



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

**TEMA:**

**Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando  
modulación digital mixta**

**AUTOR:**

**Ulloa Florencia, Gustavo Andrés**

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

**TUTOR:**

**M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando**

**Guayaquil, Ecuador  
10 de marzo del 2021**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. **Ulloa Florencia, Gustavo Andrés** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DE CARRERA

M. Sc. Heras Sánchez, Miguel Armando

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Ulloa Florencia, Gustavo Andrés**

**DECLARÓ QUE:**

El trabajo de titulación “**Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta**” previo a la obtención del Título de **Ingeniero en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

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

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS



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

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **Ulloa Florencia, Gustavo Andrés**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **“Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 10 días del mes de marzo del año 2021

EL AUTOR

ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS

# REPORTE DE URKUND

**URKUND** Lista de fuentes Bloques Fernando Palacios Meléndez (edwin\_palacios)

<b>Documento</b>	<a href="#">Gustavo_Ulloa.docx</a> (D96930046)
<b>Presentado</b>	2021-03-01 17:45 (-05:00)
<b>Presentado por</b>	fernandopm23@hotmail.com
<b>Recibido</b>	edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com
<b>Mensaje</b>	Revisión TT Gustavo Ulloa <a href="#">Mostrar el mensaje completo</a> 1% de estas 25 páginas, se componen de texto presente en 2 fuentes.

Categoría	Enlace/nombre de archivo
	<a href="#">ALBAN_Titulacion.docx</a>
	<a href="#">Jorge_Ortega_TT_2018.docx</a>
	<a href="#">Jorge_Diaz_TT_2018.docx</a>
	<a href="#">Andrea_Molina_Final.docx</a>
	<a href="#">ALBAN_Titulacion.docx</a>
	<a href="#">Giler_Titulacion_2019.docx</a>
	<a href="http://repositorio.ucsa.edu.ec/bitstream/3317/13">http://repositorio.ucsa.edu.ec/bitstream/3317/13</a>

1 Advertencias. Reiniciar Exportar Compartir

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

TEMA:  
Evaluación  
del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta

AUTOR: Ulloa Florencia, Gustavo Andrés

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

TUTOR: M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

## TUTOR



**M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va en honor a mis padres, Cesar Ulloa y Lorena Florencia, que con sus ejemplos y consejos son el pilar fundamental de nuestra familia. Por su gran esfuerzo día a día para poder cumplir este objetivo, a mi familia en general que siempre confiaron y me brindaron, en todas estas etapas, su apoyo y soporte. A mi enamorada por siempre regalarme una palabra de aliento y sobre todo a Dios por brindarme vida para poder cumplir mis metas.

EL AUTOR

ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS

## **AGRADECIMIENTO**

El agradecimiento siempre a nuestro padre celestial por sus constantes bendiciones y guiarme por un buen camino, llenarme de fortaleza y sabiduría para poder culminar con éxito esta etapa de mi vida. Confiando siempre en que más logros vendrán.

Con todo mi corazón quiero agradecerles a mis padres que sin su arduo esfuerzo y dedicación no pudiese estar aquí, todo se los debo a ustedes.

A mis hermanas, que con sus locuras siempre me cambiaban el ánimo en los días difíciles.

A mis abuelitas, que desde pequeño me regalaron todo su amor y muchas veces hasta sin merecerlo. Espero que sean eternas.

A mi enamorada, por su ayuda incondicional. Por siempre confiar en mí y no dejar que nunca me rinda.

Y un agradecimiento especial a todos mis docentes y compañeros de la facultad técnica para el desarrollo, en especial al M. Sc Edwin Palacios por haberme guiado de manera satisfactoria para poder culminar este trabajo.

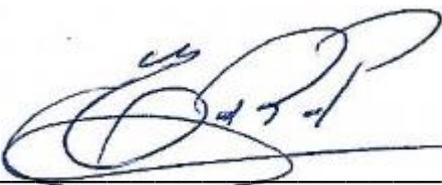
EL AUTOR

ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS



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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

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

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

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

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

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

**M. Sc. ZAMORA CEDEÑO, NÉSTOR ARMANDO**  
OPONENTE

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
Resumen .....	XIV
Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación.....	2
1.1. Introducción.....	2
1.2. Antecedentes. ....	3
1.3. Definición del Problema.....	3
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. ....	4
1.7. Metodología de Investigación.....	5
Capítulo 2: Fundamentación Teórica. ....	6
2.1. Introducción de comunicaciones por fibra óptica. ....	6
2.2. Transmisores ópticos. ....	7
2.2.1. Láseres de modulación directa. ....	8
2.2.2. Moduladores electroópticos externos.....	9
2.2.2.1. Modulador de fase óptico.....	11
2.2.2.2. Modulador Mach-Zehnder.....	12
2.2.2.3. Modulador de fase y cuadratura (IQ) óptico. ....	16
2.3. Fibras ópticas.....	17
2.3.1. Fibras multimodo. ....	18
2.3.2. Fibras monomodo.....	20
2.4. Atenuación. ....	22

2.5.	Dispersión cromática.....	23
2.6.	Receptor óptico.....	26
2.7.	Detección óptica directa.....	26
2.8.	Detección óptica coherente.....	27
	Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.....	31
3.1.	Simulación de diseño de RoF.....	31
3.2.	Resultados y análisis de la simulación.....	39
	Conclusiones.....	46
	Recomendaciones.....	47
	Bibliografía.....	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de comunicación por fibra óptica.....	7
Figura 2. 2: Ilustraciones de (a) un láser directamente modulado y (b) su .....	8
Figura 2. 3: Estructuras de (a) modulador de fase, (b) modulador Mach-Zehnder y (c) modulador IQ.....	10
Figura 2. 4: Función de transferencia del modulador óptico Mach-Zehnder.	13
Figura 2. 5: Formas de ondas de Nyquist y sus respectivos espectros para ondas (a) rectangular, (b) seno cardinal (Sinc), (c) coseno alzado. ....	14
Figura 2. 6: Diagramas de constelaciones de las modulaciones (a) 4-QAM, (b) 16-QAM y (c) 64-QAM. ....	16
Figura 2. 7: Diagrama de constelación basada en código Gray para 16-QAM. ....	17
Figura 2. 8: Estructuras básicas de (a) fibras multimodo y (b) fibras monomodo con sus respectivas formas de propagación de la luz en ellas. ....	18
Figura 2. 9: Representación geométrica de (a) fibra multimodo de índice escalonado y (b) fibra multimodo de índice gradual. ....	19
Figura 2. 10: Representación geométrica de fibra monomodo. ....	20
Figura 2. 11: Separación espectral lograda en virtud de la dispersión cromática de una fibra óptica. ....	24
Figura 2. 12: Detección óptica directa mediante un único fotodiodo. ....	26
Figura 2. 13: Receptor óptico coherente compuesto por óptico híbrido de 90 ° y un par de fotodiodos balanceados para receptor óptico mono polarizado.	27

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Diagrama de bloques general del método propuesto. ....	32
Figura 3. 2: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación DPSKA. ....	33

Figura 3. 3: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación PAFM. ....	34
Figura 3. 4: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación OQPSKA. ....	35
Figura 3. 5: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación QAFM. ....	36
Figura 3. 6: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación FPM. ....	37
Figura 3. 7: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación PAPM. ....	38
Figura 3. 8: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de Q-Factor. ....	40
Figura 3. 9: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de BER mínima. ....	41
Figura 3. 10: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de potencia recibida. ....	42
Figura 3. 11: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos del factor Q. ....	43
Figura 3. 12: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos de la BER. ....	44
Figura 3. 13: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos de potencia recibida. ....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación de los modelos propuestos.....	39
Tabla 3. 2: Medida de la calidad de funcionamiento de la técnica de modulación híbrida a una longitud superior de 80 km. ....	42

## Resumen

El presente trabajo de titulación consiste en realizar la evaluación del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando diferentes esquemas de modulación digital convencionales e híbridos a través del software de simulación OptiSystem 7.0, y comparando las métricas de factor Q, tasa de error de bits (BER) y potencia recibida (Rx). En el capítulo 1 se describe las generalidades del trabajo de titulación. En el capítulo 2 se describen los fundamentos teóricos de las comunicaciones por fibra óptica (transmisores ópticos, fibra óptica, atenuación, dispersión y receptores ópticos). En las redes ópticas prospectivas, se pueden emplear de forma selectiva diferentes formatos de modulación dependiendo del tamaño de la red y la configuración del sistema. Por tanto, la conversión de formato óptico es una tecnología fundamental, a la que se ha prestado mucha atención en los últimos años. En el capítulo 3 se presentan 6 escenarios de simulación del sistema RoF utilizando esquemas de modulación convencionales e híbridos sobre OptiSystem. En el mismo capítulo se presentan los resultados obtenidos para las mediciones del factor Q, tasa de error de bits (BER) y potencia recibida.

**Palabras claves:** CALIDAD, FACTOR, RENDIMIENTO, ESQUEMAS, MODULACIONES, BER

## Capítulo 1: Descripción General del Trabajo de Titulación

### 1.1. Introducción.

Las redes de acceso ubicadas en el borde de la red central o metropolitana proporcionan la conexión entre los usuarios finales y la red de transporte. La fibra óptica como la solución predominante para la red de acceso fijo de próxima generación se ha adoptado y desplegado en todo el mundo. Mientras tanto, también se ha demostrado la red de fronthaul y backhaul inalámbrica gigabit de próxima generación basada en enlaces ópticos. La radio sobre fibra como técnica habilitadora une el mundo óptico y el inalámbrico. Para la distribución con la red de transporte, la virtualización también debe introducirse en el sistema de radio por fibra.

La tecnología de radio sobre fibra (RoF) ofrece una solución prometedora para el despliegue de ondas milimétricas entre múltiples puntos de acceso. Esta tecnología aprovecha las ventajas de la óptica para la transmisión de señales de radio a través de un enlace óptico. En un enlace RoF, la señal de radio se transpone a la amplitud o fase de un portador óptico mediante transductores electroópticos (E/O) y luego se recupera al final del enlace mediante transductores optoelectrónicos (O/E) correspondientes.

Esta combinación entre estas dos áreas permite la extensión de la cobertura de radio y ofrece velocidades cada vez más altas al combinar el rendimiento de la fibra óptica (bajas pérdidas, ancho de banda muy grande e inmunidad a interferencias electromagnéticas) con la principal ventaja de un sistema inalámbrico que es la movilidad. Aunque un sistema RoF ofrece múltiples ventajas, pueden existir distorsiones en la señal de RF transmitida a través de este enlace óptico y afectar la calidad de la transmisión. Estas distorsiones están relacionadas con varios factores: el ruido de intensidad relativa y el ruido de fase del láser, el ruido de disparo del fotodiodo, el ruido térmico de las etapas electrónicas, la dispersión de la fibra óptica, las no linealidades de los diversos componentes. optoelectrónica y la ganancia

negativa del enlace RoF. Estos factores limitantes deben tenerse en cuenta en el estudio y análisis de la transmisión de señales de radio por enlaces RoF.

El dimensionamiento de un sistema RoF se realiza para cumplir con especificaciones específicas. En el caso de transmitir una señal compleja, se debe garantizar una relación señal/ruido mínimo para no degradar la calidad de los datos transmitidos. El balance de enlace, el punto de compresión y la linealidad en el SFDR (rango dinámico libre espurio) pueden determinarse mediante cálculos teóricos para cuantificar la transmisión en el caso de modulación de intensidad o fase. También existe una variedad de software comercial, inicialmente dedicado a aplicaciones de telecomunicaciones digitales, que ofrece herramientas optoelectrónicas para analizar un enlace RoF.

## **1.2. Antecedentes.**

Para ampliar la cobertura geográfica de las señales de radiofrecuencia y satisfacer la demanda en constante aumento de alta velocidad y gran ancho de banda, la solución es proponer sistemas híbridos que combinen las tecnologías de fibras ópticas y radio comúnmente "sistema de radio sobre fibra" (RoF). Por definición, RoF se dedica a la transmisión óptica de señales de microondas analógicas. Por lo tanto, el enlace RoF aprovecha la eficiencia de las fibras ópticas para la distribución de señales de radio a múltiples puntos de acceso inalámbricos que brindan la ventaja de la movilidad.

## **1.3. Definición del Problema.**

La tecnología RoF se puede explotar en diferentes sistemas de telecomunicaciones para aplicaciones de corta o larga distancia, combinando así las ventajas de los sistemas ópticos e inalámbricos. Los enlaces ópticos analógicos se utilizan para transmitir señales analógicas en sistemas de radar. La utilidad de RoF en estos sistemas proviene de la posibilidad de integración de componentes ópticos, el gran ancho de banda, la inmunidad a perturbaciones electromagnéticas y el bajo peso, sin embargo, es necesario asegurar niveles de ruido muy bajos para tales aplicaciones. Por lo tanto,

surge la necesidad de implementar escenarios de simulación en OptiSystem para evaluar la tecnología RoF mediante modulaciones digitales mixtas.

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

Los resultados que obtienen mediante la simulación de enlaces RoF con el canal de transmisión inalámbrica deben validarse mediante mediciones. Por tanto, el efecto de las etapas de conversión de frecuencia electrónica se establecerá mediante simulación.

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

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

Realizar la evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta a través del software de simulación OptiSystem.

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

- Describir los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicación por fibra óptica que son la parte esencial en sistemas de radio sobre fibra.
- Diseñar los modelos de simulaciones del sistema de RoF mediante la aplicación de modulación digital mixta.
- Evaluar los resultados obtenidos del sistema de RoF propuesto utilizando el software OptiSystem.

#### **1.6. Hipótesis.**

El modelo de simulación de radio sobre fibra propuesto permitirá medir el rendimiento mediante la probabilidad de error, conocida como la tasa de error de bits (BER) y que se define como el número de bits erróneos recibidos del número total de bits transmitidos. Es decir, que la BER es un criterio de calidad preciso y ofrece una forma sencilla de comparar los sistemas de comunicación entre sí. Finalmente, la BER proporciona información sobre si un sistema dado ha alcanzado o no un límite de rendimiento específico para cada estándar, si no se alcanza este límite, la BER no nos permite comprender la naturaleza de las distorsiones en la señal recibida.

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

En enfoque del presente trabajo de titulación tiene como objetivo recopilar datos observables y cuantificables. Este tipo de investigación consiste en describir, explicar, controlar y predecir con base en la observación de hechos y eventos "positivos", es decir, que existen independientemente del investigador, hechos objetivos.

Este método se basa en instrumentos de investigación cuantitativa o técnicas de recogida de datos cuya fiabilidad y validez están en principio garantizadas. Da como resultado datos cuantificados que permiten análisis descriptivos, tablas y gráficos, análisis estadísticos para buscar vínculos entre variables o factores, análisis de correlación o asociación, etc.

## **Capítulo 2: Fundamentación Teórica.**

El presente capítulo describe los aspectos teóricos fundamentales de las comunicaciones por fibra óptica.

### **2.1. Introducción de comunicaciones por fibra óptica.**

Los sistemas de comunicación de fibra óptica son los sistemas de comunicación en los que la información se transmite en forma de ondas de luz que se propagan en fibras ópticas. La fibra óptica, que sirve como medio de canal físico para las comunicaciones, promete ventajas que el hombre siempre anhelaba, incluida una atenuación extremadamente baja que soporta la transmisión de cientos de kilómetros y una gran capacidad disponible para la comunicación de datos de cientos de Tbps, la capacidad que permite a toda la población en el teléfono de habla mundial simultáneamente a través de una sola pieza de fibra. Las ventajas dictan directamente que los sistemas de comunicación de fibra óptica son exclusivos para comunicaciones de larga distancia y alta velocidad. (Cabezas & Pinto G., 2014)

En un sistema de comunicación de fibra óptica, además de los bloques funcionales en un sistema de comunicación digital general como se menciona en las siguientes secciones del presente capítulo, el transceptor de fibra óptica consiste en una fuente de luz que proporciona un portador óptico, componentes electrópticos que cargan la información eléctrica sobre el portador óptico en el transmisor y componentes óptico-electrónicos que extraen la información del portador óptico a la forma eléctrica en el extremo del receptor.

