



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA:

**Análisis comparativo de las variantes de la modulación por  
desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes  
GPON**

AUTOR:

Tene Morocho, Yofre Medardo

Examen Complexivo previo a la obtención del Grado Académico de  
**MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**

TUTOR:

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

Guayaquil, 7 de junio del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Magíster **Tene Morocho, Yofre Medardo** como requerimiento parcial para la obtención del Grado Académico de **MAGÍSTER EN TELECOMUNICACIONES**.

TUTOR

---

M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando

DIRECTOR DEL PROGRAMA

---

M. Sc. Romero Paz, Manuel de Jesús

Guayaquil, 7 de junio del 2021



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Tene Morocho, Yofre Medardo**

**DECLARO QUE:**

El Examen Complexivo “**Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON**”, previa a la obtención del grado Académico de **Magíster en Telecomunicaciones**, ha sido desarrollado, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del Examen Complexivo del Grado Académico en mención.

Guayaquil, 7 de junio del 2021

EL AUTOR

---

Tene Morocho, Yofre Medardo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Tene Morocho, Yofre Medardo**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, la publicación, en la biblioteca de la institución del Examen Complexivo de Maestría titulado: **“Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, 7 de junio del 2021

EL AUTOR

---

Tene Morocho, Yofre Medardo

# REPORTE DE URKUND

The screenshot displays the URKUND interface. On the left, a document summary is provided: **Documento** TI\_MET\_Tene.docx (D104259974), **Presentado** 2021-05-09 07:33 (-05:00), **Presentado por** fernandopm23@hotmail.com, **Recibido** edwin.palacios.ucsg@analysis.orkund.com, and **Mensaje** Revisión Tene Yofre [Mostrar el mensaje completo](#). A yellow highlight indicates that 1% of the 22 pages consist of text from 4 sources. On the right, the 'Lista de fuentes' (List of sources) tab is active, showing a list of documents and URLs. At the bottom, a toolbar includes navigation icons, a warning icon for '1 Advertencias', and buttons for 'Reiniciar', 'Exportar', and 'Compartir'.

Lista de fuentes	Bloques
	<a href="#">Andrea_Molina_Final.docx</a>
	<a href="#">ALBAN_Titulacion.docx</a>
	<a href="#">Jorge_Ortega_TI_2018.docx</a>
	<a href="#">TI - Jimmy Sanchez.docx</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12...">http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/12...</a>
	<a href="http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13...">http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/13...</a>
	Tesis-Final Carlos Leon.pdf
	<a href="https://docplayer.es/83199968-Analisis-de-sistem...">https://docplayer.es/83199968-Analisis-de-sistem...</a>

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL SISTEMA DE POSGRADO MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

TEMA: Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de

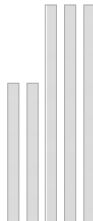
radio sobre fibra en redes GPON

AUTOR: Tene Morocho, Yofre Medardo

Trabajo de Titulación

previo a

la obtención del Grado Académico de Magíster en Telecomunicaciones



## **Dedicatoria**

El presente trabajo se lo dedico a Dios, por darme la vida, la fortaleza y los medios necesarios para estudiar y concluir la presente maestría. A mi querida y recordada madre Teresa, a mi esposa María Eugenia y a todos quienes luchan por un mundo más justo y humano.

Tene Morocho, Yofre Medardo

## **Agradecimientos**

Mi gratitud a todos mis maestros por sus valiosos conocimientos impartidos a lo largo de toda la maestría.

Quiero agradecer también a mis familiares cuya motivación y apoyo siempre ha sido permanente cuando se trata de superarme en el ámbito académico.

Finalmente, un agradecimiento a mis compañeros de maestría por su amistad y por compartir sus valiosas experiencias en el ámbito de las telecomunicaciones

Tene Morocho, Yofre Medardo



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

SISTEMA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN TELECOMUNICACIONES

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

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

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

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

**M. Sc. QUEZADA CALLE, EDGAR RAUL**  
REVISOR

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

**M. Sc. CÓRDOVA RIVADENEIRA, LUIS SILVIO**  
REVISOR

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

**M. Sc. ROMERO PAZ, MANUEL DE JESÚS**  
DIRECTOR DEL PROGRAMA



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
Resumen .....	XV
Abstract.....	XVI
Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.....	17
1.1. Introducción.....	17
1.2. Antecedentes.....	18
1.3. Definición del problema a investigar.....	19
1.4. Objetivos.....	19
1.5. Hipótesis.....	19
1.6. Metodología de investigación.....	19
Capítulo 2: Estado del arte.....	20
2.1. Introducción de fibra óptica.....	20
2.2. Visión general de los principios de transmisión de la fibra óptica...21	
2.2.1. Estructura y funcionamiento de la fibra óptica.....	21
2.2.2. Reflexión, refracción y apertura numérica.....	22
2.3. Tipos de fibra óptica.....	25
2.3.1. Fibra monomodo (SMF).....	25
2.3.2. Fibra multimodo (MMF).....	26
2.4. Pérdidas en las fibras ópticas.....	28
2.4.1. Atenuación.....	28
2.4.2. Dispersión cromática.....	29
2.4.3. Dispersión modal y modo de polarización (PMD).....	31
2.5. Principales características de una fibra óptica.....	32
2.6. Comparación de las fibras monomodo y multimodo.....	33
2.7. ¿Por qué elegir la fibra?.....	34
2.8. Características de un sistema de transmisión óptica.....	34
2.8.1. Esquemas de modulación y detección.....	36
2.8.2. Componentes del sistema de enlaces.....	36

2.8.3.	Dispositivos de modulación .....	37
2.8.4.	Medio de transmisión de fibra óptica .....	38
2.8.5.	Fotodetectores.....	39
2.9.	Red de acceso GPON. ....	39
Capítulo 3:	Diseño, Implementación y resultados .....	42
3.1.	Descripción general de la propuesta de simulación. ....	42
3.2.	Diseño de transmisión bidireccional en sistemas GPON utilizada en radio sobre fibra. ....	43
3.3.	Análisis de los resultados obtenidos.....	46
3.3.1.	Análisis de resultados del escenario 1: modulación PSK. .	46
3.3.2.	Análisis de resultados del escenario 2: modulación DPSK. ....	49
3.3.3.	Análisis de resultados del escenario 3: modulación OQPSK. ....	51
3.4.	Evaluación comparativa de las modulaciones digitales entre los escenarios implementados.....	53
3.5.	Análisis comparativo de los resultados obtenidos con diferentes esquemas de modulación y longitudes de fibra.....	57
Conclusiones	.....	60
Recomendaciones	.....	61
Bibliografía	.....	62

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo 2:

Figura 2. 1: Diagrama funcional de una radio cognitiva (CR). .....	21
Figura 2. 2: Esquema de rayos de incidencia, reflexión y refracción. ....	22
Figura 2. 3: Esquemas de representación de (a) refracción, (b) ángulo crítico y (c) reflexión total interna.....	23
Figura 2. 4: Reflexión interna y propagación de luz en la fibra óptica.....	24
Figura 2. 5: Dimensiones de una fibra monomodo (SMF) con su respectivo perfil del índice de refracción. ....	25
Figura 2. 6: Dimensiones de una fibra multimodo (MMF) con su respectivo perfil del índice de refracción. ....	26
Figura 2. 7: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva. ....	27
Figura 2. 8: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva. ....	27
Figura 2. 9: Curva de atenuación respecto a la longitud de onda para una fibra óptica de sílice estándar. ....	29
Figura 2. 10: Ensanchamiento del pulso debido a la dispersión cromática..	30
Figura 2. 11: Representación esquemática de la dispersión del modo de polarización.....	31
Figura 2. 12: Representación esquemática de un sistema de comunicación óptica. ....	35
Figura 2. 13: Representación esquemática de un sistema de comunicación óptica. ....	38
Figura 2. 14: Estructura de la transmisión en GPON.....	40
Figura 2. 15: Representación las capas de GPON. ....	41

### Capítulo 3:

Figura 3. 1: Representación esquemática del sistema GPON propuesto. ...	43
---	----

Figura 3. 2: Modelado de la red de acceso GPON en el software OptiSystem. .....	44
Figura 3. 3: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 1.....	47
Figura 3. 4: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 1. ....	47
Figura 3. 5: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 1. ....	48
Figura 3. 6: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 2.....	49
Figura 3. 7: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 2. ....	50
Figura 3. 8: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 2. ....	50
Figura 3. 9: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 3.....	52
Figura 3. 10: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 3. ....	52
Figura 3. 11: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 3. ....	53
Figura 3. 12: Tasa de error de bits para el esquema PSK.....	54
Figura 3. 13: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK. ....	55
Figura 3. 14: Tasa de error de bits para el esquema PSK diferencial (DPSK). .....	55
Figura 3. 15: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK diferencial (DPSK).....	56
Figura 3. 16: Tasa de error de bits para el esquema PSK en cuadratura compensada (OQPSK). ....	56
Figura 3. 17: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK en cuadratura compensada (OQPSK). ....	57
Figura 3. 18: Comparativa de los esquemas de modulación en cada escenario de simulación para el canal descendente. ....	58

Figura 3. 19: Comparativa de los esquemas de modulación en cada escenario de simulación para el canal ascendente. .... 59

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 3:

Tabla 3. 1: Parámetros de servicios del sistema WRAN.....	48
Tabla 3. 2: Parámetros de servicios del sistema WRAN.....	51
Tabla 3. 3: Parámetros de servicios del sistema WRAN.....	53

## Resumen

El aumento de la demanda de banda ancha ha llevado a muchos investigadores e investigaciones a encontrar soluciones urgentes y temporales para ayudar a satisfacer las necesidades actuales y futuras. Las comunicaciones por fibra óptica siguen siendo el medio de transmisión de datos que más se utiliza en las telecomunicaciones, seguida de las comunicaciones inalámbricas. Los esquemas de modulación digital, tales como desplazamiento por fase (PSK), frecuencia (FSK), entre otros son abordados en sistemas ópticos. En el presente trabajo se realiza una revisión teórica de la transmisión por fibra óptica y sus características principales que permitieron realizar la propuesta de análisis comparativo del esquema de modulación por desplazamiento de fase estándar y dos variantes DPSK (PSK diferencial) y OQPSK (PSK en cuadratura compensada) utilizado en sistemas de radio sobre fibra en redes óptica pasivas de alta capacidad (GPON). Finalmente, en los sistemas de transmisión/recepción en RoF no solo aumentan el efecto la BER, sino que también incluyen el enlace óptico entre estas ellas, sin embargo, es otro efecto negativo. Para superar esta influencia, se recomienda utilizar una PON.

**Palabras claves:** Comunicaciones, Fibra, Modulaciones, Transmisión, Recepción, Pasiva.

## **Abstract**

The increase in demand for broadband has led many researchers and investigations to find urgent and temporary solutions to help meet current and future needs. Fiber optic communications remains the most widely used data transmission medium in telecommunications, followed by wireless communications. Digital modulation schemes such as phase shift keying (PSK), frequency shift keying (FSK), among others are addressed in optical systems. In the present work, a theoretical review of fiber optic transmission and its main characteristics that allowed the proposal of a comparative analysis of the standard phase shift keying scheme and two variants DPSK (differential PSK) and OQPSK (compensated quadrature PSK) used in radio over fiber systems in Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON) is carried out. Finally, in RoF transmit/receive systems not only increase the BER effect, but also include the optical link between them, however, this is another negative effect. To overcome this influence, it is recommended to use a PON

**Keywords:** Communications, Fiber, Modulations, Transmission, Reception, Passive.



## **Capítulo 1: Generalidades del proyecto de grado.**

### **1.1. Introducción.**

El tráfico de Internet ha experimentado un importante crecimiento debido a las aplicaciones ávidas de ancho de banda, como los juegos en línea, la televisión por Internet, la transmisión de vídeo y las redes sociales en tiempo real. La tendencia no hará más que continuar, exigiendo a la infraestructura de comunicaciones mayor velocidad, mayor capacidad y mayor alcance.

