T. (2011). Parallel Mach-Zehnder modulators for quadrature amplitude modulation. *IEICE Electronics Express*, 8(20), 1678–1688. <https://doi.org/10.1587/elex.8.1678>
- Lerín, A. (2012). *Modulación directa de diodos láser de alta velocidad para sistemas de transmisión coherente* (Tesis). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/17332>
- Macho Ortiz, A. (2012). Estudio y Caracterización de un Modulador Electroóptico Mach-Zehnder [Info:eu-repo/semantics/other]. Recuperado el 26 de junio de 2019, de <http://oa.upm.es/32771/>
- Niño Rojas, V. M. (2011). *Metodología de la investigación. Diseño y ejecución*. Bogotá: Ediciones de la U.
- Pintor G., D. F. (2017). *Diseño y Simulación de un Sistema de Transmisión de Fibra Óptica en Banda Base y con Múltiples Subportadoras de RF* (Tesis). Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/7981>

Samani, A., El-Fiky, E., Morsy-Osman, M., Li, R., Patel, D., Hoang, T., ... Plant, D. V. (2019). Silicon Photonic Mach–Zehnder Modulator Architectures for on Chip PAM-4 Signal Generation. *Journal of Lightwave Technology*, 37(13), 2989–2999. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2908655>



## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Guerrero Navia, Boonie Alberto** con C.C: # 200006002-6 autor del Trabajo de Titulación: Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem, previo a la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

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

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

Guayaquil, 13 de septiembre del 2019

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

Nombre: Guerrero Navia, Boonie Alberto

C.C: 200006002-6

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

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Diseño de un sistema de modulación Duobinario en redes ópticas utilizando OptiSystem.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Guerrero Navia, Boonie Alberto		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Pacheco Bohórquez, Héctor Ignacio		
<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>TITULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	13 de Septiembre del 2019	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	63
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Fundamentos de Comunicación, Comunicaciones Ópticas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	MODULACIÓN, DUOBINARIO, NRZ, RZ, OPTISYSTEM, PON		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>El presente trabajo de titulación consistió en realizar el diseño de dos escenarios de simulación de un sistema de modulación duobinario y el segundo escenario se realizó la comparativa entre diferentes formatos de modulación como no retorno a cero (NRZ), retorno a cero (RZ), retorno a cero de portadora suprimida (CSZR), duobinario (DB) y duobinario modificado (Mod-DB) sobre redes ópticas pasivas híbridas (Hybrid PON) utilizando la plataforma de simulación OptiSystem 7.0. Los resultados obtenidos en los dos escenarios de simulación durante varias pruebas ejecutas en OptiSystem indicaron que la modulación duobinaria es la óptima para enlaces de fibra óptica de gran alcance en redes DWDM y PON Híbridas. En los dos escenarios se mostraron excelentes valores de tasa de error de bits y factor de calidad (Q), es decir, que para el primer escenario 25 km y para el segundo 105 km. Los demás formatos de modulación son buenos, pero no para la distancia indicada para duobinario.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-993789212	E-mail: <a href="mailto:booniek91@hotmail.com">booniek91@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN: COORDINADOR DEL PROCESO DE UTE</b>	<b>Nombre:</b> Palacios Meléndez Edwin Fernando		
	<b>Teléfono:</b> +593-9-67608298		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:edwin.palacios@cu.ucsg.edu.ec">edwin.palacios@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>			