La figura 2.1 ilustra el diagrama de bloques básico de un sistema de comunicación de fibra óptica con énfasis en sus diferencias con un sistema de comunicación digital convencional. Desde la perspectiva de la información, los sistemas de comunicación de fibra óptica. Los elementos contienen todos los bloques funcionales que posee un sistema de comunicación y, por lo tanto, los modelos matemáticos presentados en este capítulo pueden aplicarse

fácilmente al análisis y diseño de los sistemas de comunicación por fibra óptica. (Moreano M., 2015; Ortiz Lima, 2010)

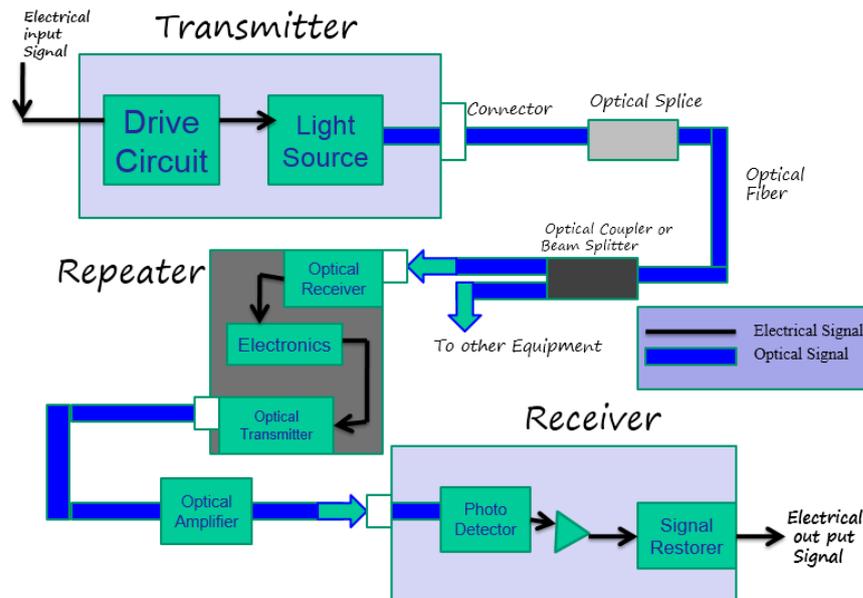


Figura 2. 1: Diagrama de bloques del sistema de comunicación por fibra óptica.  
Fuente: (Miriampally, 2016)

Las siguientes secciones están dedicadas a los componentes utilizados en comunicaciones ópticas y a presentar sus propiedades. Especialmente, se centrará en moduladores externos que son ideales para implementar formatos de modulación avanzados y en un receptor óptico coherente que es capaz de extraer toda la información de la portadora óptica modulada, lo que permite un procesamiento avanzado de la señal digital en el extremo del receptor.

La caracterización y el modelado de canales son siempre los más importantes en el diseño de cualquier sistema de comunicación. No hay excepción para los sistemas de comunicación por fibra óptica. Así, otro enfoque de este capítulo es el estudio de los efectos de la transmisión de señales sobre fibras ópticas, en las que sobre la señal óptica se imponen dispersiones y ruido óptico, así como efectos no lineales.

## 2.2. Transmisores ópticos.

En los sistemas de comunicación de fibra óptica, las fuentes de luz, normalmente, diodos láser (*Laser Diode, LD*) u ocasionalmente diodos emisores de luz (*Light Emitting Diode, LED*) proporcionan una portadora

óptica en el transmisor para su respectiva modulación, y los fotodetectores, por lo general fotodiodos de rutina, convierten la intensidad de la onda de luz recibida en corriente eléctrica para recuperar la información. En los sistemas de fibra óptica avanzados, es preferible un receptor coherente, en el que se emplea otro láser como oscilador local para el batido óptico en fotodiodos para reproducir información en la fase de la onda de luz recibida. En las siguientes secciones se describen los tipos de láseres que se utilizan en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica.

### 2.2.1. Láseres de modulación directa.

El láser de modulación directa (*Directly Modulated Laser, DML*) es la técnica de modulación óptica más simple (véase la figura 2.2), que permite variar directamente la corriente de activación del láser para modular la intensidad de la luz. En los sistemas DML, la modulación se logra aplicando directamente la señal eléctrica en la corriente de accionamiento del láser y, por lo tanto, el módulo DML es el dispositivo de modulación óptica más compacto y simple. Para un láser directamente modulado que opera dentro de su región lineal, su potencia óptica de salida se puede caracterizar aproximadamente como:

$$P_{out}(t) \propto \alpha I_{in}(t) - I_{th} \quad (2.1)$$

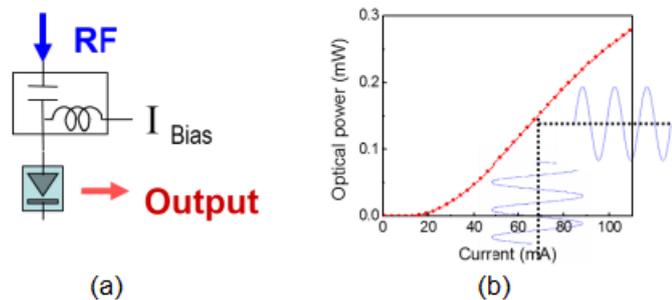


Figura 2. 2: Ilustraciones de (a) un láser directamente modulado y (b) su características de la relación entre la corriente de entrada y la potencia de salida.

Fuente: (Zhu et al., 2018)

Donde  $P_{out}(t)$  es la potencia óptica de salida,  $\alpha$  es un coeficiente que se asocia a la eficiencia del láser,  $I_{th}$  es el umbral del láser que es una polarización de DC e  $I_{in}(t)$  es la corriente de activación, que debería ser mayor que la corriente de umbral  $I_{th}$ .

A favor de su simplicidad, bajo costo y efectividad de modular la potencia de salida, los DML están disponibles popularmente para sistemas comerciales que operan a 10 Gbps e incluso hasta 20 Gbps y 40 Gbps, y logran una transmisión de 100 Gbps, impulsada por la tecnología de procesamiento de señales digitales (*Digital Signal Processing, DSP*) en el laboratorio. No obstante, al poseer el chirrido específico del dispositivo al modular directamente la corriente de excitación, los DML adolecen de inconvenientes inherentes en los sistemas de transmisión de larga distancia.

El chirrido específico del dispositivo amplía los espectros de la señal, lo que da como resultado una fuga espectral que no es deseable en sistemas de multiplexación por división de longitud de onda (WDM) muy compactos, y también distorsiona la forma de las formas de onda moduladas, lo que da como resultado una interferencia entre símbolos (ISI) que difumina gravemente la transmisión de la señal. En particular, si el chirp se añade de forma constructiva a la dispersión durante la transmisión, el alcance de los sistemas DML está muy limitado debido al efecto de dispersión degradado.

Mediante diseños específicos, el chirrido en los DML se puede explotar deliberadamente. Por ejemplo, seguido de un componente de gestión de chirp, como un filtro óptico que da forma al espectro óptico de la salida de los láseres, el DML se convierte en el llamado láser gestionado por chirp (CML). Con una ingeniería cuidadosa, los sistemas CML son tolerantes a la dispersión y pueden soportar la transmisión a larga distancia. Otra alternativa más flexible es la aplicación de tecnologías DSP. Con el conocimiento de las características del DML y del enlace de fibra, se puede aplicar el potente DSP en el lado del transmisor para compensar previamente el chirrido inducido por láser, e incluso la dispersión en fibra.

### **2.2.2. Moduladores electroópticos externos.**

En los sistemas avanzados de fibra óptica, se prefieren los moduladores ópticos externos porque el láser funciona solo como una fuente óptica que proporciona un portador óptico continuo. Los moduladores externos toman la onda continua como entrada, aplican la señal eléctrica modulada en la

portadora óptica y producen la señal óptica modulada con mejor calidad de transmisión. (Seimetz, 2011)

A diferencia de los EAM que modulan la luz a través de la absorción, otro tipo de moduladores basados en la modulación de fase es más preferible para implementar formatos de modulación avanzados porque las propiedades ópticas adicionales, y por lo tanto las dimensiones, se explotan para la modulación de la información. En tales moduladores, la modulación de fase se logra mediante el efecto electroóptico de que el índice de refracción de una guía de ondas es proporcional al campo eléctrico aplicado. Variando el índice de refracción de la guía de ondas, se modula en consecuencia la fase del haz de luz que pasa a través de la guía de ondas.

La figura 2.3 ilustra las estructuras de tres moduladores básicos de este tipo, a saber (a) modulador óptico de fase, (b) modulador Mach-Zehnder y (c) modulador IQ óptico o modulador Mach-Zehnder anidado.

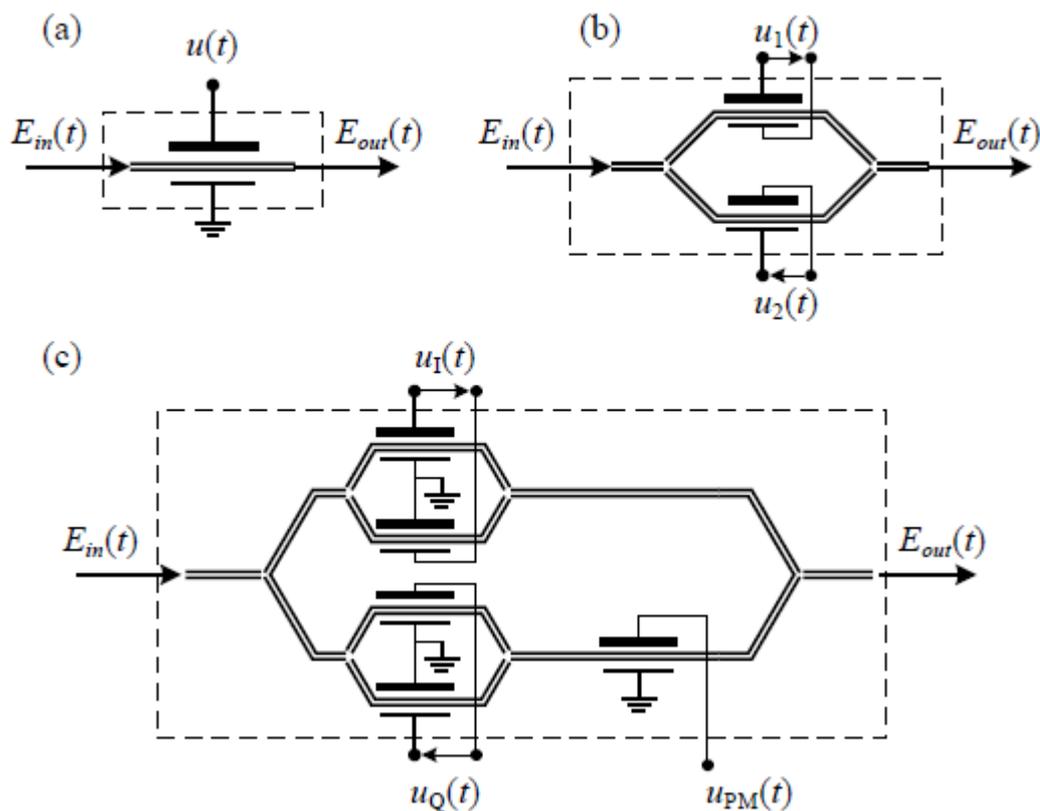


Figura 2. 3: Estructuras de (a) modulador de fase, (b) modulador Mach-Zehnder y (c) modulador IQ.

Fuente: (Seimetz, 2011)

El modulador de fase es la estructura más elemental basada en el efecto electroóptico. En el modulador de fase, la fase del portador de luz se puede modular modulando el campo eléctrico usando el modulador de fase más simple, aunque se pueden fabricar moduladores ópticos más complicados. Por ejemplo, al construir un interferómetro Mach-Zehnder utilizando dos ramas de moduladores de fase, la amplitud, así como la intensidad, de la portadora óptica se pueden modular interfiriendo dos portadoras ópticas moduladas en fase.

Por tanto, dicho modulador se denomina modulador de Mach-Zehnder (MZM). Además, el modulador IQ se puede construir combinando dos moduladores Mach-Zehnder (MZM) con una diferencia de fase de  $90^\circ$ . A excepción de las tres estructuras, otros formatos de modulación, como la manipulación por desplazamiento de frecuencia, también se pueden lograr fácilmente con diseños dedicados.

#### **2.2.2.1. Modulador de fase óptico.**

El modulador de fase es el modulador electroóptico básico. La figura 2.3(a) muestra la estructura de un modulador de fase que está compuesto por una guía de ondas y electrodos. La guía de ondas está compuesta de material que presenta un efecto electroóptico, tales como, Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), Arseniuro de Galio (GaAs) y Fosfuro de Indio (InP). En el modulador de fase basado en  $\text{LiNbO}_3$ , la fase de la luz de salida es idealmente proporcional al campo eléctrico aplicado, y la intensidad de la luz es independiente del campo eléctrico.  $\text{LiNbO}_3$  también ofrece un acoplamiento de fibra a chip más fácil. Por otro lado, el material InP permite que el modulador se integre fácilmente con el diodo láser en un dispositivo óptico más compacto.

Cuando un haz de luz pasa a través de una guía de ondas, la diferencia de fase entre la entrada y la salida depende de la longitud de la guía de ondas y de su índice de refracción. Como la longitud de la guía de ondas no cambia, la fase se puede modular cambiando su índice de refracción con el campo eléctrico aplicado. Dado el campo óptico entrante  $E_{in}(t)$  y el voltaje aplicado

$u(t)$ , y omitiendo un desplazamiento de fase constante debido a la longitud de la guía de ondas, la función de transferencia del modulador de fase es

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot e^{j\pi \frac{u(t)}{V_\pi}} \quad (2.2)$$

donde  $V_\pi$  es el voltaje que causa un cambio de fase de  $\pi$ . El parámetro  $V_\pi$  es un parámetro crítico para los moduladores electroópticos, dependiendo del material de la guía de onda y la ingeniería de los moduladores. Según ec. (2.3), se puede implementar fácilmente la modulación de fase basada en el esquema de modulación por desplazamiento de fase (PSK).

### 2.2.2.2. Modulador Mach-Zehnder.

De acuerdo con el principio del interferómetro de Mach-Zehnder, la amplitud del campo óptico se puede alterar combinando dos o más moduladores de fase, como se muestra en la figura 2.3 (b). En el MZM, el haz de luz de entrada se divide en dos afluentes, cada uno de los cuales es un modulador de fase. Los moduladores de fase se pueden modular de forma independiente, y se denomina a este caso MZM de doble accionamiento. Dado que el  $V_\pi$  de los dos moduladores de fase es el mismo y que su voltaje de excitación es  $u_1(t)$  y  $u_2(t)$ , entonces el campo óptico de salida está definido como:

$$E_{out}(t) = \frac{1}{2} E_{in}(t) \cdot \left[ e^{j\pi \frac{u_1(t)}{V_\pi}} + e^{j\pi \frac{u_2(t)}{V_\pi}} \right] \quad (2.3)$$

Si se opera el MZM de doble accionamiento en un modo push-push, en el que  $u_1(t) = u_2(t) = u(t)/2$ , entonces el MZM de doble accionamiento se reduce al modulador de fase, y la ec. (2.4) se convierte en:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot e^{j\pi \frac{u(t)}{2V_\pi}} \quad (2.4)$$

Si el MZM de doble accionamiento funciona en modo push-pull, en el que  $u_1(t) = -u_2(t) = u(t)/2$ , el campo óptico de salida es

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \cos\left(\pi \frac{u(t)}{2V_\pi}\right) \quad (2.5)$$

Según la relación entre el campo y la potencia ópticos (ver Ec. (3.6)) se puede dar además en términos de las intensidades ópticas de entrada y salida:

$$P_{out}(t) = |E_{out}(t)|^2 = \left| E_{in}(t) \cdot \cos\left(\pi \frac{u(t)}{2V_\pi}\right) \right|^2 = \frac{1}{2} P_{in}(t) \left[ 1 + \cos\left(\pi \frac{u(t)}{V_\pi}\right) \right]. \quad (2.6)$$

En la Figura 2.4, se proporcionan las funciones de transferencia del campo y la intensidad ópticos de un MZM. Se puede observar que el voltaje que induce un desplazamiento de fase de  $\pi$  se define con respecto a la fase de la intensidad óptica de salida, y el voltaje para lograr un desplazamiento de fase de  $\pi$  para MZM es  $u(t) = 2V_\pi$ . De las ec. (2.6) y (2.7), se puede observar que el campo óptico modulado e intensidad no son linealmente proporcionales al voltaje aplicado, sino que son funciones sinusoidales del voltaje.