En el pasado se hicieron enormes progresos para mejorar el ancho de banda de las comunicaciones en las redes ópticas. Aunque los avances en la tecnología de comunicación óptica han sido significativos, el diseño de la capa física de la red sigue desempeñando un papel importante en la eficacia de todo el sistema óptico. Un mal diseño de red no sólo supone un mayor coste de despliegue y gestión, sino que también puede infrutilizar todo el potencial de un sistema basado en fibra.

Además, la creciente competencia impulsa la necesidad de prestar servicios con mayor rapidez y de forma rentable. Los costes asociados al diseño y la construcción de nuevas redes son elevados, y la mejora de las redes existentes para proporcionar los servicios necesarios puede ser muy cara. Además, hay que minimizar al máximo las interrupciones derivadas de la construcción de una nueva red o de la modernización de una ya existente. Una red bien planificada es también la clave para minimizar la inversión, mejorar el beneficio medio por usuario conectado y acelerar el retorno de la inversión.(Poon et al., 2013)

Las redes ópticas pasivas con capacidad de gigabit (GPON) se encargan de la primera milla de la infraestructura de comunicación entre las oficinas centrales de los proveedores de servicios y los sitios de los clientes. Con la expansión de los nuevos servicios ofrecidos a través de Internet, se ha facilitado un aumento espectacular del ancho de banda en la red troncal mediante el uso de la multiplexación por división de longitudes de onda

(WDM), que proporciona decenas de gigabits por segundo por longitud de onda. (Bang et al., 2010)

El tráfico inalámbrico actual está dominado por los servicios y aplicaciones multimedia basados en IP, que han provocado una importante carga en las redes de acceso radioeléctrico (*Radio Access Network, RAN*). Aumentar la capacidad del sistema es un remedio sencillo que, sin embargo, podría causar una mala utilización de los equipos y una baja eficiencia energética en las estaciones base (*Base Station, BS*) debido a la alta fluctuación del tráfico y la dinámica de la red. La estricta demanda de calidad de servicio (*Quality of Service, QoS*) deja a las RAN heredadas en una situación incómoda para hacer frente a los escenarios de aplicación previstos en un futuro próximo. (Wang et al., 2019)

## **1.2. Antecedentes.**

La comunicación móvil inalámbrica ha crecido exponencialmente en los últimos años. La fibra óptica ha sido la clave de este extraordinario crecimiento. La técnica de radio sobre fibra (RoF) ha sido la más utilizada para proporcionar mejores servicios móviles inalámbricos en la última milla, ya que ofrece una red de distribución y acceso competente. Tiene muchas ventajas, como una estación maestra centralizada, pequeñas unidades de antena remotas que se conectan a la estación maestra a través de un cable de fibra óptica. Esquemas de asignación de canales de frecuencia remotos y dinámicos en la estación maestra, lo que hace que las unidades de antena remotas sean sencillas y sin complicaciones.

RoF se aplica en diversos ámbitos, ya que las ondas milimétricas y las microondas pueden distribuirse fácilmente a través de la fibra óptica a grandes distancias. El sistema de multiplexación por división de longitudes de onda (WDM) se utiliza para aprovechar todo el ancho de banda de la fibra. Pero el sistema WDM sufre diferentes tipos de deficiencias, como la dispersión, los efectos no lineales, incluida la dispersión Raman estimulada (*Stimulated Raman Scattering, SRS*), la modulación de fase cruzada (*Cross Phase Modulation, XPM*) y la mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing, FWM*), etc.

### **1.3. Definición del problema a investigar.**

Necesidad de implementación de escenarios de simulación de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON utilizando el software OptiSystem.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General:**

Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON

#### **1.4.2. Objetivos específicos:**

- ✓ Describir el estado del arte de la transmisión de datos por fibra óptica y del sistema de comunicación óptico.
- ✓ Diseñar los escenarios de simulación de las variantes de las modulaciones por desplazamiento de fase en sistemas RoF.
- ✓ Analizar los resultados obtenidos de los escenarios de simulación implementados en el software OptiSystem.

### **1.5. Hipótesis**

A través de los escenarios de simulación propuestos se demostrará como el esquema de modulación por desplazamiento de fase (PSK) es el más eficaz para el sistema de radio sobre fibra en redes de acceso GPON utilizando el software OptiSystem.

### **1.6. Metodología de investigación.**

En presente trabajo se utiliza dos métodos de diseño de investigación, el descriptivo y explicativo. Descriptivo porque se describen los fundamentos teóricos o estado del arte de las comunicaciones por fibra óptica. Explicativo porque para cada escenario de simulación se explican los resultados obtenidos. Finalmente, el presente trabaja se utiliza un enfoque cuantitativo ya que se analizan los datos numéricos obtenidos en cada uno de los escenarios de simulación.

## Capítulo 2: Estado del arte.

### 2.1. Introducción de fibra óptica.

Hoy en día, los enlaces de fibra óptica deben soportar redes caracterizadas por velocidades de funcionamiento cada vez mayores y por limitaciones técnicas cada vez más estrictas; por lo tanto, es especialmente importante verificar que los enlaces troncales cumplan con los límites impuestos por las normas de atenuación cada vez más estrictas. La necesidad de contar con más y más capacidad de transporte de datos crece constantemente en paralelo a la evolución y expansión de las aplicaciones de red.

Las velocidades de transmisión cada vez más elevadas requieren estructuras de cableado capaces de soportar mayores anchos de banda. Esta guía de pruebas destaca los requisitos de rendimiento del cableado y describe las mediciones de campo, las técnicas de certificación y resolución de problemas, y las herramientas para garantizar que el cableado de fibra óptica instalado pueda soportar aplicaciones de alta velocidad, como Ethernet a 1 y 10 Gigabits por segundo (Gbps), el canal de fibra y las aplicaciones Ethernet de 40 y 100 Gbps.

Una red de área local (*Local Area Network, LAN*) o red corporativa conecta a usuarios que suelen estar en un radio máximo (2 o 5 km). Incluye tanto el sistema de interconexión dentro de los edificios como el cableado entre ellos, también llamado cableado de "campus". El cableado de fibra óptica se utiliza principalmente para las interconexiones a largas distancias y cuando se requiere un alto rendimiento, mientras que el cableado de par trenzado de cobre se utiliza principalmente para la conexión física del usuario final o de los dispositivos periféricos. El cableado de cobre no puede superar una longitud total de 100 metros. Para distancias más largas, como la red troncal del edificio, se prefiere definitivamente el cableado óptico.

Las fibras ópticas representan un medio de transmisión fiable y económico, pero, debido a la naturaleza del medio y a la necesidad de alinear

perfectamente fibras de muy pequeño diámetro, es muy fácil encontrar problemas técnicos de diversa índole, desde la contaminación de las superficies de los extremos de los conectores hasta daños en los enlaces. En cualquier caso, la identificación de los motivos de los fallos suele ser una actividad que requiere mucho tiempo y recursos.

## 2.2. Visión general de los principios de transmisión de la fibra óptica

En esta sección se presenta la visión general descriptiva de los elementos que conforman la transmisión de la fibra óptica.

### 2.2.1. Estructura y funcionamiento de la fibra óptica.

Un cable de fibra óptica consiste en un conjunto de hilos muy finos de vidrio puro diseñados para transmitir señales luminosas. La figura 2.1 muestra la sección del hilo de vidrio recubierto que es el componente básico de la estructura de muchos cables ópticos. La parte central de la fibra se llama "núcleo". El núcleo es la parte de la fibra que contiene la señal luminosa que se va a transmitir. La capa de vidrio que rodea el núcleo se llama revestimiento. El revestimiento sirve para mantener la luz dentro del núcleo. La capa más externa es el revestimiento primario de la fibra, también llamado "buffer". El tampón, un revestimiento de plástico, proporciona protección y resistencia a la fibra de vidrio.

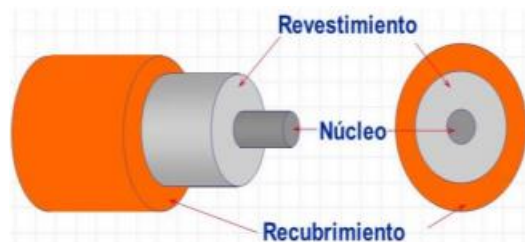


Figura 2. 1: Diagrama funcional de una radio cognitiva (CR).  
Fuente: (Abadía Salamanca, 2017)

Normalmente, el diámetro exterior del revestimiento es de 125  $\mu\text{m}$ . El diámetro del núcleo de las fibras ópticas que se utilizan habitualmente en la infraestructura de edificios puede ser de 62.5, 50 o 9  $\mu\text{m}$ . Los diámetros mayores 62.5 y 50  $\mu\text{m}$  identifican fibras de tipo multimodo; y las fibras monomodo se caracterizan por un diámetro de núcleo nominal más pequeño, igual a aproximadamente 9  $\mu\text{m}$ .

### 2.2.2. Reflexión, refracción y apertura numérica.

El campo de las comunicaciones por fibra óptica se ha disparado en las últimas dos décadas: de hecho, la fibra se basa en el principio de reflexión interna total que tiene un haz de luz, entrando en una fibra de vidrio según una dirección que forma un pequeño ángulo con el eje de la fibra, experimenta su propagación cada vez que alcanza la interfaz vidrio-aire. El número de reflexiones totales, sin embargo, depende del ángulo entre el rayo incidente y el eje de la fibra y del uso de la fibra en una trayectoria recta o no. Dado que en una fibra que no esté perfectamente limpia y lisa habría una pérdida de energía nada despreciable en cada reflexión, las fibras ópticas se fabrican siempre a partir de dos vidrios de diferente índice de refracción. El vidrio de índice más alto, que forma el núcleo de la fibra y propaga la radiación, está recubierto con el vidrio de índice más bajo.

La figura 2.2 muestra el esquema de rayos estudiada en la naturaleza y propagación de la luz (Young & Freedman, 2018). Un rayo de luz que incide en una superficie de interfaz entre dos medios de índices diferentes ( $n_a > n_b$ ) se refleja en parte y se refracta (transmite) en parte, de acuerdo con la conocida ley de Snell (o ley de los senos):

$$n_a \sin \theta_a = n_b \sin \theta_b$$

Donde,  $n_a$  y  $n_b$  representan los índices de refracción del medio a y b,  $\theta_a$  representa al ángulo incidente del rayo con respecto a la normal a la superficie de incidencia, y  $\theta_b$  representa al ángulo refractado con respecto a la normal en el segundo medio (b).