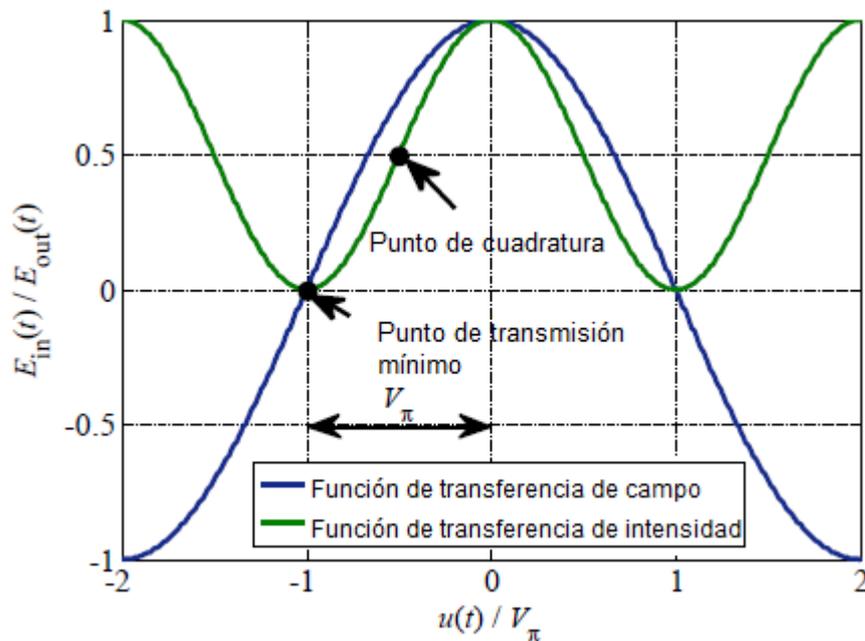


Figura 2. 4: Función de transferencia del modulador óptico Mach-Zehnder.  
Fuente: (Shreyas et al., 2016)

Por tanto, existen diferencias entre las formas de la señal eléctrica moduladora y la señal óptica modulada. En un diseño de sistema práctico, se debe considerar cuidadosamente la no linealidad de la función de transferencia de los MZM. Por ejemplo, si la forma de onda de conformación de pulsos es una función rectangular, el voltaje de activación de pico a pico puede oscilar entre los máximos de transmisión lo más rápidamente posible

para reducir el efecto no lineal. Si se desea obtener formas de onda de modelado de pulso bien definidas, el voltaje pico a pico se puede establecer bastante pequeño, por ejemplo, menos de un cuarto de  $V_\pi$ , para evitar operar el modulador en la región no lineal.

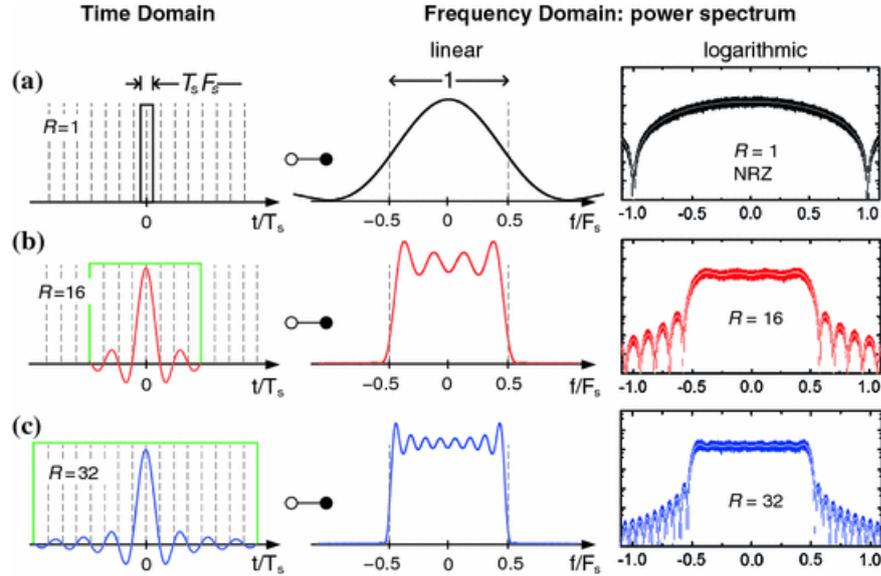


Figura 2. 5: Formas de ondas de Nyquist y sus respectivos espectros para ondas (a) rectangular, (b) seno cardinal (Sinc), (c) coseno alzado.

Fuente: (Leuthold & Brès, 2015)

Para llevar a cabo diferentes formatos de modulación, el MZM debe ser ajustada cuidadosamente en base a las ec. (2.6) y (2.7). Por ejemplo, si se requiere una modulación óptica de encendido y apagado (OOK), la intensidad óptica se usa para la modulación. Suponiendo que la señal eléctrica se modula mediante la modulación por desplazamiento de amplitud binario (2-ASK), y que se define como:

$$s(t) = \sum x(k)g(t - kT) \quad . \quad (2.7)$$

donde  $x(k)$  son, según el mensaje, extraídas de  $\{\pm 1\}$ , y  $g(t)$  es la forma de onda rectangular que se muestra en la figura 2.5 (a). El MZM debe estar polarizado en el punto de cuadratura con una polarización de CC igual a  $-0.5V_\pi$  con voltaje pico a pico  $V_{pp} = V_\pi$ , como

$$u(t) = \frac{V_\pi}{2} s(t) - \frac{1}{2} V_\pi \quad . \quad (2.8)$$

Sustituyendo la ec. (2.8) en la ecuación. (2.7), se tiene:

$$P_{out}(t) = \frac{1}{2}P_{in}(t) \cdot \left[ 1 + \cos \left( \pi \frac{V_{\pi}s(t)}{2V_{\pi}} - \frac{\pi}{2} \right) \right] = \frac{1}{2}P_{in}(t) \cdot \left[ 1 + \sin \frac{\pi}{2}s(t) \right]. \quad (2.9)$$

Considerando que la amplitud de la señal  $s(t)$  de modulación por desplazamiento de fase binario (BPSK) oscila entre “-1” y “+1” y que el tiempo de transición de 0 a 1, o de 1 a 0, de la función rectangular se aproxima arbitrariamente a 0, se tiene que la aproximación es:

$$\sin \frac{\pi}{2}s(t) \approx s(t) \quad (2.10)$$

La ec. (2.10) viene dado además por:

$$P_{out}(t) \approx P_{in}(t)s'(t) = P_{in}(t) = P_{in}(t) \sum x'(k)g(t - kT) \quad (2.11)$$

donde  $x'(k)$  se extraen de  $\{0, 1\}$ . Por lo tanto, la intensidad óptica se logra mediante OOK. Si se quiere modular la amplitud del campo óptico, se adopta, por ejemplo, 2-ASK. Se puede ajustar el  $V_{p-p}$  a  $2V_{\pi}$  con una polarización de CC en  $-V_{\pi}$ . Entonces, la señal eléctrica  $u(t)$  está dada por:

$$u(t) = V_{\pi}s(t) - V_{\pi} \quad (2.12)$$

donde  $s(t)$  es la señal BPSK de banda base que es la misma que la ec. (2.8). Sustituyendo la ec. (2.13) en (2.6), se obtiene:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \cos \left[ \pi \frac{V_{\pi}s(t) - V_{\pi}}{2V_{\pi}} \right] = E_{in}(t) \cdot \sin \frac{\pi}{2}s(t) \quad (2.13)$$

Usando la misma aproximación en la ec. (2,11) queda:

$$E_{out}(t) \approx E_{in}(t) \cdot s(t) \quad (2.14)$$

Por lo tanto, si uno quiere lograr la modulación por desplazamiento de amplitud (ASK), el modulador Mach-Zehnder (MZM) está polarizado en el punto de transmisión mínimo con una polarización de CC igual a  $-V_{\pi}$  y el voltaje pico a pico es  $2V_{\pi}$ . Los formatos de modulación de alto nivel también se pueden aplicar fácilmente para implementar la modulación de campo óptico según el principio anterior.

### 2.2.2.3. Modulador de fase y cuadratura (IQ) óptico.

En los formatos de modulación avanzados, los componentes en fase (I) y en cuadratura (Q) de la portadora óptica se utilizan para la modulación para lograr una mayor eficiencia espectral. De manera equivalente, los símbolos se mapean en el diagrama de constelación de dos dimensiones. Con base en diferentes criterios, se puede implementar modulación de amplitud en cuadratura (QAM), y la figura 2.6 (a) - (c) proporciona el esquema de mapeo QAM más simple basado en un diagrama de constelación. En principio, tales formatos de modulación se pueden implementar combinando dos modulaciones de amplitud con una fase controlada entre ellos.

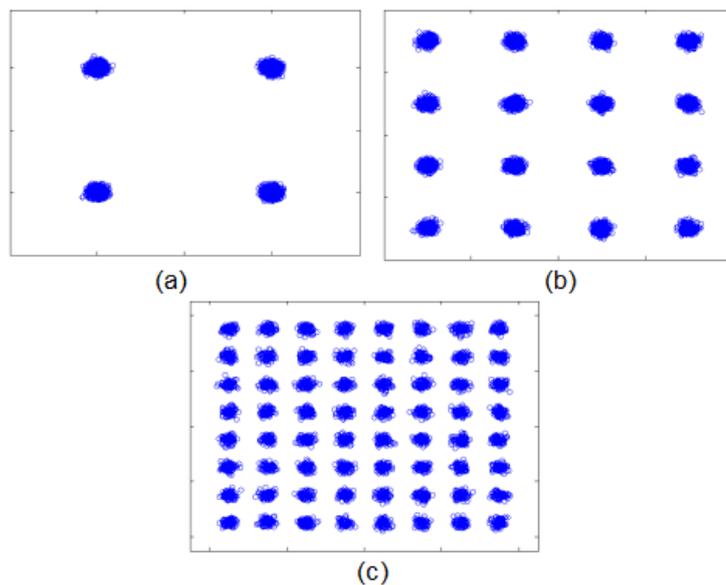


Figura 2. 6: Diagramas de constelaciones de las modulaciones (a) 4-QAM, (b) 16-QAM y (c) 64-QAM.

Fuente: (Zhao & Ellis, 2011)

El modulador IQ óptico es el modulador que implementa los formatos de modulación IQ avanzados en los sistemas de comunicación de fibra óptica, tal como se muestra en la figura 2.3 (c). Se puede ver en la figura 2.3 (c) que este consta de dos MZM con uno de ellos seguido de un modulador de fase. En la práctica, el modulador de fase siempre está polarizado al voltaje que induce una diferencia de fase de  $90^\circ$  entre los dos MZM. Ambos MZM tienen el mismo  $V_\pi$  y se operan en el modo push-pull. La función de transferencia del modulador IQ óptico está definida por:

$$E_{out}(t) = E_{in}(t) \cdot \left[ \cos\left(\frac{u_I(t)}{2V_\pi}\right) + j \cdot \cos\left(\frac{u_Q(t)}{2V_\pi}\right) \right] \quad (2.15)$$

donde  $u_I(t)$  y  $u_Q(t)$  son señales de modulación aplicadas en los MZM en fase y en cuadratura, respectivamente. Por lo tanto, al cargar la señal de banda base en fase y en cuadratura en los dos MZM con un desplazamiento de fase de  $90^\circ$ , se puede implementar la modulación QAM para lograr una modulación de alta eficiencia espectral.

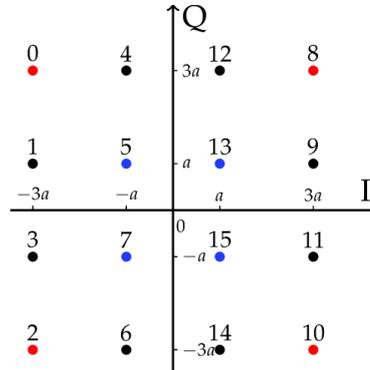


Figura 2. 7: Diagrama de constelación basada en código Gray para 16-QAM.  
Fuente: (Liu et al., 2017)

Si se adopta un formato de modulación QAM, por ejemplo, 4-QAM, la señal de banda base viene definida por la ec. (2.3) y  $x(k)$  se extrae de la figura 2.7. Las señales eléctricas de componentes en fase y en cuadratura vienen dadas por

$$u_I(t) = V_\pi \cdot \Re\{s(t)\} - V_\pi \quad (2.16)$$

Y

$$u_Q(t) = V_\pi \cdot \Im\{s(t)\} - V_\pi \quad (2.17)$$

### 2.3. Fibras ópticas.

Las fibras ópticas sirven como medio físico transparente a la transmisión de información en forma de luz. Las fibras ópticas constan de un núcleo en el que la luz viaja, rodeado por un revestimiento que confina la luz en el núcleo, gracias al fenómeno de la reflexión interna total que el guiado dieléctrico de ondas proporcionado por la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento.

El tema que gira en torno a la investigación científica y las aplicaciones de ingeniería que utilizan fibras ópticas es la fibra óptica. Existen diferentes tipos de fibras ópticas dependiendo de los propósitos de cómo usarlas. En los

sistemas de comunicación de fibra óptica, por ejemplo, dependiendo del diámetro de la fibra, existen dos tipos (a) fibras multimodo (MMF), que admiten muchas rutas de propagación, y (b) fibras monomodo (SMF), que admiten una única ruta para la propagación de la luz.

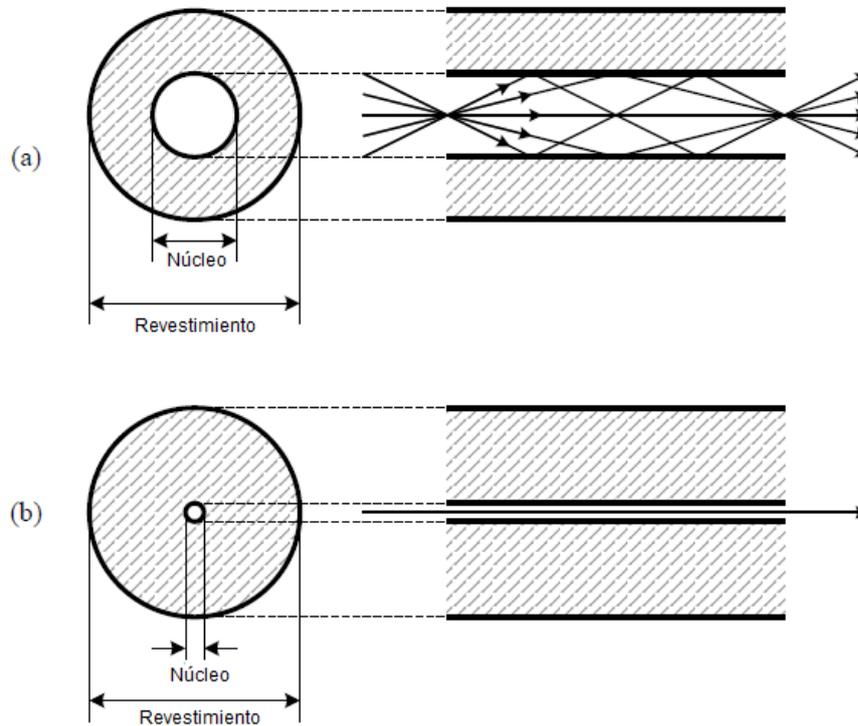


Figura 2. 8: Estructuras básicas de (a) fibras multimodo y (b) fibras monomodo con sus respectivas formas de propagación de la luz en ellas.

Fuente: (Baraliya, 2014)

### 2.3.1. Fibras multimodo.

Las fibras multimodo (MMF), cuyo diámetro del núcleo es bastante mayor que la longitud de onda de la luz, admiten más de una ruta de propagación, es decir, modos transversales, como se muestra en la figura 2.8 (a). Aunque las MMF se clasifican en dos tipos, fibra multimodo de índice escalonado y fibra multimodo de índice gradual. La figura 2.9 (a) y (b) muestran las representaciones geométricas de la MMF de índice escalonado e índice gradual con sus respectivos diámetros del núcleo de la fibra.

Las MMF estandarizados en Ethernet óptico, por ejemplo, tienen un diámetro de núcleo de aproximadamente  $50\ \mu\text{m}$ , rodeado por un revestimiento de  $125\ \mu\text{m}$  de diámetro. Por su gran diámetro, las fibras multimodo son fáciles de acoplar la luz de los láseres y los fotodiodos, y para unir fibras a fibras, que

es una propiedad favorable para enlaces de fibras. Sin embargo, su capacidad también está limitada por la distorsión inducida por la luz que viaja a través de diferentes caminos debido a su gran diámetro. Por lo tanto, las MMFs son adecuados para sistemas de comunicación que tienen como objetivo una velocidad de datos relativamente baja (<10 Gbps) de aplicaciones de corto alcance (<1 km).

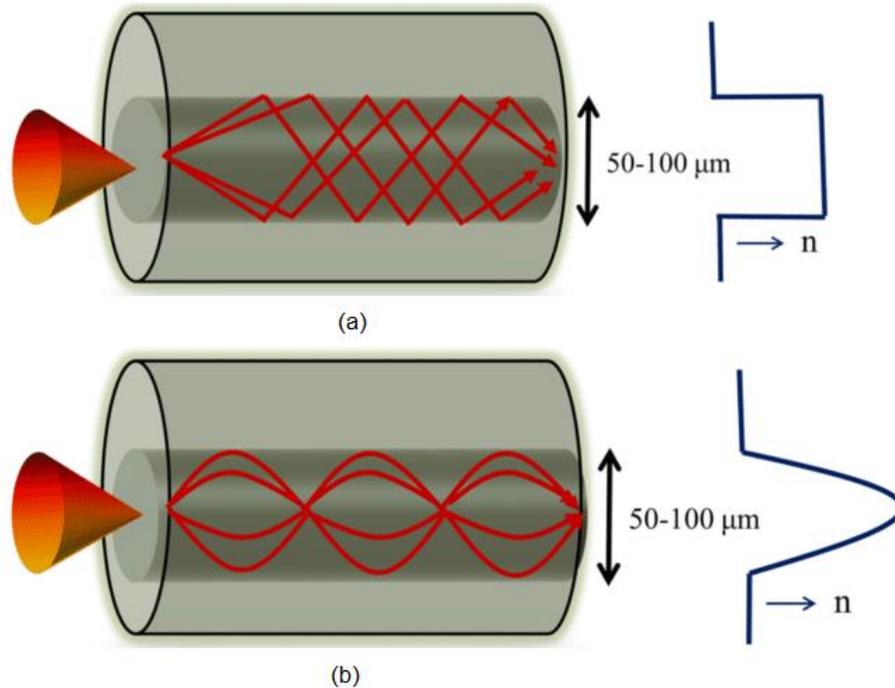


Figura 2. 9: Representación geometría de (a) fibra multimodo de índice escalonado y (b) fibra multimodo de índice gradual.

Fuente: (Mondal, 2020)

Aunque la divergencia de las rutas de propagación (modos transversales) en la fibra multimodo induce una interferencia intermodal que limita su capacidad, la característica de la propagación multimodal se puede utilizar en un enfoque ingenioso multiplexando distintos enlaces de luz en diferentes modos de comunicación distinguibles, multiplicando la capacidad de una sola pieza de fibra. Esta técnica se denomina multiplexación por división de modo (MDM). En los sistemas MDM, los datos se dividen en diferentes flujos y cada flujo se alimenta a un modo específico en la MMF para su transmisión.

Si la MMF está bien diseñada y construida, los datos pueden viajar dentro de la MMF en su propio modo, con una mínima interferencia intermodal

con otros modos. En el receptor, con las técnicas avanzadas de procesamiento de señales digitales para la recuperación de datos y la cancelación de interferencias, similar a la técnica de múltiples entradas y múltiples salidas en los sistemas de comunicación inalámbrica, cada flujo de datos puede ser demultiplexado.

### 2.3.2. Fibras monomodo.

La fibra monomodo (SMF) a diferencia de la fibra multimodo, es un tipo de fibra óptica cuyo diámetro del núcleo está diseñado tan pequeño que solo existe una única ruta (modo) para la propagación de la luz dentro de la fibra, tal como se muestra en la figura 2.10. La interferencia intermodal en la SMF desaparece como resultado de la transmisión monomodo y su capacidad se mejora significativamente. Las SMF son adecuadas para sistemas de comunicación de alta velocidad ( $> 10$  Gbps) a larga distancia ( $> 1$  km).

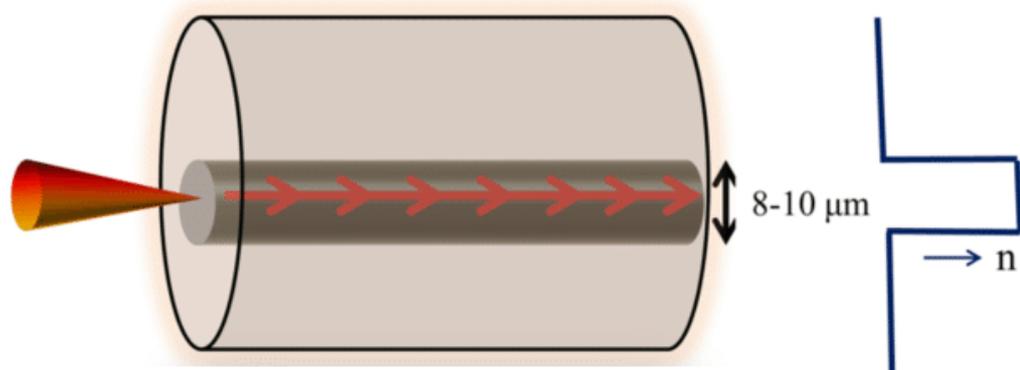


Figura 2. 10: Representación geometría de fibra monomodo.

Fuente: (Mondal, 2020)

Aunque las SMF son un canal relativamente ideal, en comparación con cualquier otro medio de canal, incluidas las fibras multimodo, todavía existen limitaciones físicas, como la dispersión cromática, la dispersión del modo de polarización y las no linealidades, en las fibras monomodo, especialmente en las demandas para sistemas de fibra óptica de más de 100 Gbps con una transmisión de destino a más de 40 km.

En la fibra monomodo, a medida que un pulso óptico pasa a través de la fibra, se producen diversos efectos físicos como cambios en la luz, que en la mayoría de los casos se consideran deficiencias. Se pueden desarrollar

diferentes modelos para diferentes aplicaciones. En las comunicaciones por fibra óptica, la fibra óptica se puede describir casi exclusivamente mediante la siguiente ecuación de propagación:

$$\frac{\partial E(z)}{\partial z} + \frac{\alpha}{2}E(z) = j \sum_{m=1}^{\infty} \frac{j^m \cdot \beta_m}{m!} \frac{\partial^m E(z)}{\partial t^m} + j \cdot \gamma |E(z)|^2 E(z) \quad (2.18)$$

Donde  $E(t, z)$  es el campo óptico a la distancia  $z$  y el tiempo  $t$ ,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación,  $\beta_m$  es el parámetro de dispersión de orden  $m$ -ésimo,  $\gamma$  es el parámetro no lineal. Cabe señalar que la ecuación anterior se basa en algunos supuestos de simplificación. Por ejemplo, se considera polarización simple y se omite el efecto Raman; el término  $E(t, z)$  es la envolvente que varía lentamente del pulso que puede considerarse como el campo óptico en la banda base a la frecuencia central  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ , y  $\beta_m$  se definen como

$$\beta_m = \left. \frac{\partial^m \beta}{\partial \omega^m} \right|_{\omega=\omega_0} \quad (2.19)$$

En la ec. (2.19) el primer término describe el campo óptico  $E(t, z)$  que se propaga en la fibra. El segundo término del lado izquierdo denota la atenuación, y los dos términos del lado derecho representan la dispersión cromática y el efecto Kerr no lineal, respectivamente. La ecuación se puede recortar para que sea más concisa y simple en función de las aplicaciones específicas. En la sección, se examinan en profundidad las fibras ópticas monomodo (SMF) y se formula el modelo de transmisión para las señales de comunicación.

Finalmente, la ec. (2.19) es un modelo de propagación de pulsos suficientemente bueno para la caracterización de canales en sistemas de comunicación por fibra óptica. Sin embargo, es uno de los temas más importantes en los sistemas de fibra óptica actuales y futuros. Especialmente, la compensación de las degradaciones no lineales debe considerarse cuidadosamente porque la no linealidad de la fibra interactúa con los efectos de atenuación y dispersión de una manera complicada de tiempo-frecuencia.

## 2.4. Atenuación.

La transmisión eficiente de luz en las longitudes de onda operativas es la función principal de la fibra óptica necesaria para una variedad de aplicaciones (por ejemplo, telecomunicaciones de largo alcance, láseres de fibra, suministro óptico para aplicaciones quirúrgicas o biomédicas). La reducción de la intensidad de la luz a medida que se propaga dentro de la fibra se denomina "atenuación". La atenuación finita presente en cualquier fibra óptica requiere que el diseño del sistema de fibra aborde la degradación en la intensidad de la señal mediante enfoques como la amplificación de la señal, la optimización de la interconexión, el diseño de la geometría de la fibra y el aislamiento ambiental. La comprensión de los mecanismos de atenuación y el potencial para su minimización es, por lo tanto, de gran importancia en el uso eficiente y económico de la fibra óptica.

Cualquier proceso que resulte en una reducción en la intensidad de la luz medida después de la propagación a través de un material contribuye a la atenuación óptica observada. En principio, todos los mecanismos de atenuación se pueden rastrear hasta la estructura de escala de longitudes múltiples del vidrio en sí (p. Ej., Estructura atómica, defectos puntuales, inclusiones de segunda fase) o estructuras que surgen del proceso de fabricación y/o diseño óptico de la fibra (p. Ej. estructura en la interfaz núcleo-revestido, uniformidad de la estructura núcleo-revestido a lo largo de la longitud de la fibra). Por lo tanto, el control de la estructura del material (mediante la composición, el procesamiento del material y los controles de fabricación de la fibra) es el medio principal para reducir la atenuación en la fibra terminada. Sin embargo, es necesario comprender los fenómenos ópticos subyacentes en funcionamiento y su relación con la composición y estructura del material.

El rendimiento óptico total (transmisión) de una fibra óptica se puede cuantificar en términos de la potencia óptica de entrada,  $P(0)$ , y la potencia de salida,  $P(z)$  observada después de que la luz se propaga una distancia,  $z$ , a lo largo de la longitud de la fibra:

$$P(z) = |E(z)|^2 = e^{-\alpha z} P(0) \quad (2.20)$$

con atenuación,

$$\frac{P(z)}{P(0)} = e^{-\alpha_{total}z} \quad (2.21)$$

y,

$$\%T = \frac{P(z)}{P(0)} \quad (2.22)$$

donde:  $\alpha_{total}$  es el coeficiente de atenuación total (es decir, que incluye todas las contribuciones a la atenuación); % T es el porcentaje de transmisión de potencia óptica. La ec. (2.21) se conoce como ley de Beer y muestra que la potencia transmitida disminuye exponencialmente con la distancia de propagación a través de la fibra.

En fibras monomodo disponibles comercialmente, la atenuación es típicamente de 0.16 dB/km a 0.5 dB/ km en la ventana óptica de 1300 nm a 1700 nm con la absorción de hidrógeno manejada con cuidado. La unidad del coeficiente de atenuación en decibelios es,

$$\alpha_{dB} = \frac{10 \log_{10} e^{-\alpha z}}{z} = \alpha \times 10 \log_{10} e \approx 4.343\alpha$$

Este último parámetro a menudo se denomina "pérdida de fibra". Es importante señalar desde el principio que el %T es una medida extrínseca de la capacidad de las fibras para transmitir potencia óptica. Múltiples contribuciones a un valor de transmisión general surgen de las propiedades intrínsecas del material de la fibra, así como de los mecanismos de atenuación asociados con la fabricación de la fibra. Estos diferentes procesos se suman a la reducción observada en la potencia transmitida ( $P(z)$ ) a través de contribuciones a la dependencia de magnitud y longitud de onda de  $\alpha_{total}$

## 2.5. Dispersión cromática.

La dispersión limita seriamente la capacidad de transmisión de las fibras ópticas de polímero (*Polymer Optical Fibers, POFs*) como consecuencia de la superposición de pulsos, lo que complica la detección de la señal y, en

consecuencia, aumenta la tasa de error de bits. El ensanchamiento del pulso a lo largo de las POFs es causado principalmente por dos mecanismos de dispersión, a saber, la dispersión intermodal (también conocida como modal) y la dispersión intramodal (también conocida como cromática). En la figura 2.11 (a) se muestra el comportamiento de la dispersión cromática antes y figura 2.11 (b) después de la fibra óptica.

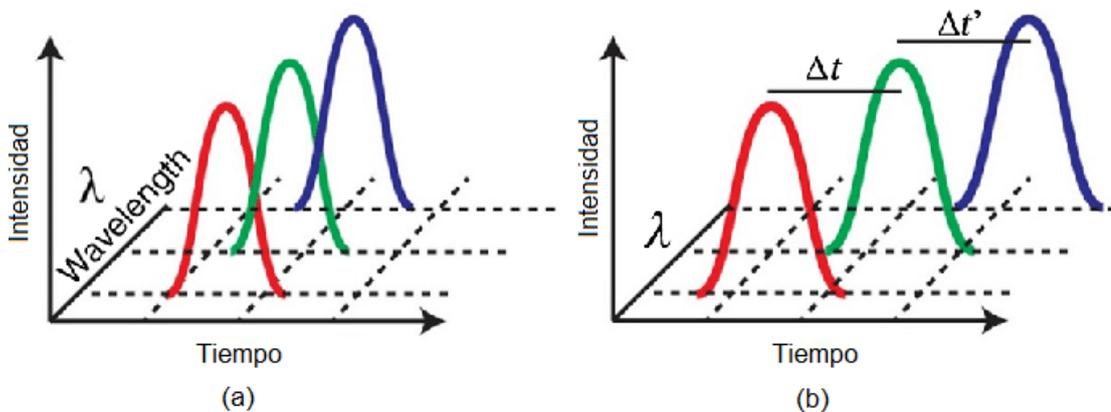


Figura 2. 11: Separación espectral lograda en virtud de la dispersión cromática de una fibra óptica.

Fuente: (Sagar et al., 2019)

Existe un tercer mecanismo de dispersión llamado dispersión en modo de polarización, pero normalmente puede ignorarse en las POFs. En cuanto a la dispersión modal, son los diferentes caminos que puede seguir la luz a lo largo del núcleo de la fibra los que producen el ensanchamiento del pulso. Por otro lado, la dispersión cromática es causada por el ancho espectral distinto de cero de la fuente de luz. Es decir, que comprende tanto material como dispersión de la guía de ondas, pero esta última es insignificante en las POFs. La dispersión del material, y la dispersión cromática en general, solo depende del material del núcleo y no del tipo de fibra, es decir, índice escalonado (*Step-Index, SI*) o índice gradual (*Graded-Index, GI*).

Se produce por la dependencia de la longitud de onda del índice de refracción del núcleo. Si bien este tipo de dispersión suele ser menor que la modal, no se debe desatender, especialmente en el caso de las POFs de índice gradual, cuyo uso para enlaces de comunicaciones se ha extendido significativamente en los últimos años. Por tanto, es cada vez más importante

caracterizar tanto la dispersión cromática como el índice de refracción de los POF en el rango de longitudes de onda que se utilizan normalmente.