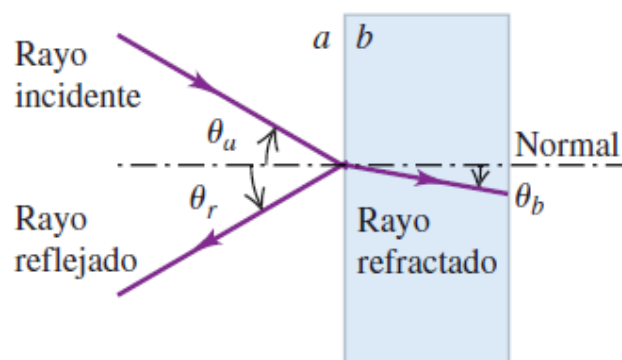


Figura 2. 2: Esquema de rayos de incidencia, reflexión y refracción.  
Fuente: (Young & Freedman, 2018)

Un valor alto del índice de refracción  $n$  de un material indica que la luz en ese material viaja más lentamente. Se puede deducir, por ejemplo, que la luz viaja más rápido en el aire que en el agua. Por ejemplo, el núcleo de una fibra óptica tiene un índice de refracción más alto que el del revestimiento. La figura 2.3 (a) muestra como el haz de luz ingresa a otro medio más denso ( $n_2$ ) cambiando de dirección, a esto se llama refracción debida a la ley de Snell. La figura 2.3 (b) muestra como el haz de luz se propaga a lo largo de la frontera (división entre los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ ) para lo cual el ángulo incidente es igual al ángulo crítico.

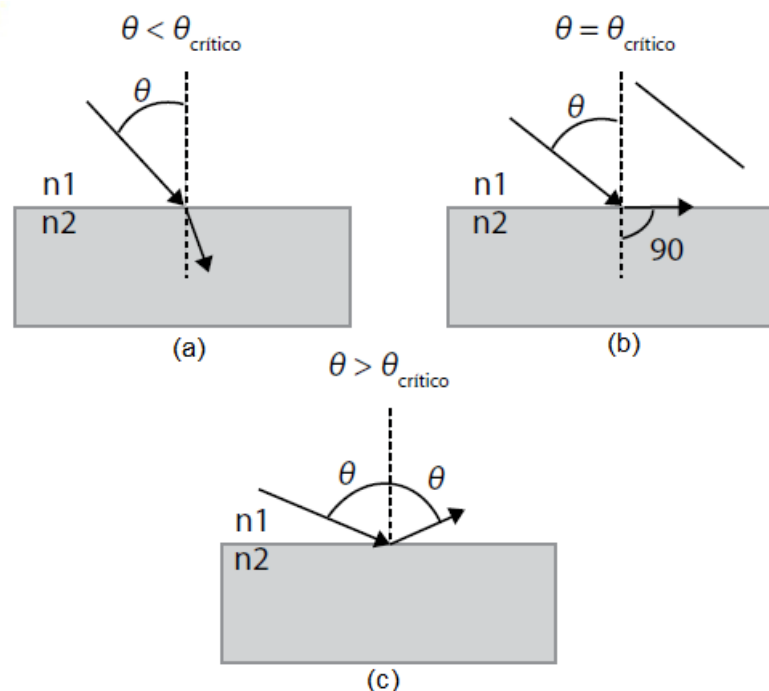


Figura 2. 3: Esquemas de representación de (a) refracción, (b) ángulo crítico y (c) reflexión total interna.

Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

La luz que incide en la superficie de separación entre el núcleo y el revestimiento, si  $\theta > \theta_{crítico}$ , entonces se refleja y continúa propagándose dentro del núcleo, tal como se muestra en la figura 2.4. Este principio físico de reflexión total es la base del funcionamiento de una fibra óptica. La transmisión de luz a través de una fibra se basa, por tanto, en el fenómeno de reflexión interna total (véase la figura 2.3 (c)) que se produce cuando la luz incide de forma oblicua en la interfaz entre dos medios con diferente índice de refracción, con un ángulo menor que el ángulo crítico. El ángulo crítico depende del índice de refracción de los dos medios, en este caso del índice

de refracción del vidrio que forma el núcleo y del vidrio de revestimiento. El índice de refracción del núcleo es típicamente de aproximadamente 1.47, mientras que el índice de refracción del revestimiento es de aproximadamente 1.45.

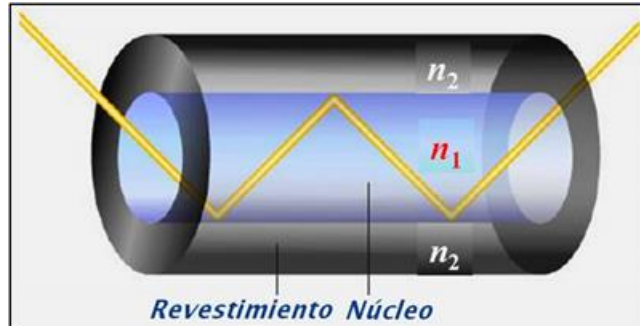


Figura 2. 4: Reflexión interna y propagación de luz en la fibra óptica.  
Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

La figura 2.5 muestra el posicionamiento de la fuente de luz para que los haces de luz ingresen por el cono de aceptación imaginario. Para que el radio genérico afecte siempre a la discontinuidad entre núcleo y revestimiento, con un ángulo mayor que el valor crítico, es necesario que se introduzca en un extremo óptico dentro de un cierto ángulo de aceptación de la fibra (que siempre puede ser obtenido usando la ley de Snell):

$$\theta = \sqrt{\frac{(n_2^2 - n_1^2)}{n_0}}$$

donde  $n_0$  es el índice de refracción del medio externo. Cualquier rayo inyectado en la fibra fuera del cono de aceptación afectará entonces a la separación núcleo-revestimiento con un ángulo menor que el valor crítico y, por lo tanto, se perderá en el manto como resultado de la refracción. Una cantidad simple que se usa con mucha frecuencia es la apertura numérica definida como:

$$NA = \sqrt{n_2^2 - n_1^2}$$

y su valor suele variar entre 0.1 y 0.3.



### 2.3. Tipos de fibra óptica.

Existen varios tipos de fibras ópticas, pero la tendencia es minimizar el número para facilitar la instalación y el mantenimiento y reducir los costos de producción, sin embargo, se pueden clasificar en: (1) fibras monomodo (*Single Mode Fiber, SMF*), y (2) fibras multimodo (*Multi Mode Fiber, MMF*).

#### 2.3.1. Fibra monomodo (SMF)

Las fibras monomodo tienen un perfil constante en el núcleo, cuyo diámetro es muy pequeño (alrededor de 4-10  $\mu\text{m}$ ), y decrece abruptamente con un escalón en el revestimiento donde aún permanece constante. El diámetro del revestimiento es generalmente de 125  $\mu\text{m}$  y el término "monomodo" deriva del hecho de que el rayo en el interior se propaga de una sola manera porque se ve obligado, por el diámetro muy pequeño del núcleo, a propagarse casi en paralelo al eje de la fibra. Para cuantificar qué tan pequeño debe ser el diámetro "d" del núcleo para obtener una fibra monomodo, se usa la relación:

$$d = 0.76 \frac{\lambda}{NA}$$

donde,  $\lambda$  es la longitud de onda y NA es la apertura numérica. La figura 2.5 muestra una fibra monomodo juntamente con el perfil del índice de refracción.

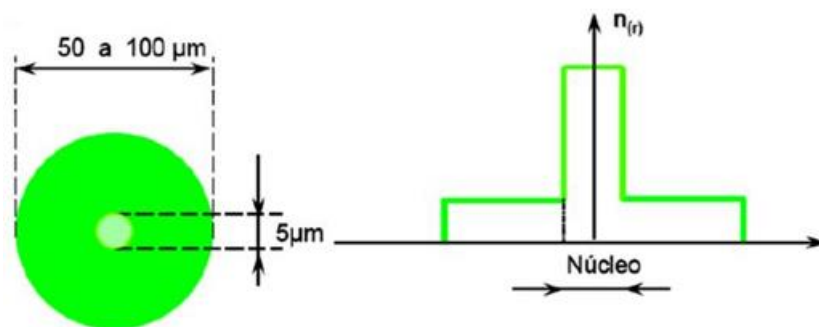


Figura 2. 5: Dimensiones de una fibra monomodo (SMF) con su respectivo perfil del índice de refracción.

Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

Las fibras monomodo se utilizan ampliamente en las telecomunicaciones por las siguientes ventajas:

- a. Larga vida útil;

- b. ausencia de dispersión;
- c. mínima pérdida de potencia óptica;
- d. baja atenuación;
- e. ancho de banda;

Por otro lado, las desventajas se limitan básicamente a dos puntos:

- a. problemas de conexión debido al reducido diámetro del núcleo (pérdidas por desalineación lateral);
- b. alta potencia óptica requerida.

### 2.3.2. Fibra multimodo (MMF)

Este tipo de fibras se diferencian de las anteriores en primer lugar por su mayor tamaño: el diámetro del núcleo es entre 50-80  $\mu\text{m}$  y el del revestimiento de 100-200  $\mu\text{m}$ , tal como se muestra en la figura 2.6. Dependiendo del índice de refracción, la fibra puede ser de índice escalonado (véase la figura 2.7) o de índice graduado (véase la figura 2.8). En las fibras escalonadas el índice de refracción es constante en todo el núcleo y disminuye bruscamente en el revestimiento, como sucede en el caso de las fibras monomodo. A diferencia de estas últimas, en estas fibras la dispersión modal es muy evidente y por ello no se utilizan en telecomunicaciones.

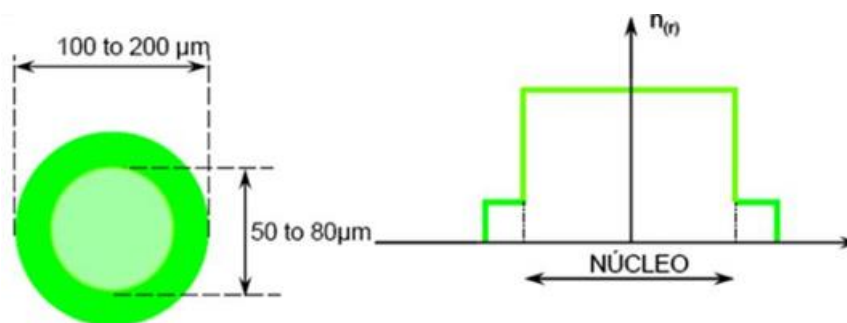


Figura 2. 6: Dimensiones de una fibra multimodo (MMF) con su respectivo perfil del índice de refracción.

Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

De hecho, incluso los rayos de luz con la misma longitud de onda e introducidos en la fibra con un ángulo de incidencia diferente (inferior al ángulo de aceptación) se propagan con la misma velocidad dentro de la fibra, pero a través de trayectorias en zigzag de longitudes diferentes. Por lo tanto, llegan a su destino en momentos diferentes produciendo un ensanchamiento

temporal del pulso de luz transmitido. En las fibras con un perfil gradual, el índice de refracción disminuye gradualmente desde el centro del núcleo hasta la región de separación entre el núcleo y el revestimiento.

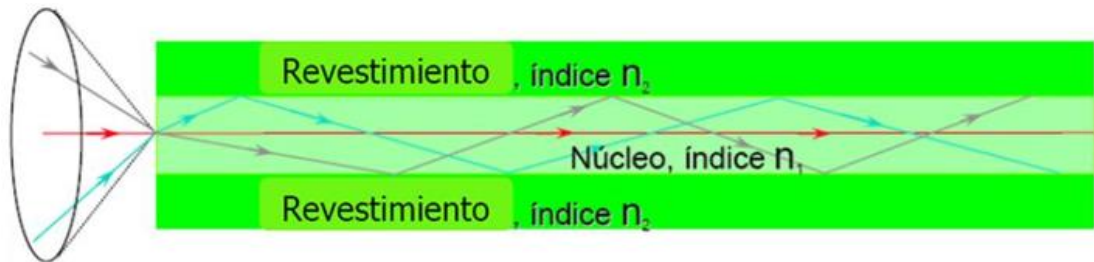


Figura 2. 7: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva.  
Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

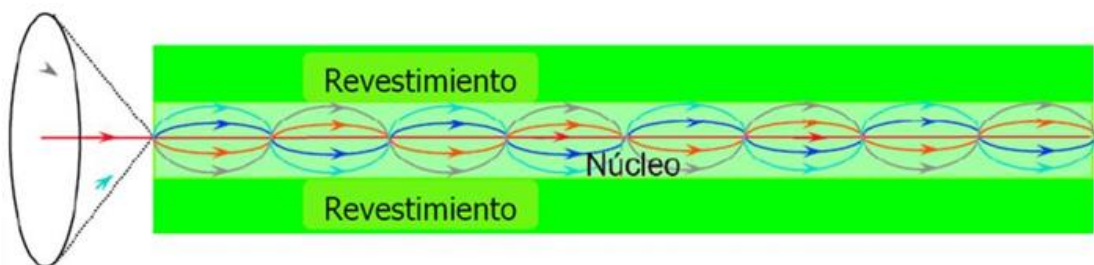


Figura 2. 8: Detección cooperativa del espectro en redes de radio cognitiva.  
Fuente: (Coimbra Gutiérrez, 2020)

La ventaja de las fibras de índice graduado es que los rayos que se acercan al revestimiento atraviesan un medio con un índice de refracción gradualmente decreciente y tienen una mayor velocidad que los rayos que recorren un camino más corto, como los horizontales al eje de la fibra. De este modo, todos los rayos del impulso luminoso llegan casi simultáneamente, limitando así la dispersión modal.

El número de modos de propagación  $M$  para una fibra multimodo puede evaluarse con la siguiente fórmula aproximada, válida si  $M \gg 1$ :

$$M = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \cdot d \cdot NA}{\lambda} \right)^2$$

donde  $d$  es el diámetro del núcleo,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación utilizada y  $NA$  es la apertura numérica de la fibra. Las fibras multimodo se utilizan para distancias muy cortas (<10 km) debido a las importantes ventajas de las fibras monomodo.

Finalmente, la fibra multimodo (MMF) es una opción adecuada para las conexiones de fibra óptica de corto alcance. Varias aplicaciones necesitan soluciones rentables, por ejemplo, la distribución de señales de radio inalámbricas en redes celulares móviles. En estas conexiones se pueden aplicar las MMF. Debido a la pequeña atenuación de la fibra, la pérdida en la red de distribución es baja. Otras ventajas son la inmunidad a las interferencias electromagnéticas y la alta capacidad de la fibra óptica. (Cseh & Berceci, 2014)

## **2.4. Pérdidas en las fibras ópticas.**

Las pérdidas causadas por las fibras ópticas pueden clasificarse en las que deforman la señal de entrada y las que provocan su atenuación. El estudio de las características de las fibras ópticas es muy importante porque determina la capacidad del canal de transmisión y la distancia máxima que se puede cubrir entre el emisor y el receptor sin necesidad de utilizar repetidores.

### **2.4.1. Atenuación.**

La relación entre la potencia óptica transmitida y la recibida, tras una longitud de fibra de referencia, define la atenuación de la propia fibra, que es función de la longitud de onda, del tipo de fibra y de las tensiones mecánicas que actúan sobre la fibra. Se suele distinguir entre causas intrínsecas y extrínsecas de atenuación: las primeras son inherentes a la estructura fundamental del material y no pueden eliminarse, las segundas, en cambio, pueden atribuirse a la presencia de impurezas y reducirse perfeccionando el proceso de producción. El coeficiente de atenuación  $\alpha$  se mide en decibelios y puede expresarse como:

$$\alpha = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{in}}{P_{out}} \right)$$

Así, por ejemplo, si una fibra tiene una atenuación igual a 1 dB/km, entonces 10 Vatios de potencia óptica introducidos en un tramo de fibra de 1 km de longitud darán un valor de salida de 7.9 Vatios. Las primeras fibras fabricadas se caracterizaban por un coeficiente  $\alpha$  de unos 1000 dB/km y, por tanto, no permitían su uso práctico.

En 1970, la empresa estadounidense Corning Inc. desarrolló un sistema de fabricación (OVD) que permitía producir fibras ópticas con  $\alpha = 20 \text{ dB/km}$  cuando  $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ . Actualmente, para las fibras convencionales de material de vidrio, se consigue  $\alpha = 0.15 \text{ dB/km}$  cuando  $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$  para una fibra monomodo. A partir de estas pocas líneas se puede adivinar que el coeficiente  $\alpha$  depende de la longitud de onda  $\lambda$ , incluso fuertemente, para lo cual se ha obtenido experimentalmente la tendencia de la figura 2.9, donde un mínimo absoluto en torno a  $1.55 \mu\text{m}$

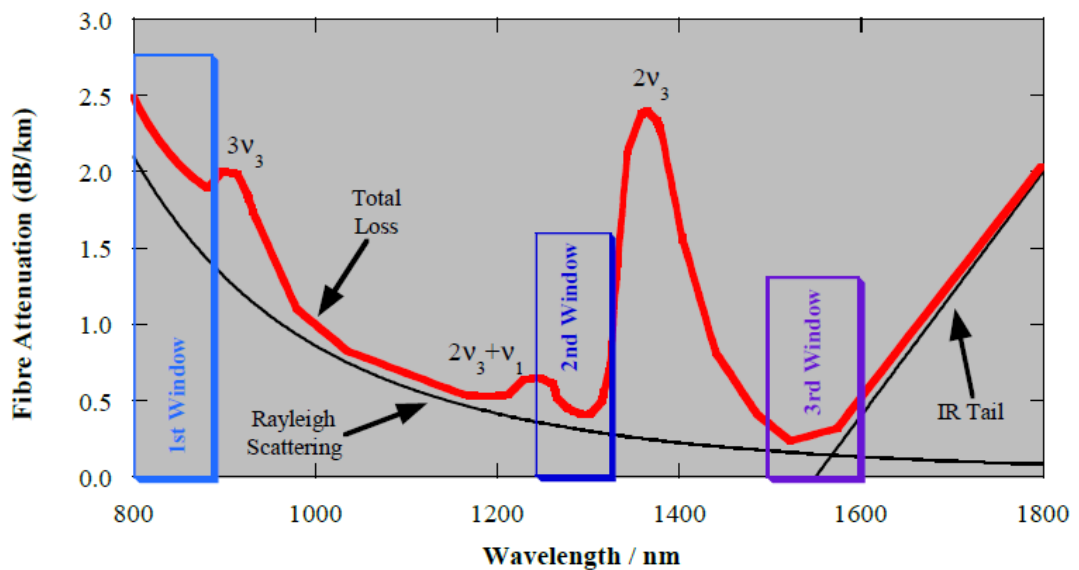


Figura 2. 9: Curva de atenuación respecto a la longitud de onda para una fibra óptica de sílice estándar.

Fuente: (Harrison et al., 2000)

También hay que tener en cuenta la atenuación introducida por los conectores y empalmes: debe ser comparable a la bajísima atenuación de las fibras ópticas. Un conector correctamente instalado introduce una atenuación de entre 0.3 y 0.7 dB. Valores similares se aplican a un empalme (0.1 a 0.3 dB).

#### 2.4.2. Dispersión cromática.

Una limitación de los primeros sistemas de comunicación óptica era la "dispersión cromática", es decir, la variación de la velocidad de grupo de la luz en función de la frecuencia. En las fibras ópticas, el efecto global se debe tanto a la dispersión del material como a la causada por la estructura de guiado. La dispersión del material surge de la dependencia del índice de refracción de la

longitud de onda. Por lo tanto, es inherente al tipo de material utilizado para la fibra.

La dispersión de la guía surge del hecho de que las propiedades de la guía también dependen de su tamaño con respecto a la longitud de onda. Además, el pequeño tamaño del núcleo permite el transporte de una parte de la potencia óptica también en el revestimiento, que sin embargo tiene un índice de refracción más bajo.

Estos dos tipos de dispersión pueden tener un signo positivo o negativo y cuando se suman constituyen la llamada dispersión cromática (medida en ps·nm/km). Mientras que en las fibras más antiguas (de índice escalonado) predomina la primera contribución, las versiones más recientes se caracterizan por una importante contribución de la guía de ondas que cambia radicalmente la curva de dispersión. Este fenómeno provoca problemas importantes en cuanto la tasa de dígitos del sistema y/o su longitud total son elevadas.

De hecho, es posible demostrar matemáticamente que cuanto más corto es un pulso, más amplio es el espectro de frecuencias que ocupa y, por tanto, mayor es la variación de la velocidad de los componentes espectrales individuales en una guía de ondas dispersiva. El primer efecto observable es el progresivo ensanchamiento temporal del pulso, que puede causar importantes dificultades debido a su interferencia con los pulsos vecinos. La figura 2.10 muestra un ejemplo de como la señal original sufre un ensanchamiento de la señal debida a la dispersión cromática.

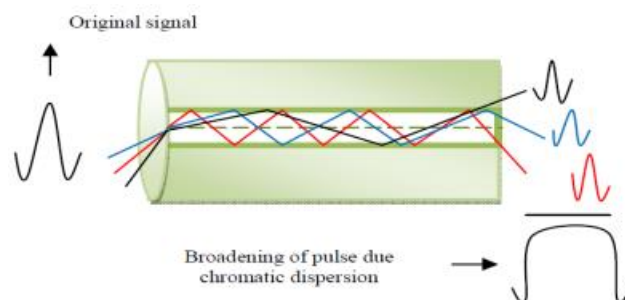


Figura 2. 10: Ensanchamiento del pulso debido a la dispersión cromática.  
Fuente: (Vishwakarma & Ghosh, 2018)

### 2.4.3. Dispersión modal y modo de polarización (PMD).

La dispersión, como ya se ha mencionado, se genera porque la luz en un pulso no viaja toda a la misma velocidad. Por lo tanto, se puede distinguir otros dos tipos diferentes de dispersión, a saber, modal y por polarización de modo. La dispersión modal se produce en las fibras que transmiten más de un modo, ya que cada modo tiene una velocidad característica. Se cuantifica en ns/km. El efecto es mayor en las fibras multimodo de índice escalonado que en las fibras multimodo de índice gradual, mientras que no se produce en absoluto en las fibras monomodo.

La dispersión por polarización de modo tiene un efecto muy pequeño y surge de las ligeras diferencias en el índice de refracción debido a las diferentes polarizaciones que cruzan una fibra monomodo. Por ejemplo, la detección coherente es la capacidad de compensar la dispersión del modo de polarización (*Polarization Mode Dispersion, PMD*), que ha sido un efecto limitante para la transmisión de alta velocidad de bits con detección directa.