En otras aplicaciones, también se requiere un conocimiento detallado de las propiedades de dispersión. Esto sucede, por ejemplo, en el campo de la espectroscopia. Por ejemplo, las POFs, y las fibras altamente dispersivas en general, podrían utilizarse para convertir pulsos ópticos cortos de banda ancha en barridos rápidos de longitud de onda. Hay tres técnicas principales en la literatura para caracterizar la dispersión cromática de las fibras ópticas:

- a. interferometría,
- b. desplazamiento de fase, y
- c. tiempo de vuelo.

Las técnicas interferométrías requieren un conocimiento preciso de los componentes mecánicos empleados en la configuración porque pequeñas desviaciones en las dimensiones físicas del interferómetro producen discrepancias significativas en los resultados de la medición. Por esta razón, la precisión que se puede lograr con este método es muy alta en teoría, pero no tan alta en la práctica, por lo que la mejora potencial en la precisión con respecto a los otros dos métodos no es tan clara. Además, esta técnica se limita a longitudes de fibra muy cortas.

Por otro lado, las técnicas de desplazamiento de fase se pueden utilizar con longitudes de fibra tanto cortas como largas, pero requieren fuentes de luz sintonizables de características conocidas, ya que los desplazamientos de fase deben determinarse a partir de una secuencia de longitudes de onda individuales. Normalmente se utiliza una señal de referencia para solucionar este problema. La precisión de esta técnica depende de la estabilidad de las fuentes de luz sintonizables, por lo que no está claro que sus resultados sean mejores que los que se pueden obtener con las otras dos técnicas. Finalmente, la técnica del tiempo de vuelo es comparativamente más fácil de implementar, debido a la ausencia de una señal de referencia, su simplicidad y su velocidad de ejecución. Por tanto, es una técnica muy adecuada para la medición de la dispersión de fibras ópticas.

## 2.6. Receptor óptico.

A medida que la luz viaja hasta el final del enlace de fibra, llegando al receptor, la señal óptica se percibe y se convierte de nuevo al dominio eléctrico. Según los formatos de modulación, deben aplicarse las técnicas de detección correspondientes.

Hay dos esquemas de detección sencillos, detección directa que convierte la intensidad del haz de luz en corriente eléctrica y detección coherente que recupera la información del campo óptico del haz de luz, incluidas la fase y la amplitud. La detección directa es el enfoque más simple y eficiente para esquemas de modulación de intensidad mediante un solo fotodiodo, cuyo ancho de banda puede ser de hasta 100 GHz.

En el sistema de detección directa, la información de fase se pierde por completo ya que el fotodiodo es una detección de ley cuadrada. Por otro lado, si se adoptan formatos de modulación avanzados, como PSK y QAM, que implican modulación de fase, debería emplearse la detección óptica coherente para recuperar toda la información modulada en el extremo del receptor.

## 2.7. Detección óptica directa.

En los sistemas de fibra óptica que emplean detección directa, el fotodiodo sirve como interfaz que convierte la señal óptica de nuevo en señal eléctrica, como se muestra en la figura 2.12.

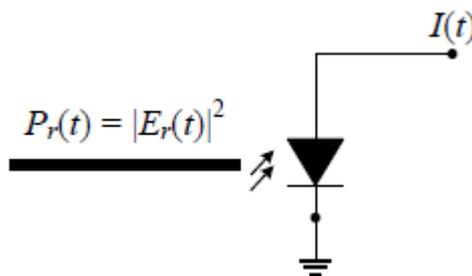


Figura 2. 12: Detección óptica directa mediante un único fotodiodo.  
Fuente: (Sagar et al., 2019)

La corriente de salida del fotodiodo es proporcional a la potencia óptica de entrada (intensidad), como

$$I(t) = R \cdot |E_r(t)|^2 = R \cdot P_r(t),$$

donde  $E_r(t)$  es el campo óptico de entrada al fotodiodo, R es la expansividad del fotodiodo e  $I(t)$  es la corriente eléctrica de salida.

## 2.8. Detección óptica coherente.

En los sistemas de comunicación de fibra óptica avanzados, la información se modula tanto en amplitud como en fase de una portadora óptica. En el receptor, para preservar toda la información en el campo óptico, debe emplearse una detección coherente.

La detección óptica coherente es la técnica capaz de extraer toda la información con una sensibilidad óptima del receptor. El concepto de detección óptica coherente se demostró y atrajo una atención considerable durante la década de 1980. Sin embargo, la llegada de los amplificadores ópticos y la tecnología WDM, y el seguimiento de fase inestable y los circuitos digitales inmaduros de alta velocidad desvanecieron el interés en la detección óptica coherente. Aunque teóricamente se ha demostrado que la detección coherente puede acercarse al límite de capacidad del canal de fibra óptica, no es práctico en los sistemas comerciales de fibra óptica hasta alrededor de 2005.

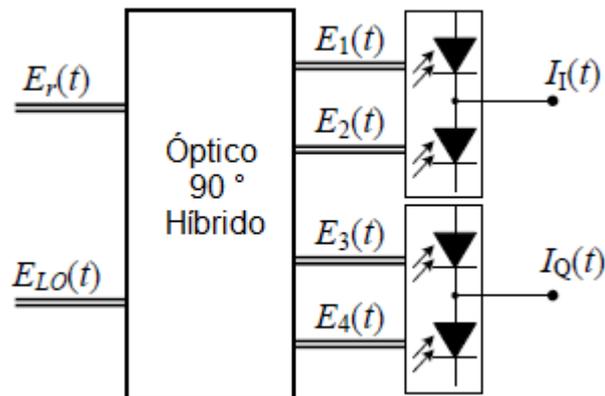


Figura 2. 13: Receptor óptico coherente compuesto por óptico híbrido de  $90^\circ$  y un par de fotodiodos balanceados para receptor óptico mono polarizado.

Fuente: (Sagar et al., 2019)

Alrededor del 2000, cuando el ancho de banda de la fibra óptica se expandió por completo y la Internet continuó en auge, mejorar la eficiencia espectral es una solución para satisfacer la demanda de capacidad. Aunque los formatos de modulación diferencial y el receptor auto-homodino alivian el

riguroso requisito del ancho de línea del láser, la sensibilidad del receptor aún está lejos del límite teórico a menos que se adopte una detección coherente.

Además, la detección coherente, combinada con el procesamiento de señales digitales (DSP), es capaz de compensar completamente las degradaciones lineales y mitigar las no lineales en el canal de fibra óptica.

El convertidor analógico-digital de alta velocidad (ADC) y el oscilador local de ancho de línea estrecho (LO), etc., permiten la detección coherente con DSP para compensar la degradación lineal de la fibra óptica. Por ejemplo, Kikuchi et al. demostró una transmisión de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK) de 40 Gbits / s a lo largo de 200 km con una eficiencia espectral de 2,5 bit / s / Hz en 2006. En 2010, se demostró una transmisión de 69,1 Tbps en 240 km con una eficiencia espectral de 6,4 bps/Hz en 2010, en el que había 432 canales, cada uno de los cuales transmite Señales de multiplexación por división de polarización (PDM) 16-ary QAM (16-QAM) Gbps.

En la detección óptica coherente, el elemento esencial que comprende el receptor óptico coherente es el llamado híbrido óptico de 90 ° que es esencialmente un interferómetro multimodo de 2 × 4, que tiene dos puertos de entrada, uno para señal y otro para oscilador local. Los campos ópticos de los cuatro puertos de salida se pueden representar matemáticamente mediante

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \begin{pmatrix} E_1(t) \\ E_2(t) \\ E_3(t) \\ E_4(t) \end{pmatrix} = \mathbf{M}\mathbf{E}_{\text{in}} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & j \\ 1 & -j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_r(t) \\ E_{\text{LO}}(t) \end{pmatrix},$$

Donde M es la matriz de transferencia del híbrido óptico de 90 °, y  $E_r(t)$  y  $E_{\text{LO}}(t)$  son los campos ópticos de la señal entrante y el oscilador local (LO), respectivamente. Siguiendo al híbrido óptico, hay un par de fotodiodos balanceados. Siempre que las respuestas de los fotodiodos sean las mismas,

es decir,  $R$ , las corrientes eléctricas de salida de los fotodiodos equilibrados son

$$I_I(t) = R \cdot |E_I(t)|^2 - R \cdot |E_2(t)|^2,$$

Y

$$I_Q(t) = R \cdot |E_3(t)|^2 - R \cdot |E_4(t)|^2,$$

respectivamente. Sustituyendo  $E_1(t)$  y  $E_2(t)$  en la ecuación. 2.46) uno puede obtener

$$\begin{aligned} I_I(t) &= \frac{1}{4} R \cdot [|E_r(t) + E_{LO}(t)|^2 - |E_r(t) - E_{LO}(t)|^2] \\ &= R \cdot \Re\{E_r(t)E_{LO}^*(t)\}, \end{aligned}$$

y,  $E_3(t)$  y  $E_4(t)$  en Eq. (3,47),

$$\begin{aligned} I_Q(t) &= \frac{1}{4} R \cdot [|E_r(t) + E_{LO}(t)|^2 - |E_r(t) - j \cdot E_{LO}(t)|^2] \\ &= R \cdot \Im\{E_r(t)E_{LO}^*(t)\}. \end{aligned}$$

Idealmente, el oscilador local es una onda continua con frecuencia exactamente a la frecuencia de la portadora óptica, es decir, detección homodina. Prácticamente, esta condición, sin embargo, difícilmente se puede lograr. En la práctica, la señal óptica se convierte a la banda base con algún desplazamiento de frecuencia, y el desplazamiento de frecuencia se eliminará mediante la compensación de desplazamiento de frecuencia.

Si la frecuencia óptica del oscilador local (LO) es  $f_{LO}$  con ruido de fase  $\theta_{LO}(t)$ , y tomamos la Eq. (3.14) en cuenta, la señal compleja recibida es

$$\begin{aligned} r(t) &= E_I(t) + j \cdot E_Q(t) \\ &= R \cdot [\Re\{E_{in}(t)E_{LO}^*(t)\} + j \cdot \Im\{E_{in}(t)E_{LO}^*(t)\}] \\ &= R\sqrt{P_R P_{LO}} \cdot s(t) e^{j2\pi(f_c - f_{LO})t} \cdot e^{j[\theta_r(t) + \theta_{LO}(t)]} + n(t), \end{aligned}$$

donde  $s(t)$  es la señal de banda base compleja modulada en la portadora óptica,  $P_R$  y  $P_{LO}$  son la potencia de la señal entrante y el LO, y  $n(t)$  es el término de ruido aditivo que incluye la emisión espontánea amplificada acumulada

(ASE) el ruido de los amplificadores ópticos y el ruido de disparo de la fuente láser en el transmisor y el de LO en el receptor.

Aunque la frecuencia y fase tanto del láser transmisor como de LO se desviarán con el tiempo en un sistema práctico, la detección homodina, en la que  $f_c = f_{LO}$ , es de mayor interés. En la detección homodina, el desplazamiento de frecuencia entre  $f_c$  y  $f_{LO}$  es insignificante y el desplazamiento de frecuencia residual se puede compensar fácilmente mediante algoritmos DSP.

Otra detección coherente alternativa es la detección heterodina, en la que existe un desplazamiento de frecuencia obvio entre el oscilador local y la frecuencia portadora. La señal recibida se convierte primero a una frecuencia intermedia y luego a banda base. En un sistema óptico coherente práctico, existe un término de ruido de fase,  $\theta(t) = \theta_T(t) + \theta_{LO}(t)$ , debido a la variación aleatoria de los láseres, y el ruido de fase también se puede compensar utilizando algoritmos DSP.

### Capítulo 3: Diseño. Simulación y Resultados.

En el presente capítulo se describe el diseño del modelo de comunicación óptica propuesto y se muestran los resultados obtenidos para diferentes parámetros de simulación en el software OptiSystem 7.0.

#### 3.1. Simulación de diseño de RoF.

Para formar una secuencia en serie, se deben obtener las muestras. Estas muestras se codifican en datos digitales de banda base utilizando la codificación de no retorno a cero (*Non Return to Zero, NRZ*). Luego, se modula eléctricamente mediante la técnica modulada combinada antes de modularse ópticamente mediante el uso de moduladores ópticos, tal como el láser modulador Mach-Zehnder (MZM) o el láser modulador de electro-absorción (EAM). La señal modulada ópticamente transmite la información a través de un portador de luz. La técnica de modulación utiliza una combinación de diferentes fuentes ópticas como el láser Fabry Perot, el láser modulado Mach Zehnder único, el modulador de electro-absorción, VCSEL.

La función principal de la fuente de luz es convertir la señal eléctrica en luz de manera eficiente con la fibra óptica que se puede inyectar a la fibra en el receptor. La fuente óptica debe tener un ancho de banda espectral estrecho para minimizar la dispersión. Para mejorar el rendimiento de la comunicación por fibra óptica, se utilizan técnicas de modulación híbridas.

Las técnicas de modulación combinadas son la:

- a. Modulación de manipulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada y modulación de amplitud se denomina OQPSKA;
- b. Modulación por cambio de fase diferencial se fusiona con la modulación de amplitud y se denomina DPSKA;
- c. Modulación de frecuencia con modulación de fase se denomina FPM;
- d. La modulación de amplitud en cuadratura se fusiona con la modulación de frecuencia y se denomina QAFM;
- e. Modulación de amplitud de pulso combinada con la modulación de frecuencia se conoce como PAFM;

- f. Modulación de amplitud de fase combinada con la modulación de fase se denomina PAPM.

La relación entre el factor Q (calidad) y la tasa de error de bits (BER) es la siguiente:

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{Q}{\sqrt{2}} \right],$$

$$SNR = \frac{E_b}{\sigma^2},$$

donde  $E_b$  es la energía por bit,  $\sigma^2$  es la variación del ruido. La relación entre la tasa de error de bits (BER) y la potencia recibida se da como,

$$BER = Q \left[ \frac{I_1 - I_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right].$$

La ecuación anterior se utiliza para calcular la BER cuando se conocen la potencia recibida para un bit “1” y un bit “0” y las estadísticas de ruido. Los fotodetectores de avalancha (APD) y PIN son utilizados para convertir la señal óptica en señal eléctrica en el lado del receptor. El dispositivo utilizado para ejecutar la regeneración de la señal eléctrica y luego recuperar la secuencia de bits original se denomina regenerador 3R. El filtro pasa bajo de Bessel se utiliza para pasar la banda de frecuencia de diseño.

El diagrama de bloques general del método propuesto se muestra en la figura 3.1. Mientras que la figura 3.2 muestra la modulación combinada de DPSK con AM en el lado del transmisor. En la técnica de modulación de amplitud (AM), la señal portadora de radiofrecuencia varía de acuerdo con la señal de banda base.

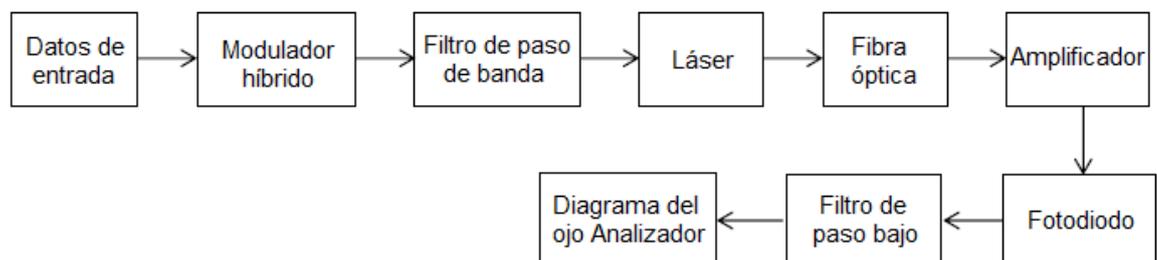


Figura 3. 1: Diagrama de bloques general del método propuesto.  
Elaborado por: Autor.