La birrefringencia de la fibra de transmisión no sólo da lugar a diferentes velocidades de fase para los modos de polarización ortogonales (y, por tanto, a la evolución de la polarización), sino que, junto con la dependencia de la frecuencia del índice de refracción, también provoca una diferencia en la velocidad de grupo. Esto se denomina PMD y da lugar a un ensanchamiento temporal de la señal, como se representa esquemáticamente en la figura 2.11. (Cai et al., 2013)

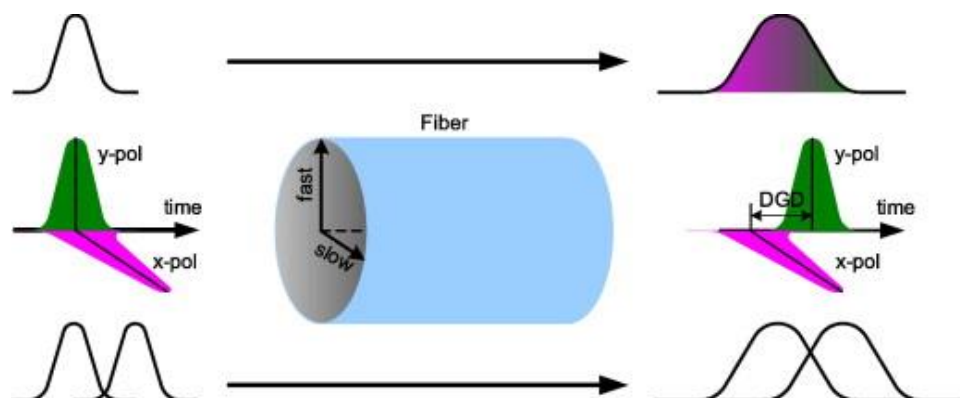


Figura 2. 11: Representación esquemática de la dispersión del modo de polarización.

Fuente: (Cai et al., 2013)

## **2.5. Principales características de una fibra óptica.**

Algunas de las principales características de una fibra son: el material utilizado para el núcleo y el revestimiento, los respectivos diámetros e índices de refracción, la apertura numérica, los coeficientes de expansión térmica, los límites de tensión térmica, química y mecánica, el índice de atenuación (en función de la longitud de onda), la longitud disponible.

Como ya se ha dicho, en general se intenta reducir al máximo el diámetro del núcleo, pero esto tiene un gran inconveniente: cuanto menor es el diámetro, más difícil es inyectar la potencia óptica. A continuación, se define una cantidad adecuada denominada "eficiencia de inyección": se entiende como la relación entre la potencia realmente transportada al núcleo y la potencia total producida. Como no toda la energía producida se envía al núcleo, sino que una parte se pierde en el revestimiento, esta eficiencia sólo puede ser inferior a 1.

A veces es preferible caracterizar los parámetros dimensionales de las fibras monomodo mediante propiedades relacionadas con la propagación, en lugar de cantidades óptico-geométricas (como el radio del núcleo). La ventaja de esta elección es doble: los parámetros así definidos son más fáciles de evaluar y, además, permiten una aplicación inmediata en la predicción de los rendimientos de transmisión (pérdidas de acoplamiento y de flexión, dispersión de guía, etc.). En particular, es útil disponer de un parámetro que defina, con su valor, la distribución de la amplitud del campo en el núcleo y el revestimiento de la fibra.

En una fibra monomodo, la relación entre el radio del núcleo y la longitud de onda de funcionamiento es pequeña; entonces, la diferencia entre el índice de refracción del núcleo y el de la envoltura es también muy pequeña, por lo que el efecto de confinamiento de la luz en el núcleo es limitado (se habla de guiado débil) y, en consecuencia, la distribución de la potencia óptica en la fibra también afecta a la envoltura. Por esta razón, el valor del diámetro del núcleo no es suficiente para definir la región en la que está confinada la luz; se utiliza entonces un parámetro adicional llamado "diámetro del campo de



modo" (MFD) que, en principio, define el tamaño de la región en la que está contenida la mayor parte de la energía luminosa que atraviesa una determinada sección. energía que pasa por una determinada sección.

## **2.6. Comparación de las fibras monomodo y multimodo**

Las fibras monomodo son guías de onda que sólo pueden propagar una configuración de campo: el modo fundamental HE<sub>11</sub> o LP<sub>01</sub>. Su ventaja más evidente sobre las fibras multimodo es, por tanto, la ausencia de dispersión modal. Esto puede dar lugar a enormes capacidades de transmisión, con bandas transmisibles de varios miles de GHz.

También en lo que respecta a la atenuación, las fibras monomodo son mejores que las fibras multimodo; de hecho, como se requiere una apertura numérica menor y un núcleo más pequeño, se necesita menos dopaje de las capas internas durante la fabricación. Esto significa, en general, que hay menos pérdidas, no sólo porque el dopante puede introducir una atenuación adicional, sino también porque el medio de transmisión es más uniforme en su conjunto, lo que reduce el fenómeno de la difusión (debido a la inhomogeneidad a muy pequeña escala).

Otra ventaja, sobre todo desde el punto de vista del diseño del sistema, es que todos los parámetros de transmisión se determinan de forma inequívoca. No existe, como en el caso de las fibras multimodo, una incertidumbre derivada de las diferentes condiciones de excitación de los distintos modos, o de los fenómenos de conversión de modo que pueden cambiar la tendencia de la distorsión de los pulsos en función de la longitud de la fibra de forma no siempre predecible. En el caso de las fibras monomodo, esta tendencia es siempre lineal.

A todas estas ventajas hay que añadir la no indiferente de un coste potencialmente menor, ya que la fabricación es más rápida y no requiere un control preciso sobre el perfil del índice de refracción, como en el caso de las fibras multimodo. perfil de índice de refracción, como en el caso de las fibras multimodo.

Sin embargo, también hay algunos inconvenientes, sobre todo debido al pequeño tamaño del núcleo de la fibra (diámetro de 4-10  $\mu\text{m}$ ) y a la escasa diferencia de índice de refracción entre el núcleo y la cubierta. De hecho, esto conduce a mayores problemas en la realización de uniones y conectores entre fibras. El desarrollo de máquinas automáticas ha resuelto prácticamente el problema: ahora es posible realizar uniones y conectores que garanticen alineaciones con una precisión inferior a una micra, cumpliendo así las estrictas tolerancias para este tipo de fibra.

## **2.7. ¿Por qué elegir la fibra?**

La elección de la fibra óptica se hace necesaria por sus innumerables ventajas, a saber:

- a. Capacidades de transmisión extremadamente altas (decenas de Gbit/s y más)
- b. Cableado ligero y de pequeña sección.
- c. Atenuación muy pequeña y no proporcional a la raíz de la frecuencia como en los cables de cobre.
- d. Inmunidad total a las interferencias electromagnéticas.
- e. Ausencia de perturbaciones electromagnéticas generadas y, por tanto, ausencia de fenómenos de diafonía.
- f. Seguridad de la información transmitida, ya que no puede ser interceptada.
- g. Etapas de regeneración muy grandes (unos 180Km).
- h. Posibilidad de amplificar la señal directamente en modo óptico.

Por supuesto, también hay desventajas como:

- a. Coste relativamente alto de los cables, pero sobre todo de las interfaces de transmisión y recepción.
- b. Dificultad en las operaciones de empalme y enrutamiento de cables.

## **2.8. Características de un sistema de transmisión óptica**

Un sistema de transmisión óptica en su forma más simple consiste en un dispositivo de modulación y un fotodetector, conectados por una fibra óptica, tal como se muestra en la figura 2.12. Una señal de alta frecuencia o de

microondas es convertida en una señal óptica por el dispositivo de modulación; tras la transmisión o distribución, la señal óptica es convertida de nuevo en el dominio eléctrico por el fotodetector. (Upadhyay et al., 2014)

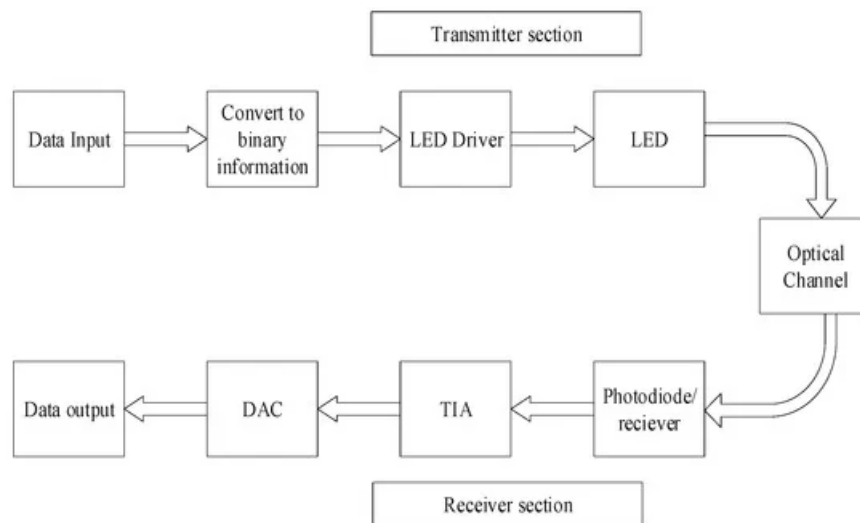


Figura 2. 12: Representación esquemática de un sistema de comunicación óptica.

Fuente: (Aggarwal et al., 2019)

La principal ventaja de la transmisión en formato óptico proviene de las bajísimas pérdidas de propagación, que pueden ser de hasta 0.2 dB/km en la longitud de onda óptica de 1550 nm. Si la transmisión o distribución de la señal se realiza en el dominio eléctrico con un cable coaxial, la pérdida será extremadamente alta y aumenta con la frecuencia de la señal. Por ejemplo, un cable coaxial de bajas pérdidas tiene una atenuación de 190 dB/km a la frecuencia de 5.8 GHz, mientras que la pérdida de un cable común (RG214) es de superior a 500 dB/km.

Aunque las pérdidas de propagación en este tipo de enlaces de fibra son bajas, las conversiones de eléctrico a óptico (E/O) y viceversa (O/E) contribuyen a aumentar las pérdidas, ya que estas conversiones provocan ruido añadido y distorsiones no lineales. El enlace que se quiere realizar debe requerir linealidad y bajo ruido, para que las señales analógicas puedan transmitirse con alta fidelidad: de hecho, si el sistema está optimizado, se producen pérdidas que conducen a un mejor rendimiento que las relacionadas con las conexiones basadas en cables coaxiales. Por lo tanto, el diseño y el estudio del rendimiento para optimizar dicho enlace son de importancia

primordial, con el fin de garantizar la aplicabilidad de dichos enlaces en varios sistemas fotónicos.

### **2.8.1. Esquemas de modulación y detección**

En general, una señal de radiofrecuencia o de microondas puede viajar por un enlace óptico analógico modulando la intensidad, la fase o la frecuencia de la portadora óptica. En cuanto al sistema de recepción, se pueden implementar dos modos de detección: la detección directa, que funciona con modulación de intensidad, y la detección coherente, que funciona con modulaciones de fase o de frecuencia.

Debido a su simplicidad, la modulación de intensidad combinada con la detección directa (IMDD) es, con mucho, la técnica más popular y utilizada. También se pueden utilizar esquemas de modulación externos. En el caso de la modulación directa, la corriente de inyección del láser es modulada directamente por la señal de radiofrecuencia y la información se imprime en la intensidad de la luz de salida del láser.