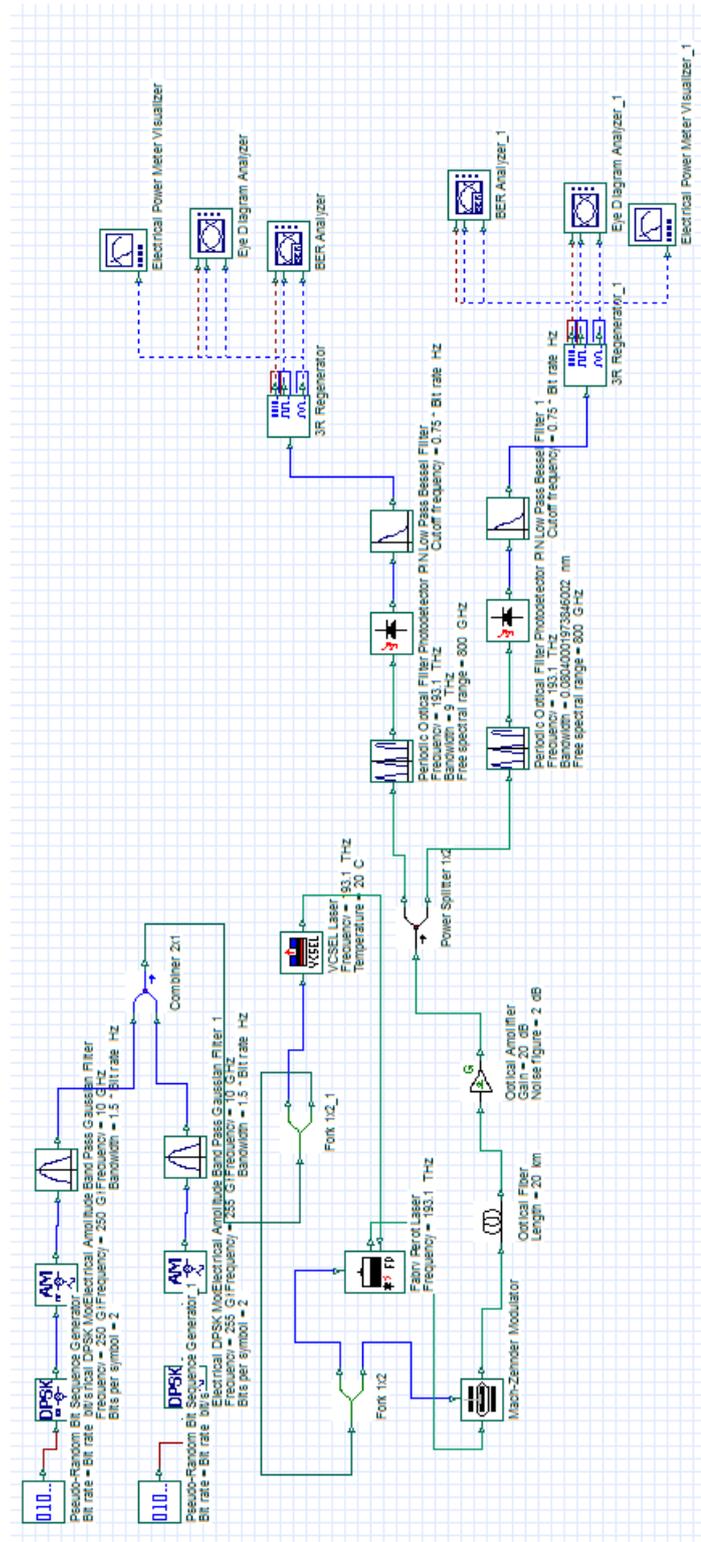


Figura 3. 2: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación DPSKA.

Elaborado por: Autor.

La técnica de modulación DPSK se basan en la diferencia entre las fases sucesivas. El láser óptico del equipo de modulación Mach-Zehnder (MZM)

modula tanto la fuente óptica como los datos de frecuencia. En la figura 3.3 se muestra el modelo RoF basado en la técnica de modulación PAFM. Esta técnica incluye la combinación de modulación de amplitud de pulso (PAM) combinada con la modulación de frecuencia (FM).

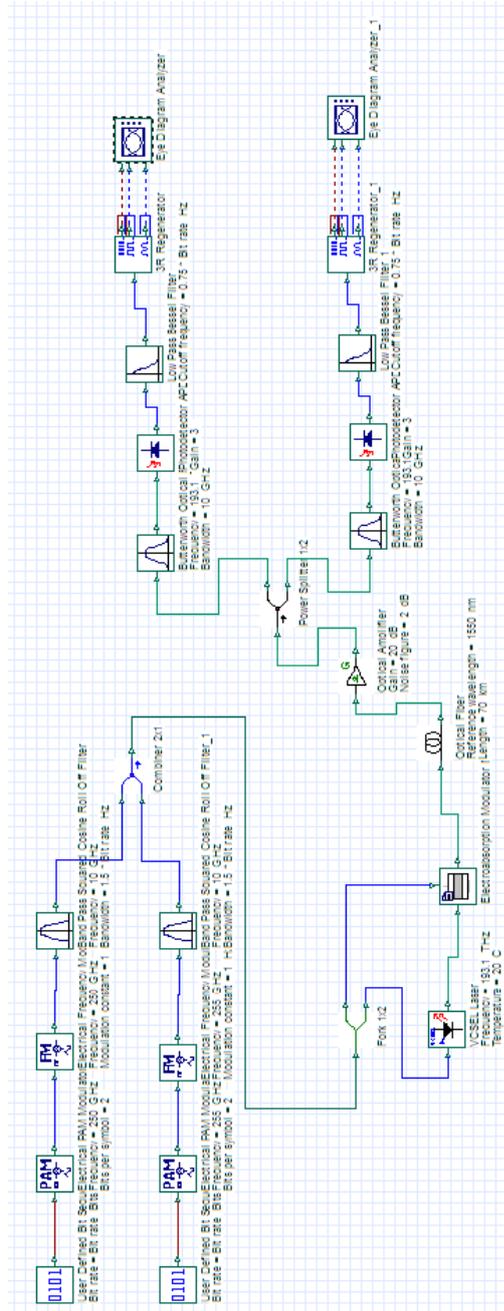


Figura 3. 3: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación PAFM.

Elaborado por: Autor.

En la modulación de amplitud de pulso (PAM), la amplitud de pulso individual se varía de acuerdo con la amplitud de la señal de modulación. En

la técnica de modulación de frecuencia (FM), existe una variación en la frecuencia portadora de la señal de acuerdo con la señal de banda base. La figura 3.4 muestra la técnica de modulación OQPSKA, que es una combinación de modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (OQPSK) y modulación de amplitud (AM).

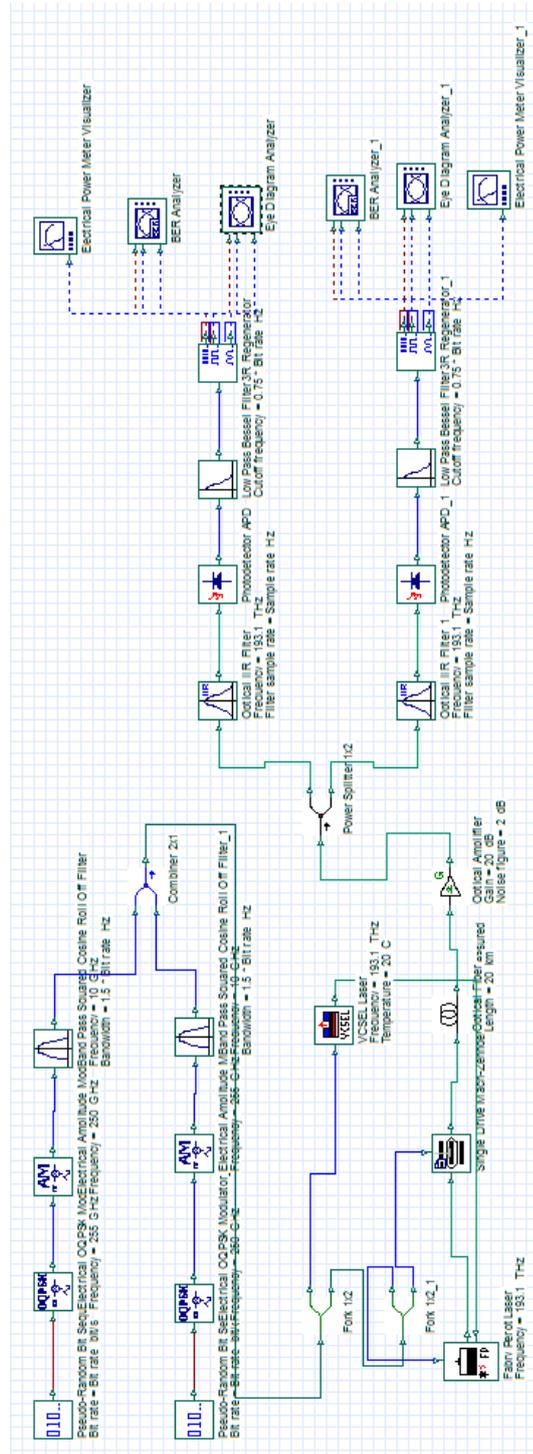


Figura 3. 4: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación OQPSKA.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.5 muestra la técnica de modulación combinada QAFM basada en RoF. QAFM es la forma de modulación en cuadratura en la que ambas portadoras se modulan en amplitud y en frecuencia.

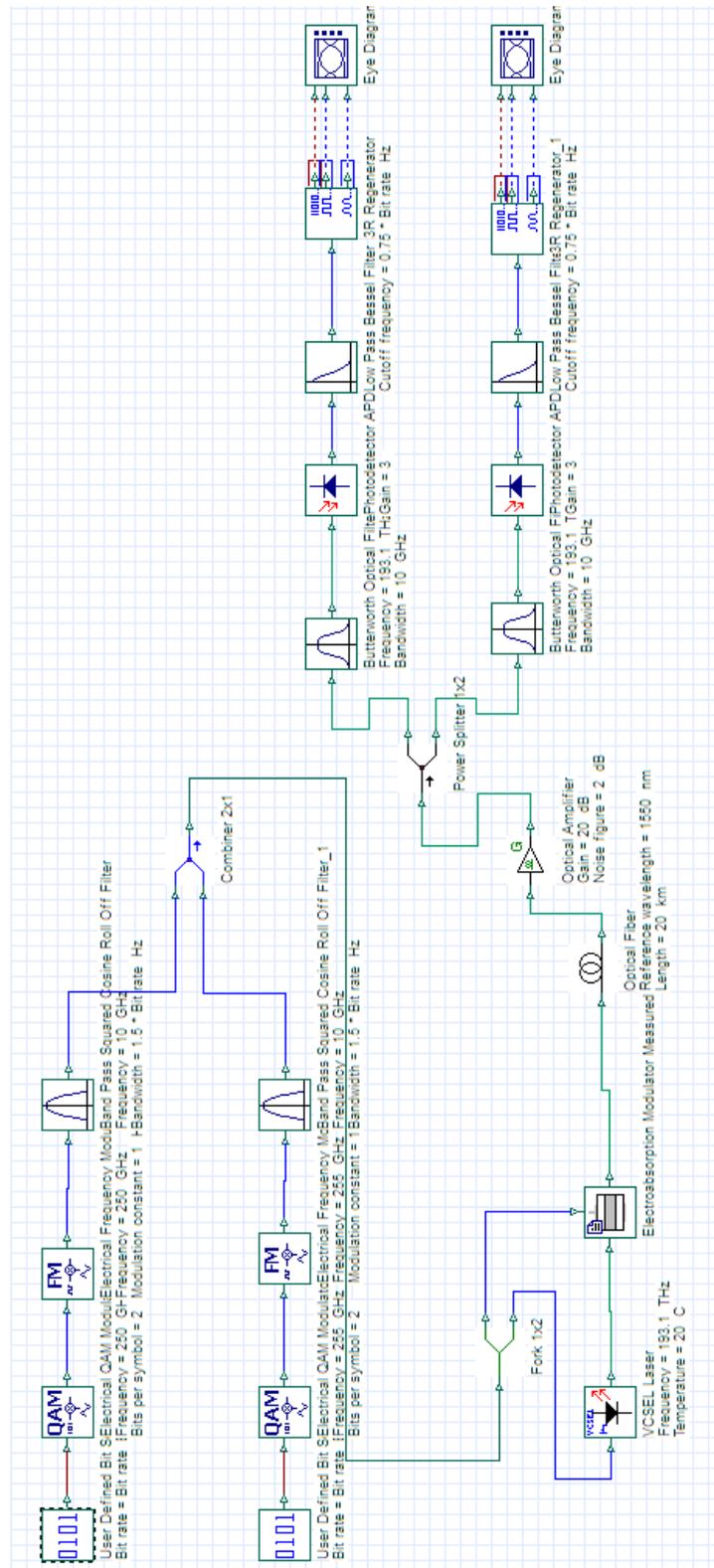


Figura 3. 5: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación QAFM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.6 muestra el esquema de la técnica de modulación FPM donde las técnicas de modulación de frecuencia y modulación de fase se combinan juntas en el lado del transmisor.

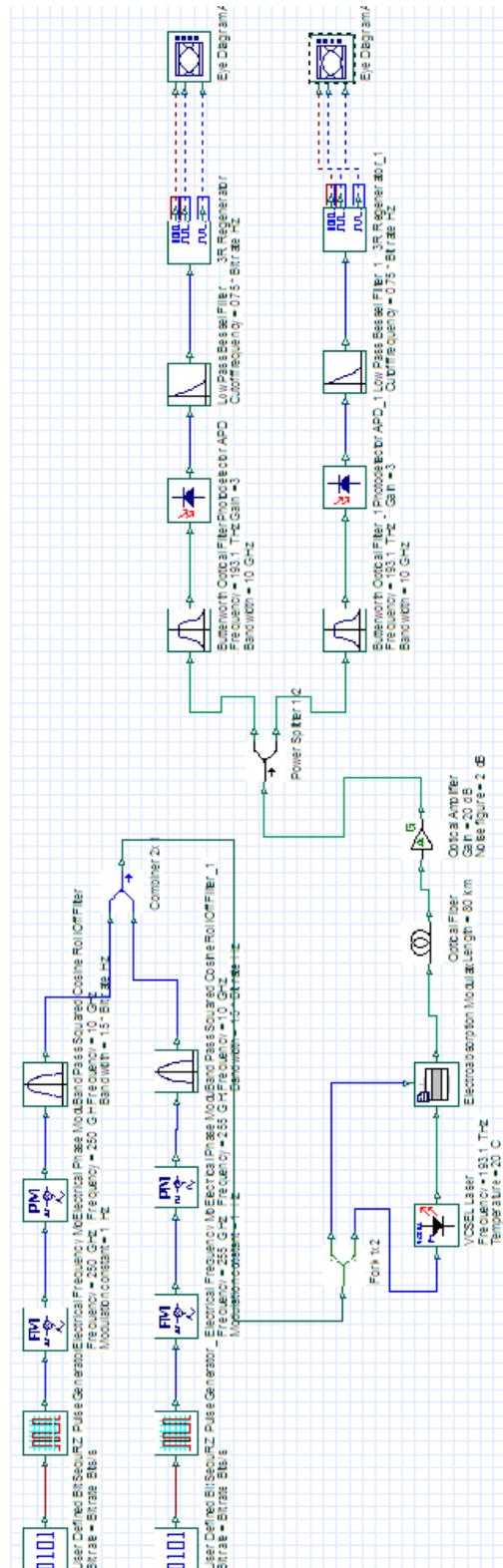


Figura 3. 6: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación FPM.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 describe el PAMP técnica de modulación híbrida que es una combinación de modulación de amplitud de pulso junto con modulación de fase.

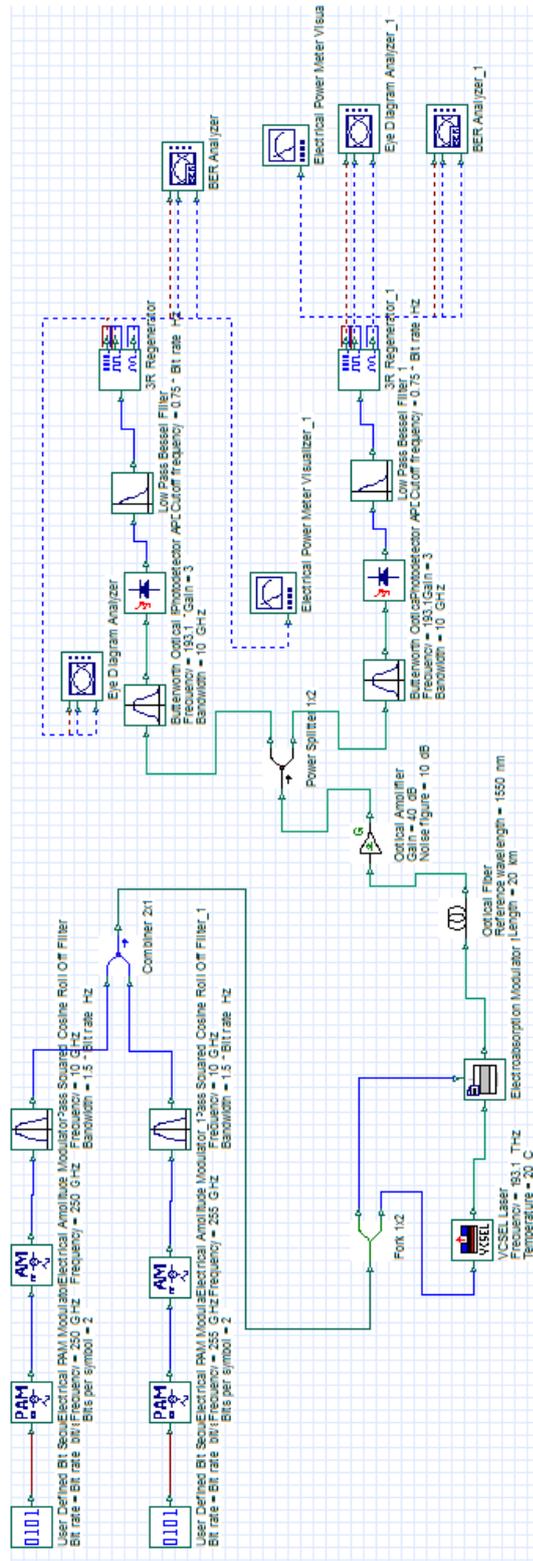


Figura 3. 7: Modelo de simulación de RoF basado en la técnica de modulación PAMP.

Elaborado por: Autor.

### 3.2. Resultados y análisis de la simulación.

Las seis diferentes técnicas de modulación híbrida se demuestran en el lado del transmisor del sistema de comunicación RoF. El resultado de esta simulación describe diferentes cantidades como el factor Q, la potencia recibida y la tasa mínima de error de bits (BER). Los parámetros de simulación se enumeran en la tabla 3.1.

Tabla 3. 1: Parámetros de simulación de los modelos propuestos.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud de onda láser	1550	nm
Temperatura ambiente	20	°C
Longitud de la fibra	10-160	Km
Tasa de bits	10-160	Gbps

Elaborado por: Autor.

Las técnicas de modulación híbrida se implementan y simulan utilizando el software OptiSystem 7.0. El software MatLab R2018a se utiliza para comparar el rendimiento en términos de la tasa de error de bits (BER), factor Q y potencia recibida. En este trabajo, la distancia del enlace de transmisión varía entre 10 y 120 km para analizar el desempeño de cada técnica de modulación híbrida propuesta en las figuras 3.2 a 3.7.

En las técnicas de modulación híbrida, a medida que la distancia de transmisión aumenta de 10 a 120 km, se observa una variación en el factor Q. Por ejemplo, la figura 3.8 muestra el gráfico de comparación del factor Q máximo y de la longitud de la fibra. Esto muestra la degradación del factor Q a medida que aumenta la longitud de la fibra. Esto es principalmente debido a la atenuación de la fibra y la falta de linealidad de la fibra a medida que aumenta la distancia de transmisión.

La modulación híbrida QAFM obtuvo un factor Q máximo de 33 cuando la longitud de la fibra era de 10 km. Esto significa que, para una distancia mínima de 10 km, la modulación híbrida QAFM proporciona un mejor valor de factor Q. La técnica de modulación híbrida FPM alcanza el valor del factor Q

de 32, que es casi el mismo que el de la técnica de modulación combinada QAFM. La técnica de modulación híbrida DPSKA adquirió el valor mínimo de factor Q como 15. En comparación con las técnicas de modulación combinadas mencionadas anteriormente, la modulación híbrida QAFM muestra una disminución en el valor del factor Q a medida que aumenta la longitud de la fibra.

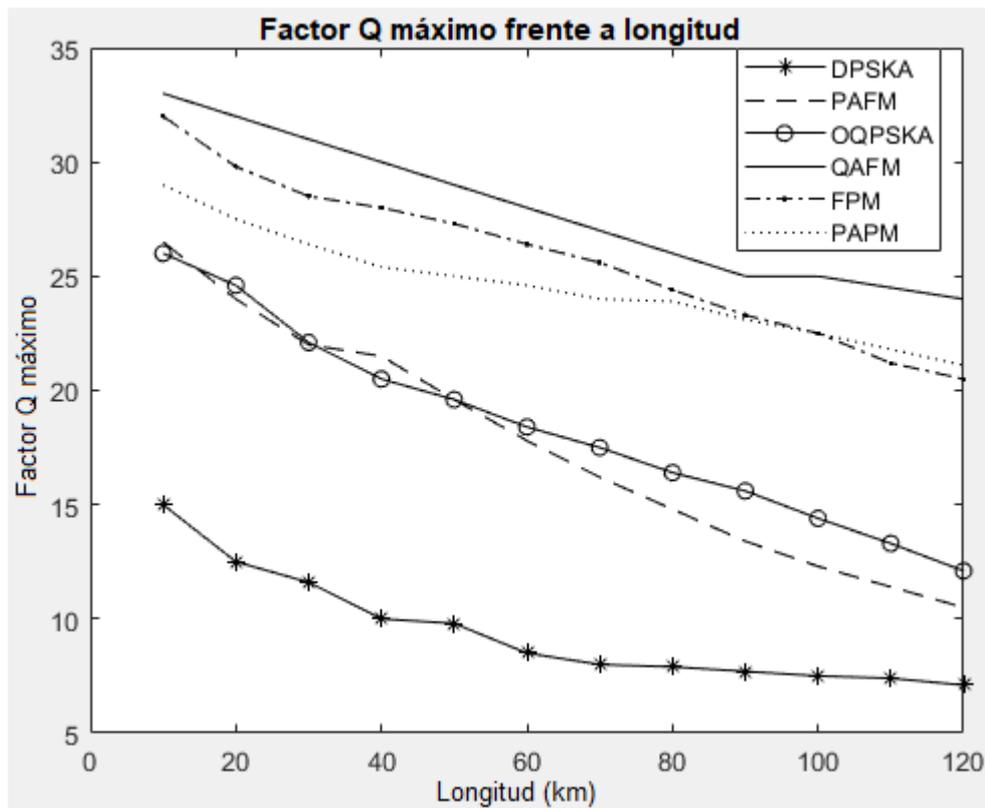


Figura 3. 8: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de Q-Factor.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.9 muestra el gráfico de comparación entre la tasa de error de bits (BER) mínima y la tasa de bits (velocidad). Se observa que cuando la tasa de bits aumenta de 10 a 120 Gbps, también aumenta la BER mínima. Esto se debe a la disminución de la atenuación, lo que conduce a una mejora en el valor del factor Q y da como resultado la minimización de la tasa de errores de bits. La técnica de modulación híbrida FPM obtiene la BER mínima de  $10^{-170}$  a una tasa de bits de 10 Gbps. Esto indica que, a la tasa de bits mínima de 10 Gbps, el modulador híbrido FPM proporciona el mejor valor de BER. A medida que la tasa de bits aumenta a 120 Gbps, el valor de BER también aumenta.

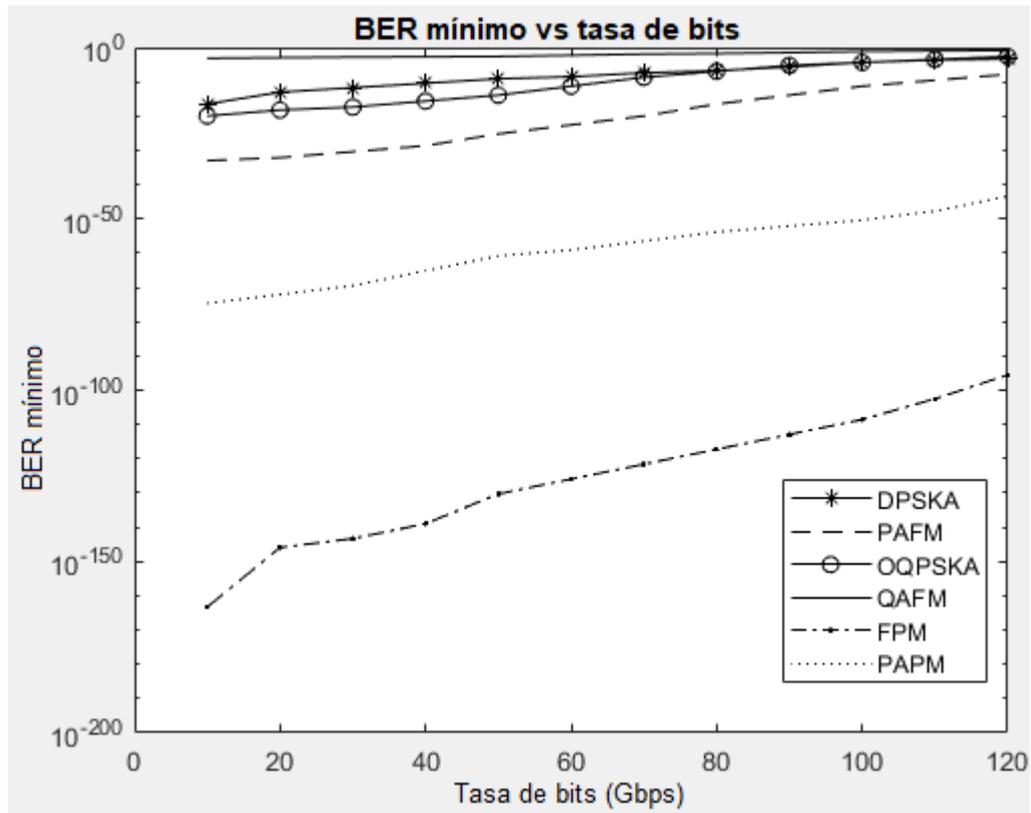


Figura 3. 9: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de BER mínima.

Elaborado por: Autor.

La modulación híbrida FPM alcanza el valor mínimo de BER de  $10^{-110}$  cuando la tasa de bits es de 10 Gbps. También se infiere que la técnica de modulación híbrida FPM puede extraer el mensaje transmitido correctamente incluso con la baja potencia recibida. El esquema de modulación híbrido DPSKA logra el valor de factor Q más bajo, lo que da como resultado un aumento del valor mínimo de BER a  $10^{-17}$ . El valor de BER mínimo obtenido a una velocidad de bits de 10 Gbps para las modulaciones híbridas PAFM, PAPM y OQPSKA son  $10^{-35}$ ,  $10^{-80}$  y  $10^{-20}$  respectivamente.

La técnica de modulación híbrida FPM muestra un menor incremento en el valor de la BER en comparación con todas las técnicas de modulación híbridas ya mencionadas cuando hay un aumento en la tasa de bits. La tabla 3.2 muestra la comparación general de las técnicas de modulación híbridas propuestas en términos del factor Q, BER mínima y potencia recibida.

Tabla 3. 2: Medida de la calidad de funcionamiento de la técnica de modulación híbrida a una longitud superior de 80 km.

Parámetros	PAFM	QAFM	FPM	DPSKA	PAPM	OQPSKA
Factor Q	26.5	33	32	15	29	26
BER mínimo	$10^{-35}$	$10^{-110}$	$10^{-170}$	$10^{-17}$	$10^{-80}$	$10^{-20}$
Potencia recibida (mW)	0.08	0.1	0.07	0.32	0.085	0.79

Elaborado por: Autor.

En la figura 3.10 se observa que cuando aumenta la longitud de la fibra, se reduce la potencia recibida. Cuando la longitud de la fibra es de 10 km, la potencia recibida aumentada obtenida para la técnica de modulación híbrida OQPSKA propuesta es de 0,79 mW. Se infiere que, a la longitud mínima de la fibra, la técnica de modulación híbrida OQPSKA proporciona el aumento de potencia recibida. Cuando la distancia de transmisión aumenta de 10 a 120 km, la potencia recibida disminuye rápidamente.

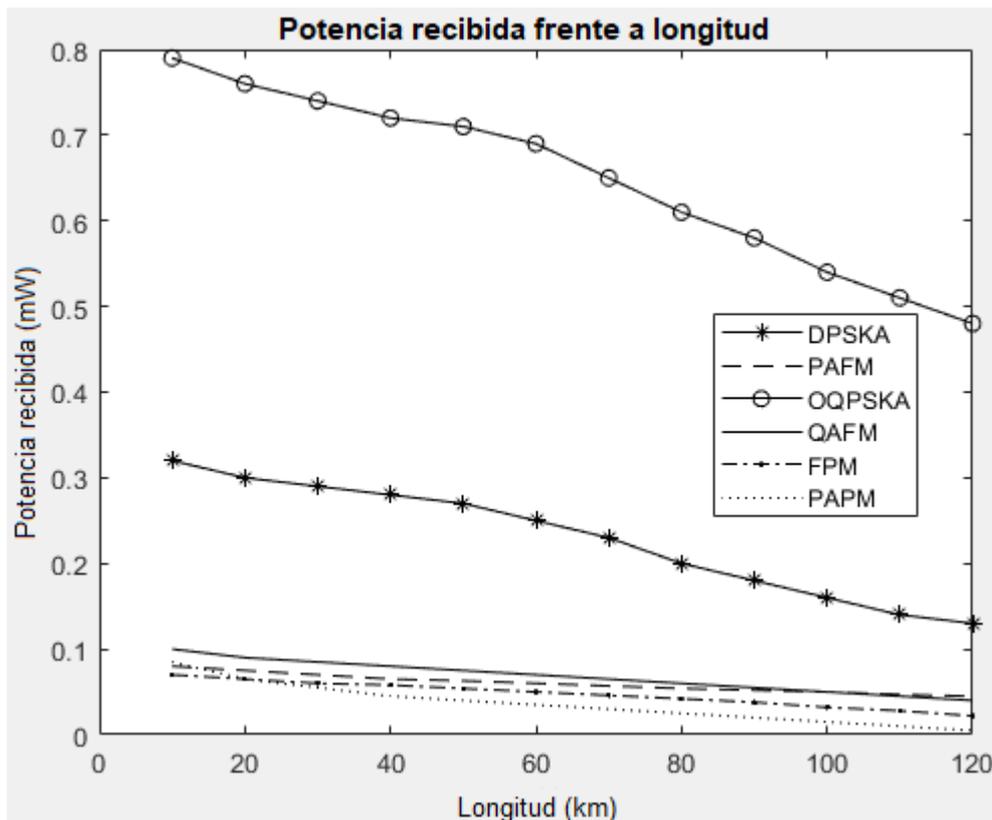


Figura 3. 10: Comparación de rendimiento para diferentes técnicas de modulación híbrida en términos de potencia recibida.

Elaborado por: Autor.

La técnica de modulación combinada FPM y PAPM muestra la potencia mal recibida a medida que aumenta la distancia de transmisión. Cuando se compara con todas las técnicas de modulación combinadas mencionadas anteriormente, OQPSKA muestra una menor disminución en la potencia recibida ya que la distancia de transmisión varía de 10 a 120 km.

La figura 3.11 muestra el comportamiento de rendimiento de la técnica de modulación tradicional junto con la técnica de modulación híbrida en términos del factor Q. La técnica de modulación de amplitud (AM) obtuvo el valor máximo del factor Q igual a 6 cuando la longitud de la fibra era de 10 km. La modulación DPSK convencional adquiere el valor máximo de factor Q de 9.8 para una longitud de fibra de 10 km.