En cambio, en un enlace modulado externamente, el láser funciona en modo de onda continua (CW) y la modulación se realiza mediante un modulador óptico externo. Disponer de un enlace de señal directamente modulado tiene la ventaja de una mayor simplicidad y un menor coste. Para aplicaciones de alta frecuencia y alto rendimiento, el enlace modulado externamente es más común porque la modulación directa está limitada en frecuencia por el chirp, es decir, hay una modulación de frecuencia no intencionada en una señal modulada en intensidad que inducirá un ensanchamiento del pulso

### **2.8.2. Componentes del sistema de enlaces**

Uno de los aspectos más importantes del enlace óptico es la selección de componentes, que se dividen en tres categorías principales: diodos láser (fuentes de luz), moduladores ópticos y fotodetectores. Para transmitir señales de alta frecuencia con alta fidelidad es necesario que los diodos láser tengan

altas características en términos de ancho de banda para modulaciones altas, alta eficiencia, alta linealidad y bajo ruido.

La eficiencia de un láser describe la conversión de la modulación eléctrica a la óptica. modulación y se mide en Vatios/Amperios [W/A]. La intensidad del ruido láser se describe generalmente por una cantidad llamada intensidad de ruido relativa (*Relative Intensity Noise, RIN*), que es la varianza de las fluctuaciones de la potencia óptica con respecto al cuadrado de la potencia óptica media, comúnmente expresada en dB/Hz.

La mayoría de los diodos láser utilizados en el campo de la fotónica son de tipo borde o láseres Fabry-Perot (FP) o de retroalimentación distribuida (DFB). En cuanto a la modulación externa, las características deseadas de la fuente láser de onda continua (CW) son una alta eficiencia y una baja potencia óptica. En este caso el rendimiento del enlace mejora a medida que aumenta la potencia óptica de entrada al modulador.

### **2.8.3. Dispositivos de modulación**

El tipo más común de modulador óptico externo es el modulador Mach-Zehnder (MZM) cuyo principio de funcionamiento se muestra en la figura 2.13. Un voltaje aplicado a los electrodos del MZM (comúnmente fabricado de Niobato de Litio) inducirá un cambio en el índice de refracción en uno o ambos caminos del modulador y este cambio en el índice de refracción creará un cambio de fase óptica entre los dos caminos. Si no hay desplazamiento de fase, las guías de ondas están diseñadas para que la luz a lo largo de las trayectorias ascendentes y descendentes interfiera de forma constructiva, lo que resulta en una potencia máxima. Cuando la tensión aplicada induce un desplazamiento de fase  $\pi$  (180 grados) entre las trayectorias, la luz interfiere de forma destructiva dando una potencia mínima. Esta tensión es conocido como voltaje de media onda.

Los cambios continuos de tensión producirán las conocidas características de transferencia sinusoidal del MZM. En su modo de funcionamiento más común, el MZM se polariza en el punto de cuadratura

(Quadrature bias), que es la mitad de la tensión de la primera media onda y la tensión del modulador de RF. Las características deseadas de un MZM para conseguir una alta eficiencia son una baja tensión de RF  $V_{\pi,RF}$ , un alto manejo de la potencia óptica, una baja pérdida de inserción y un ancho de banda: la pérdida de inserción típica de este tipo de dispositivos es de 3 a 7 dB.

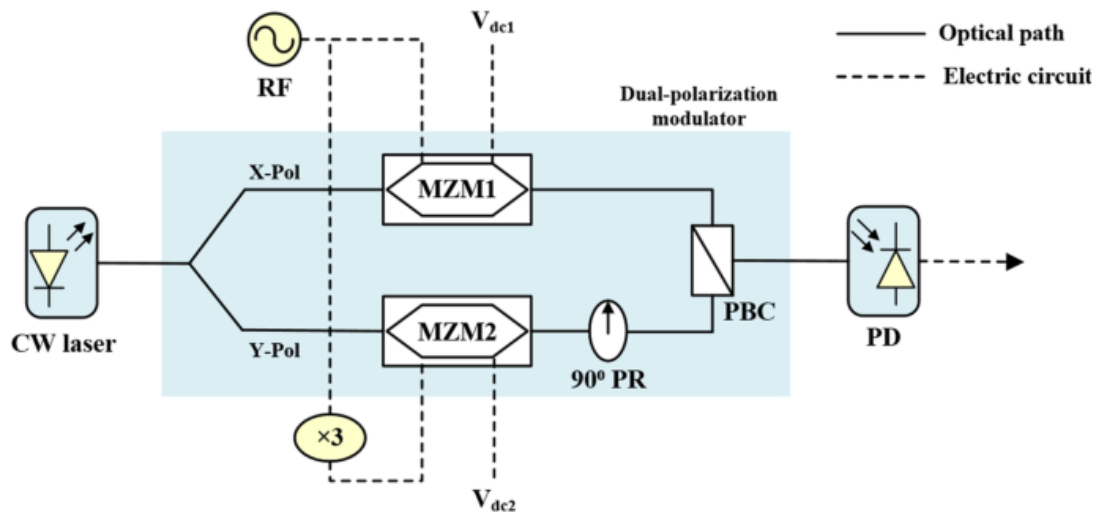


Figura 2. 13: Representación esquemática de un sistema de comunicación óptica.  
Fuente: (Aggarwal et al., 2019)

En cuanto a  $V_{\pi,RF}$ , el valor deseado es inferior a 1 V y este valor puede obtenerse a expensas del ancho de banda de modulación: los valores típicos son 1.15 V a una frecuencia de 2 GHz y 1.33 V a una frecuencia de 12 GHz.

#### 2.8.4. Medio de transmisión de fibra óptica

La mayoría de las veces, en distancias cortas, la fibra óptica que conecta el dispositivo de modulación y el fotodetector puede considerarse ideal, desde el punto de vista de la atenuación, la dispersión y la no linealidad. En cambio, en el caso de los enlaces largos, en los que la distancia de transmisión puede alcanzar decenas de kilómetros, para las fibras monomodo la pérdida para esta distancia de transmisión debida a la atenuación de la fibra es inferior a 0.2 dB en el de longitud de onda de 1550 nm (véase la figura 2.9). De este modo, la atenuación es insignificante. Esto también es cierto para el efecto de dispersión cromática, es decir, el cambio en la velocidad de propagación al cambiar las frecuencias de trabajo de la fibra.

Se ha demostrado que para una fibra monomodo con una dispersión cromática de 17 ps /km-nm y una longitud de 1 km, la relación a señal a ruido (SNR) debida a la dispersión de la fibra para una frecuencia de señal de 30 GHz es inferior a 1 dB. El efecto es aún menos perceptible si la señal trabaja a bajas frecuencias y por ello se desprecian los efectos de las dispersiones cromáticas en las fibras ópticas.

#### **2.8.5. Fotodetectores**

Los fotodetectores son dispositivos que producen una corriente eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación luminosa que incide en su zona activa. El funcionamiento de los detectores de señales ópticas se basa en el mecanismo de absorción de la radiación electromagnética por la materia; a continuación, se analiza los fotodetectores más utilizados, es decir, los fotodiodos PIN.

Cada fotón que incide en una porción de un semiconductor intrínseco es, teóricamente, absorbido produciendo un par electrón-hueco en el material que, bajo la acción de un campo eléctrico externo, contribuye a la corriente de fotoconducción. Cada tipo de detector fotoconductor requiere, para detectar la presencia de radiación luminosa, la presencia de una polarización externa y, en particular, en ausencia de radiación incidente la corriente en el circuito externo es prácticamente nula dado el bajo valor de conductividad del semiconductor intrínseco.

Por otro lado, en presencia de una radiación incidente con potencia óptica útil  $P$ , el número de portadores generados por la absorción puede ser significativo y la corriente puede asumir valores apreciables, provocando una gran caída de tensión en de una resistencia de polarización colocada en el circuito externo.

#### **2.9. Red de acceso GPON.**

Impulsado por el rápido desarrollo de los servicios, el aumento constante del número de usuarios finales y las deficiencias descritas de las BPON, el grupo FSAN inició en 2001 un nuevo esfuerzo para estandarizar las redes

ópticas pasivas (PON) que funcionan a velocidades binarias superiores a 1 Gbps. Sin embargo, el apoyo a una mayor tasa de bits no era el único objetivo de esta iniciativa.

En concreto, se ha abierto la reconsideración del protocolo general para lograr la solución óptima y eficiente en términos de soporte de múltiples servicios, y de funcionalidad y escalabilidad de OAMP. Como resultado, ha surgido una nueva solución: GPON (Gigabit PON), que ofrece soporte de alta tasa de bits a la vez que permite el transporte de múltiples servicios, concretamente de datos y TDM, en formatos nativos y con una eficiencia extremadamente alta.

En concreto, una GPON está optimizada para el tráfico TDM y se basa en estructuras de encuadre con unos requisitos de temporización y sincronización muy estrictos, como ocurría con BPON, y al mismo tiempo ofrece un manejo más eficiente de IP y Ethernet. Además, GPON mantiene la misma red de distribución óptica y el mismo plan de longitudes de onda que BPON.

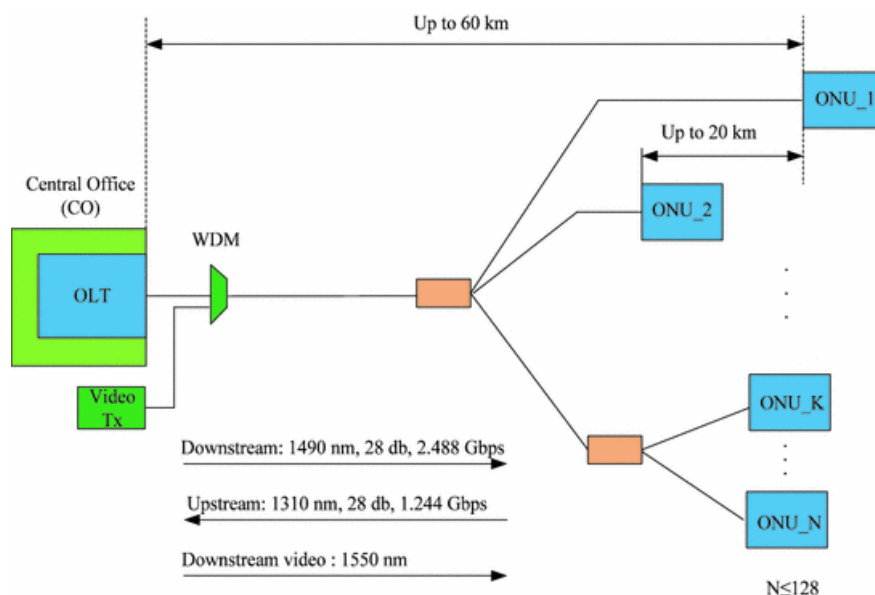


Figura 2. 14: Estructura de la transmisión en GPON.