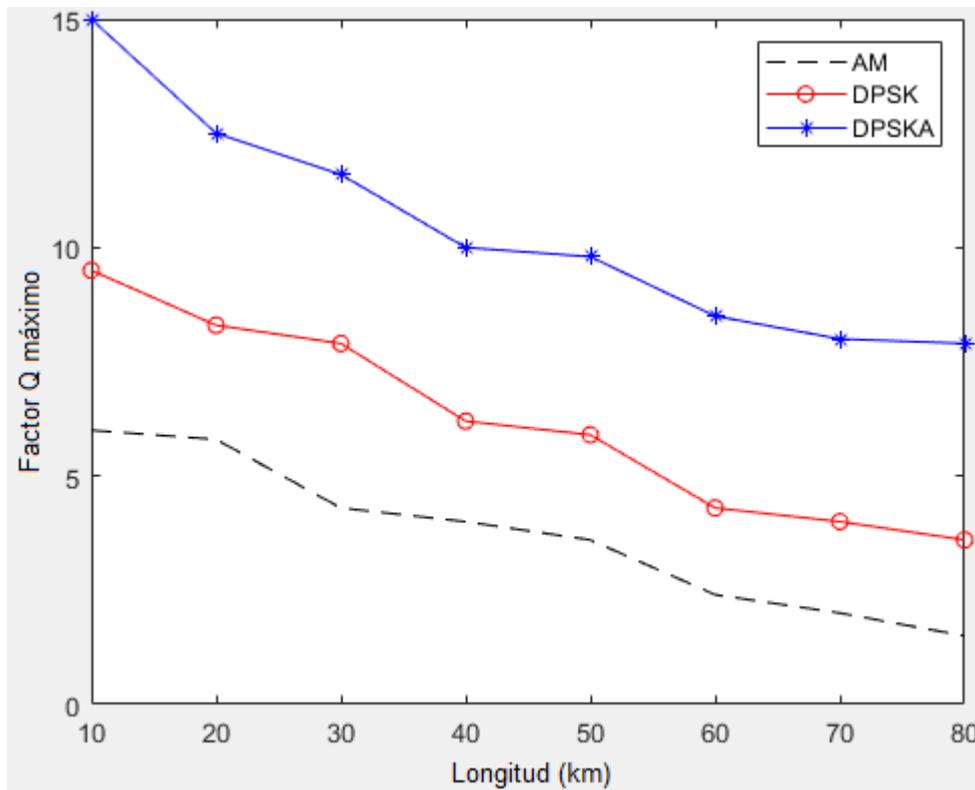


Figura 3. 11: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos del factor Q.

Elaborado por: Autor.

La modulación DPSK (ver figura 3.11) muestra un incremento en el valor del factor Q en comparación con la técnica de modulación de amplitud. Pero la técnica de modulación híbrida DPSKA proporciona un incremento en el valor del factor Q a 15 para una longitud de fibra de 10 km. Finalmente, se

concluye que la técnica de modulación híbrida DPSKA muestra un incremento en el rendimiento del sistema en comparación con las técnicas tradicionales individuales. Junto con esto, el esquema de modulación híbrido DPSKA muestra menos disminución en el valor del factor Q a medida que aumenta la distancia de transmisión.

La figura 3.12 muestra la comparación de rendimiento de la técnica de modulación tradicional (DPSK y AM) junto con la modulación híbrida (DPSKA) en términos de la BER mínima. A partir de esta figura, se observa que a medida que aumenta la tasa de bits de 10 a 120 Gbps, también aumenta el valor mínimo de la tasa de error de bits (BER). El valor de la BER mínimo obtenido para la modulación de amplitud (AM) es  $10^{-4}$ , la modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) es  $10^{-8}$  y el esquema de modulación híbrido (DPSKA) es  $10^{-17}$ . Se infiere que la técnica de modulación híbrida DPSKA muestra menor incremento en el valor de la BER mínimo en comparación con las técnicas de modulación tradicionales (DPSK y AM) individuales.

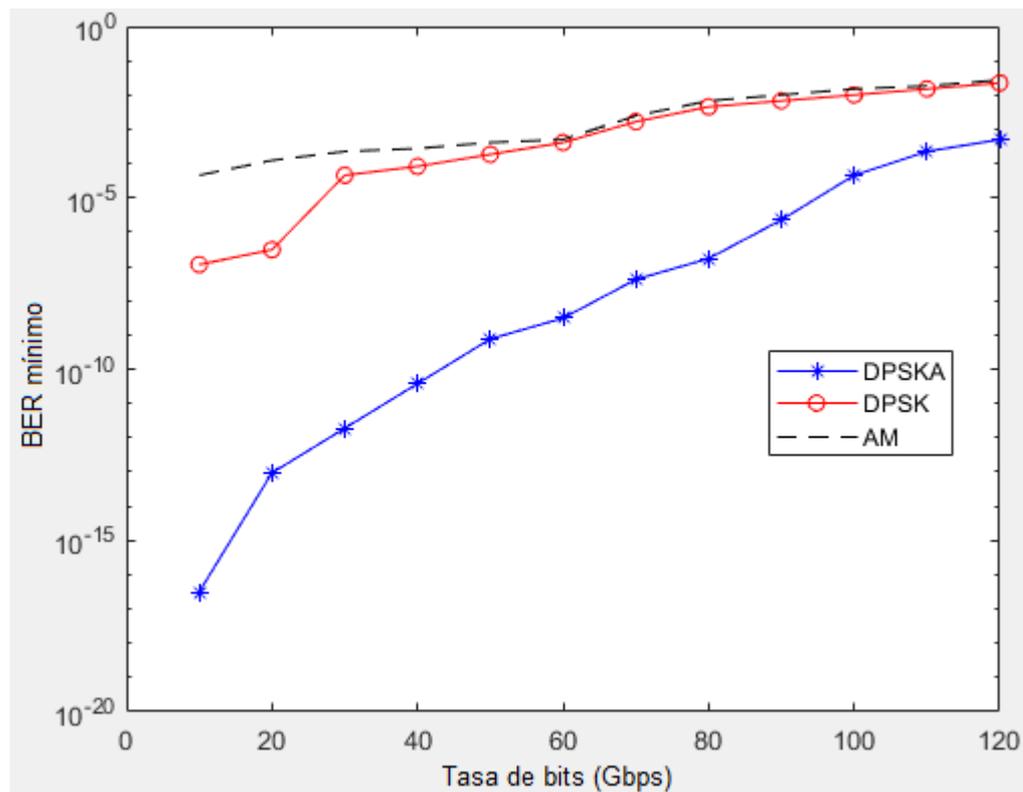


Figura 3. 12: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos de la BER.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.13 ilustra el comportamiento de rendimiento de la técnica de modulación híbrida en comparación con la modulación convencional en términos de potencia recibida. A partir de esta cifra, se observa que a medida que aumenta la distancia de transmisión de 10 a 120 km, la potencia recibida disminuye. La potencia recibida máxima obtenida a 10 km para la modulación de amplitud es de 0,13 mW, la modulación por desplazamiento de fase diferencial es de 0,2 mW y la combinación de DPSK y AM es de 0,32 mW. Se infiere que la técnica de modulación híbrida combinada obtiene la máxima potencia recibida en comparación con el método convencional a medida que la distancia de transmisión aumenta de 10 a 120 km.

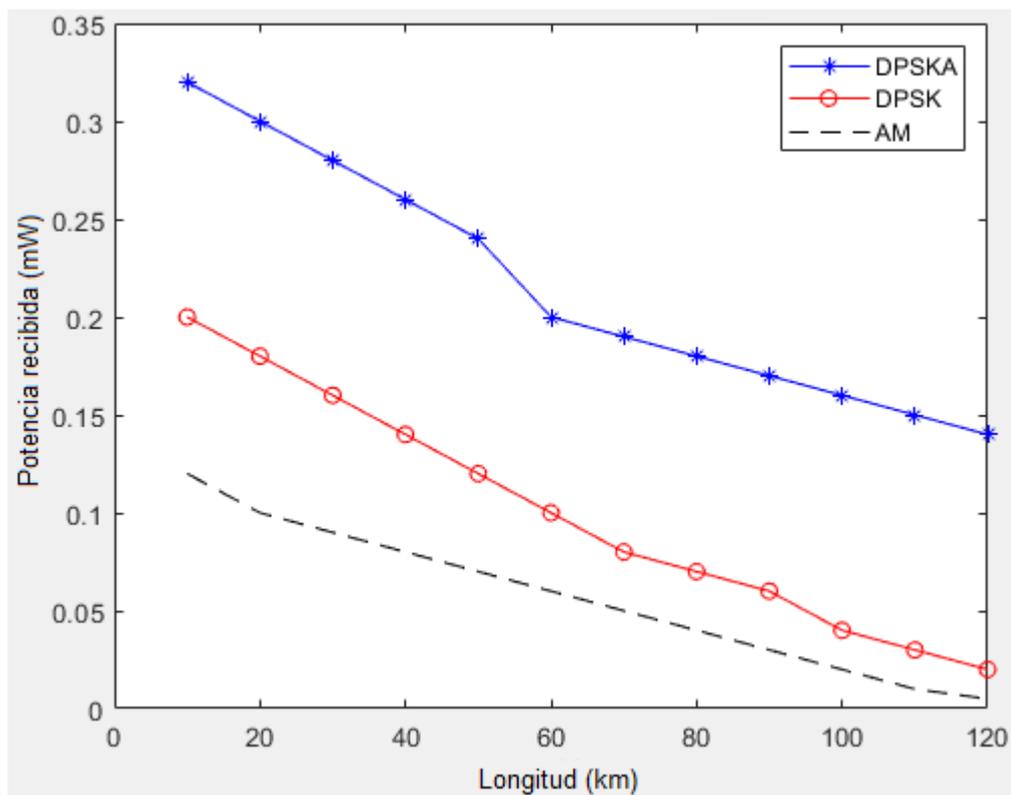


Figura 3. 13: Comparación de rendimiento de la modulación convencional e híbrida en términos de potencia recibida.

Elaborado por: Autor.

## Conclusiones

- El sistema de comunicación RoF con la técnica de modulación híbrida propuesta proporciona una mejora del rendimiento en comparación con la técnica de modulación tradicional.
- Las técnicas de modulación híbrida que se utilizan para mejorar el comportamiento de rendimiento de la comunicación de fibra óptica son PAFM, QAFM, FPM, DPSKA, PAPM y OQPSKA.
- La longitud de la fibra se extiende de 10 a 120 km con una tasa de bits de hasta 120 Gbps. La técnica de modulación QAFM propuesta obtuvo el factor Q máximo de 33 cuando la longitud de la fibra era de 10 km.
- La tasa mínima de error de bit de  $10e-170$  se logra en la técnica de modulación híbrida FPM. En OQPSKA, la potencia recibida aumenta a 0.79 mW.

## **Recomendaciones.**

- Análisis comparativo de modulaciones digitales híbridas en comunicaciones móviles 4G utilizando el software Riverbed Modeler.
- Implementar modulaciones digitales híbridas en sistemas de comunicaciones inalámbricas utilizando Simulink.

## Bibliografía

- Baraliya, D. K. (2014). Detection of Defects in Structure of fibre by Using Fibre Optic Pressure Sensor. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5(2). <https://www.ijser.org/paper/Detection-of-Defects-in-Structure-of-fibre-by-Using-Fibre.html>
- Cabezas, A. F., & Pinto G., R. A. (2014). *Sistemas de comunicaciones ópticas* [Monografía]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Leuthold, J., & Brès, C.-S. (2015). All-Optical Pulse Shaping for Highest Spectral Efficiency. En S. Wabnitz & B. J. Eggleton (Eds.), *All-Optical Signal Processing* (Vol. 194, pp. 217–260). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-14992-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-14992-9_8)
- Liu, Y., Li, L., Alexandropoulos, G., & Pesavento, M. (2017). Securing Relay Networks with Artificial Noise: An Error Performance-Based Approach. *Entropy*, 19(8), 384. <https://doi.org/10.3390/e19080384>
- Miriampally, V. R. (2016). 2D Optical Fiber Wave Guide Design for Multi Haul Applications. *International Journal of Informatics and Communication Technology (IJ-ICT)*, 5(3), 94. <https://doi.org/10.11591/ijict.v5i3.pp94-105>
- Mondal, P. (2020). *Experimental Investigation of Intermodal Nonlinear Effects in Few-Mode Fibers and Its Application*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31683.02085>
- Moreano M., E. M. (2015). *Diseño y construcción de un módulo de comunicación didáctico mediante fibra óptica y su comparativa con la nueva interfaz (FDDI) como una red rápida de comunicaciones* [Trabajo de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE]. <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/11525>

- Ortiz Lima, C. M. (2010). *Transmisión vía fibra óptica de señales analógicas utilizando subportadora modulada en frecuencia de pulsos: Aplicación potencial en instrumentación y control* [Tesis de Maestría, Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica]. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/573/1/OrtizLCM.pdf>
- Sagar, M. A. K., Dai, B., Chacko, J. V., Weber, J. J., Velten, A., Sanders, S. T., White, J. G., & Eliceiri, K. W. (2019). Optical fiber-based dispersion for spectral discrimination in fluorescence lifetime imaging systems. *Journal of Biomedical Optics*, 25(01), 1. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.25.1.014506>
- Seimetz, M. (2011). Systems with Higher-Order Modulation. En S. Kumar (Ed.), *Impact of Nonlinearities on Fiber Optic Communications* (pp. 177–217). Springer New York. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8139-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8139-4_4)
- Shreyas, S. S., Prabhu, S., & Guruprasad, B. (2016). External modulators and, Electro-optic Mach-Zehnder modulator—Modelling and analysis using Matlab. *International Journal of Advanced Information Science and Technology*, 5(2), 10–19.
- Zhao, J., & Ellis, A. D. (2011). Offset-QAM based coherent WDM for spectral efficiency enhancement. *Optics Express*, 19(15), 14617. <https://doi.org/10.1364/OE.19.014617>
- Zhu, N. H., Shi, Z., Zhang, Z. K., Zhang, Y. M., Zou, C. W., Zhao, Z. P., Liu, Y., Li, W., & Li, M. (2018). Directly Modulated Semiconductor Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24(1), 1–19. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2017.2720959>



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



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

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS** con C.C: # 092051055-9 autor del Trabajo de Titulación: **Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta** 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, 10 de marzo del 2021

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

Nombre: ULLOA FLORENCIA, GUSTAVO ANDRÉS

C.C: 092051055-9

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

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación del sistema de radio sobre fibra utilizando modulación digital mixta		
<b>AUTOR(ES)</b>	Ulloa Florencia, Gustavo Andrés		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	De Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	10 de marzo del 2021	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	49
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Sistemas de Comunicaciones, Comunicaciones Ópticas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Calidad, Factor, Rendimiento, Esquemas, Modulaciones, BER		
<b>RESUMEN/ABSTRACT</b> (150-250 palabras):			
<p>El presente trabajo de titulación consiste en realizar la evaluación del sistema de radio sobre fibra (RoF) utilizando diferentes esquemas de modulación digital convencionales e híbridos a través del software de simulación OptiSystem 7.0, y comparando las métricas de factor Q, tasa de error de bits (BER) y potencia recibida (Rx). En el capítulo 1 se describe las generalidades del trabajo de titulación. En el capítulo 2 se describen los fundamentos teóricos de las comunicaciones por fibra óptica (transmisores ópticos, fibra óptica, atenuación, dispersión y receptores ópticos). En las redes ópticas prospectivas, se pueden emplear de forma selectiva diferentes formatos de modulación dependiendo del tamaño de la red y la configuración del sistema. Por tanto, la conversión de formato óptico es una tecnología fundamental, a la que se ha prestado mucha atención en los últimos años. En el capítulo 3 se presentan 6 escenarios de simulación del sistema RoF utilizando esquemas de modulación convencionales e híbridos sobre OptiSystem. En el mismo capítulo se presentan los resultados obtenidos para las mediciones del factor Q, tasa de error de bits (BER) y potencia recibida.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-82469732	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:gustavoulloaflorencia@gmail.com">gustavoulloaflorencia@gmail.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>			