Fuente: (Radivojević & Matavulj, 2017)

En la GPON, la UIT definió una forma de ocultar la existencia subyacente de las celdas de 53 bytes envolviendo múltiples celdas en paquetes de tamaño más razonable denominados tramas del método de encapsulación GPON



(GEM). La trama heredada de 125 ms se mantiene, pero las celdas pueden ser opcionales. De este modo, una GPON consigue un mayor ancho de banda y una mayor eficiencia utilizando paquetes más grandes y de longitud variable. Además, GPON ofrece un empaquetamiento eficiente del tráfico de usuario, con una segmentación de tramas que permite una mayor calidad de servicio para el tráfico de comunicaciones de voz y vídeo sensible al retardo. Las principales características de la GPON se muestran en las figuras 2.14 y 2.15.

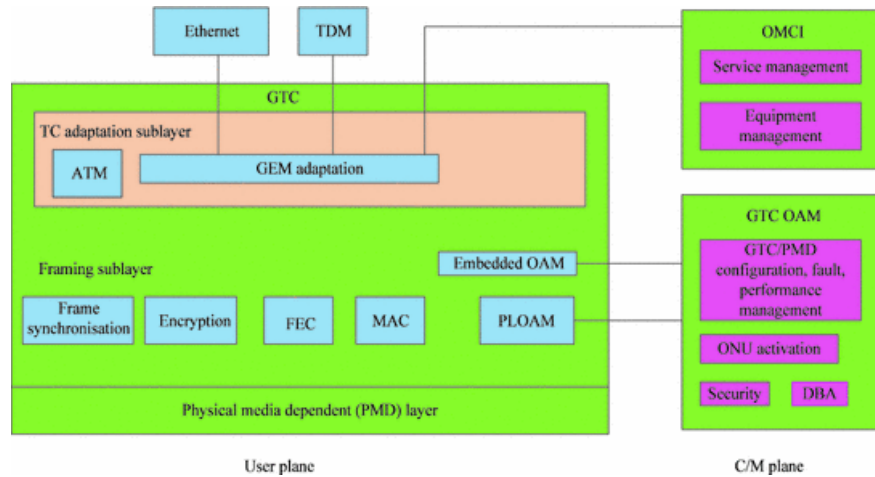


Figura 2. 15: Representación las capas de GPON.

Fuente: (Radivojević & Matavulj, 2017)

## Capítulo 3: Diseño, Implementación y resultados

### 3.1. Descripción general de la propuesta de simulación.

Este capítulo describirá el diseño de la arquitectura de la red de acceso GPON empleada para redes sobre fibra (RoF). Se mostrarán y describirán los métodos de simulación y sus parámetros. El propósito es mostrar el comportamiento de los enlaces de fibra óptica cuando la señal pasa por todos los elementos como la fibra óptica, los divisores ópticos (splitters), y el objetivo es encontrar una buena calidad de señal en todos los receptores. El objetivo final que se persigue con este componente práctico es evaluar el rendimiento de todo el sistema.

Los parámetros utilizados para evaluar este comportamiento serán la tasa de error de bits (BER), factor de calidad (Q) y el diagrama de ojo. La primera condición utilizada para evaluar el comportamiento del enlace es generalmente la BER en el receptor. Las simulaciones se realizan tratando de aproximarse en el receptor a una BER mínima. La BER mínima aceptada para las redes de acceso GPON es aproximadamente de  $1 \times 10^{-10}$ .

La segunda condición corresponde al factor de calidad (Q), que puede ser necesario en el caso de mediciones complejas de la BER en enlaces de transmisión de alto rendimiento. El factor de calidad (Q) del sistema propuesto adopta el concepto de relación señal a ruido (SNR) en una señal digital. El valor mínimo de Q que permitirá un sistema sin errores es igual a 6. Normalmente se esperan valores mucho más altos de Q en un sistema práctico.

La tercera condición corresponde al diagrama de ojo, ya que viendo este diagrama se puede describir la calidad de la señal recibida. En presencia de ISI, cuando el pulso no satisface el criterio de Nyquist, el diagrama tenderá a cerrarse verticalmente. Para una transmisión libre de errores en ausencia de ruido, el ojo debe mantener cierta apertura vertical, o de lo contrario existirán interferencias entre símbolos que provocarán errores. Cuando el ojo no está

totalmente cerrado, la interferencia entre símbolos reduce el valor del ruido aditivo admisible. Por lo tanto, cuanto mayor sea la apertura vertical, mayor será la inmunidad al ruido.

Las siguientes secciones describirán el diseño de la red de acceso GPON empleada en redes sobre fibra (RoF). En primer lugar, se modelará el sistema GPON empleada por RoF, incluyendo el comportamiento de los bloques del sistema, como el transmisor y el receptor en el canal de descendente (downstream) y ascendente (upstream). En segundo lugar, el sistema se probará utilizando la modulación por desplazamiento de fase (PSK) y sus dos variantes DPSK y OQPSK respectivamente, con una longitud de fibra de 20 km. Por último, se evaluará el rendimiento del sistema para diferentes esquemas de modulación y longitudes de fibra, y se presentará un análisis comparativo.

### 3.2. Diseño de transmisión bidireccional en sistemas GPON utilizada en radio sobre fibra.

Esta sección describe brevemente la configuración de la simulación en el software OptiSystem, donde todos los parámetros necesarios se basan en las propiedades estandarizadas de las redes de acceso GPON. La figura 3.1 muestra el modelo propuesto de sistema GPON utilizando RoF.

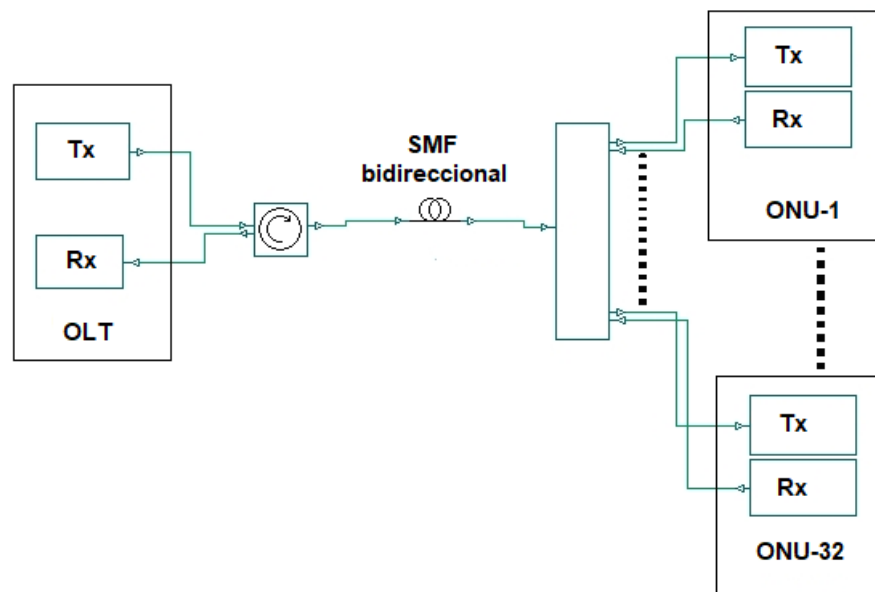


Figura 3. 1: Representación esquemática del sistema GPON propuesto.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.2 muestra la implementación del sistema en el software de simulación de comunicaciones ópticas OptiSystem.

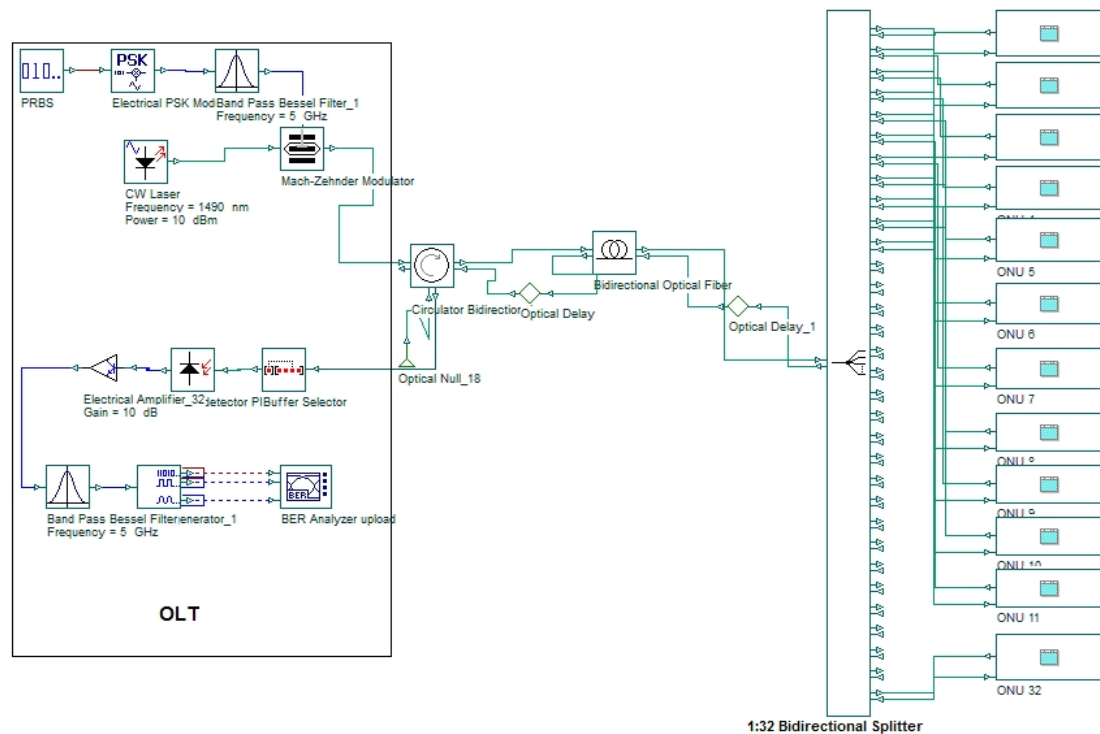


Figura 3. 2: Modelado de la red de acceso GPON en el software OptiSystem.  
Elaborado por: Autor.

El diseño de la figura 3.1 muestra el desarrollo de la transmisión bidireccional para GPON empleada por RoF. Se utilizan tanto transmisor como receptor en el terminal de línea óptica (OLT) y se distribuyen a las 32 unidades de red óptica (ONU). Se utiliza una fibra monomodo (SMF) bidireccional con una longitud de hasta 60 km. Se emplea un divisor óptico pasivo bidireccional 1:32 para conectar cada ONU a la fibra troncal o backbone. Por último, la señal ascendente y descendente se separa mediante el circulator óptico y se introduce un retardo óptico en la fibra para garantizar la sincronización correcta de la circulación.

En el transmisor, la señal de datos es generada por el generador de secuencias de bits pseudoaleatorias (PRBS), donde la tasa de bits se fija en 2.5 Gbps y la frecuencia de trabajo elegida es de 5 GHz, que funciona según lo indica el estándar IEEE 802.11a. A continuación, los datos se modulan mediante el modulador por desplazamiento de fase (PSK). Se utiliza un filtro

pasabanda (BPF) tanto en el transmisor como en el receptor para obtener sólo el espectro requerido.

La modulación óptica que consiste en un diodo láser CW (LD) y de un modulador Mach-Zehnder (MZM) que trabaja a longitud de onda de 1490 nm y que se encarga de preparar la señal eléctrica para transportarla a través de la fibra monomodo bidireccional. En el receptor, tras la fotodetección (PIN), la señal se amplifica y se filtra para regenerar la señal deseada. A continuación, la señal se introduce en los analizadores de espectro y de BER para el análisis de los datos. Los principales componentes utilizados en el sistema son los siguientes:

- a) Secuencia binaria pseudoaleatoria (*Pseudo-Random Binary Sequence, PRBS*): genera una secuencia de bits a según diferentes modos de funcionamiento. La secuencia de bits está diseñada para aproximarse a las características de los datos aleatorios.
- b) Modulador Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder Modulator, MZM*): los moduladores son los dispositivos que se utilizan para modular el haz de luz según la señal moduladora que es la señal eléctrica que se transportará sobre la luz.
- c) Fotodetector positivo-intrínseco-negativo (PIN-PD): se utiliza para convertir la señal óptica en señal eléctrica.
- d) Fibra monomodo bidireccional (*Single Mode Fiber, SMF*): el cable simula la propagación bidireccional de una configuración arbitraria de señales ópticas en una fibra monomodo bidireccional.
- e) Divisor óptico (Splitter) 1x32: este dispositivo divide uniformemente la potencia de entrada de la señal a 32 puertos de salida en el canal descendente y actúa como un combinador en el canal ascendente para combinar 32 entradas a una salida.
- f) Láser de onda continua (*Continuous Wavelength, CW*): se utiliza para convertir la señal eléctrica en señal óptica y genera una señal óptica CW.
- g) Modulación por desplazamiento de fase (*Phase Shift Keying, PSK*): codifica y modula una señal binaria en una señal eléctrica utilizando la modulación por desplazamiento de fase (PSK)

- h) Modulación por desplazamiento de fase diferencial (*Differential PSK, DPSK*): codifica y modula una señal binaria en una señal eléctrica utilizando la modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK).
- i) Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (*Offset Quadrature PSK, OQPSK*): codifica y modula una señal binaria en una señal eléctrica utilizando la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (OQPSK).

### **3.3. Análisis de los resultados obtenidos.**

A continuación, se analizan los resultados que se obtuvieron para los escenarios de simulación relacionadas las modulaciones por desplazamiento de fase.

#### **3.3.1. Análisis de resultados del escenario 1: modulación PSK.**

Una vez explicado todo el diseño, sólo falta obtener los resultados que decidirán si el diseño funciona o no, y por tanto si será factible de implementar en un caso práctico. Por ello, la longitud física máxima desarrollada desde la OLT hasta la ONU en GPON es de 20 km. El sistema se probará utilizando modulación BPSK y una longitud de fibra de 20 Km y posteriormente se probará el sistema para una longitud de fibra de hasta 60 km. Los resultados que se van a exponer son el diagrama de ojo, el factor de calidad, la BER y la potencia de la señal en el receptor.

Primero se verán los resultados descendentes y después los ascendentes. La señal de datos se regenera a la frecuencia de trabajo de 5 GHz para enlaces ascendentes y descendentes, tal como se muestra en la figura 3.3. La figura 3.4 muestra el diagrama de ojo y la BER de la ONU-1. Todos los resultados obtenidos para cada ONU, es decir, desde ONU-2 hasta ONU-32 son iguales a los que se obtienen para la ONU-1. La figura 3.5 presenta el diagrama de ojo y la BER para el enlace ascendente.

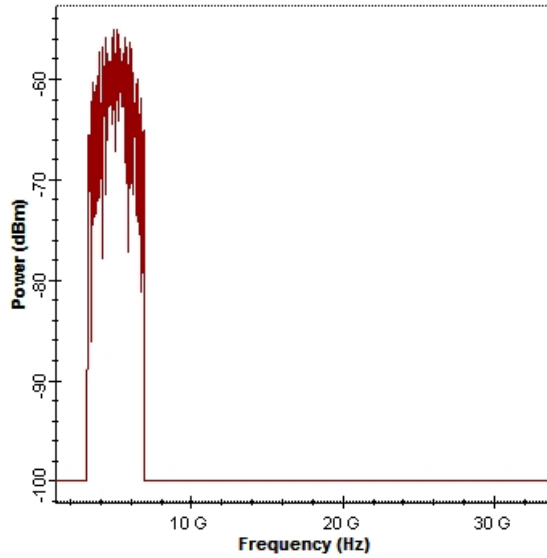


Figura 3. 3: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 1.

Elaborado por: Autor.

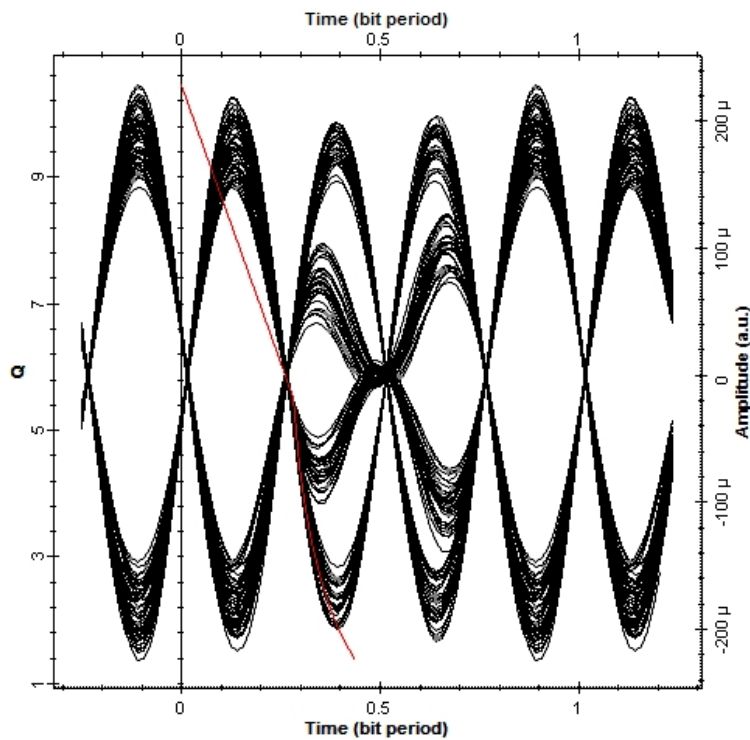


Figura 3. 4: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 1.

Elaborado por: Autor.

Los diagramas de ojo recibidos de las señales descendentes y ascendentes se midieron en la ONU y la OLT respectivamente. Tanto en la etapa downstream como en upstream, se puede observar que el ojo era claro y abierto y el factor Q tiene un valor aceptable ya que es superior a 6. En la

tabla 3.1 se comparan las dos etapas, y se observa que el sistema es más eficiente en la parte descendente debido a la utilización del acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) en la parte ascendente.

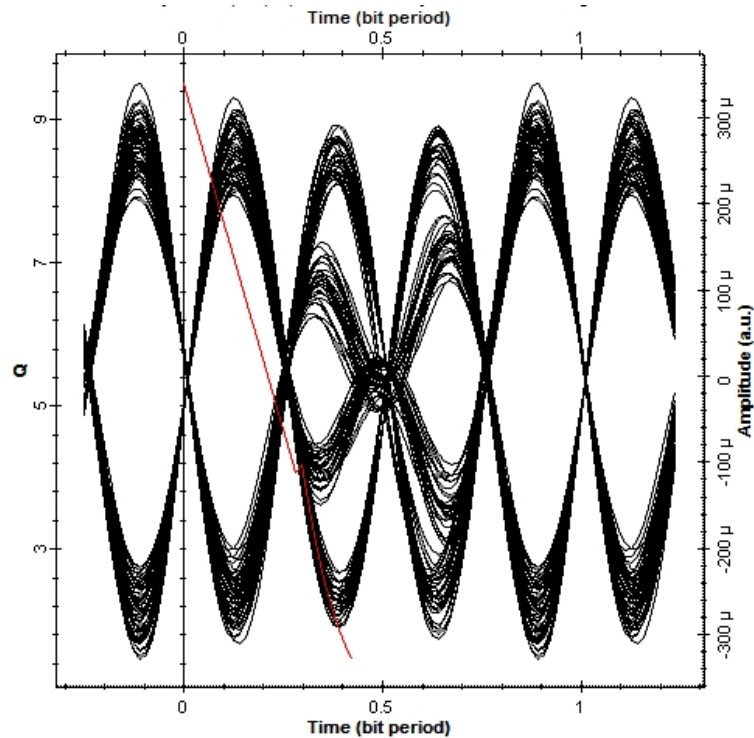


Figura 3. 5: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 1.  
Elaborado por: Autor.

La tasa de error de bits (BER) es el número de errores de bit dividido por el número total de bits transferidos durante un determinado intervalo de tiempo. A medida que la BER disminuye, el rendimiento del sistema aumenta y tiene un rango entre 0 y 1. Los valores de BER en sentido descendente y ascendente se aceptan ya que son inferiores a la BER mínima estandarizada de  $1 \times 10^{-10}$  para la tecnología GPON.

Tabla 3. 1: Comparativa de métricas en enlaces descendente y ascendente para escenario 1.

Parámetros	Descendente	Ascendente
Factor Q máximo	11.25	9.65
BER mínimo	$4.38 \times 10^{-26}$	$8.14 \times 10^{-22}$
Altura del ojo	$1.49 \times 10^{-4}$	$1.63 \times 10^{-4}$
Potencia de Tx	$-37.96 \text{ dBm}$	$-35.66 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.



### 3.3.2. Análisis de resultados del escenario 2: modulación DPSK.

El sistema se probará para modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) y longitud de fibra de 20 Km. Los resultados que se van a exponer son el diagrama de ojo, el factor de calidad, la BER y la potencia de la señal en el receptor. La señal de datos se regenera a la frecuencia de trabajo de 5 GHz, tal como se muestra en la figura 3.6 para el canal ascendente y descendente.

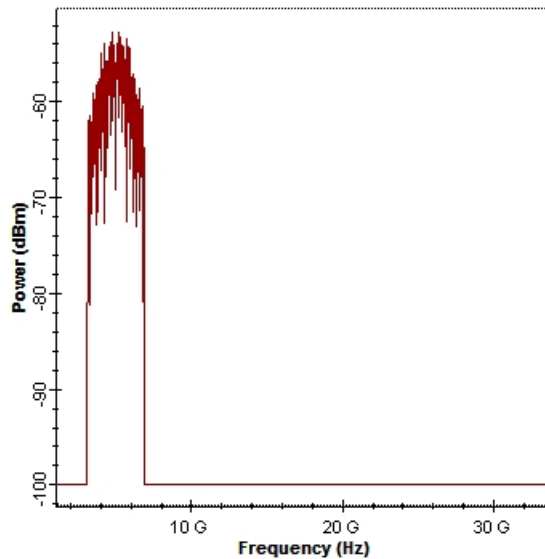


Figura 3. 6: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 2.

Elaborado por: Autor.

La figura 3.7 describe el diagrama de ojo y la BER de la ONU-1 para el canal descendente y todos los resultados de cada ONU (desde ONU-2 hasta ONU-32) son iguales a los mostrados por ONU-1. La figura 3.8 muestra el diagrama de ojo y la BER para el canal ascendente.

Los diagramas de ojo recibido de las señales descendente y ascendente se midieron en la ONU y la OLT respectivamente. Tanto en la etapa de enlace descendente como en la de enlace ascendente, se puede observar que el diagrama de ojo es bastante claro y abierto. En la tabla 3.2 se comparan las dos partes (downstream y upstream), y se observa que el sistema es más eficiente en la parte descendente debido a la utilización de TDMA en la parte ascendente.

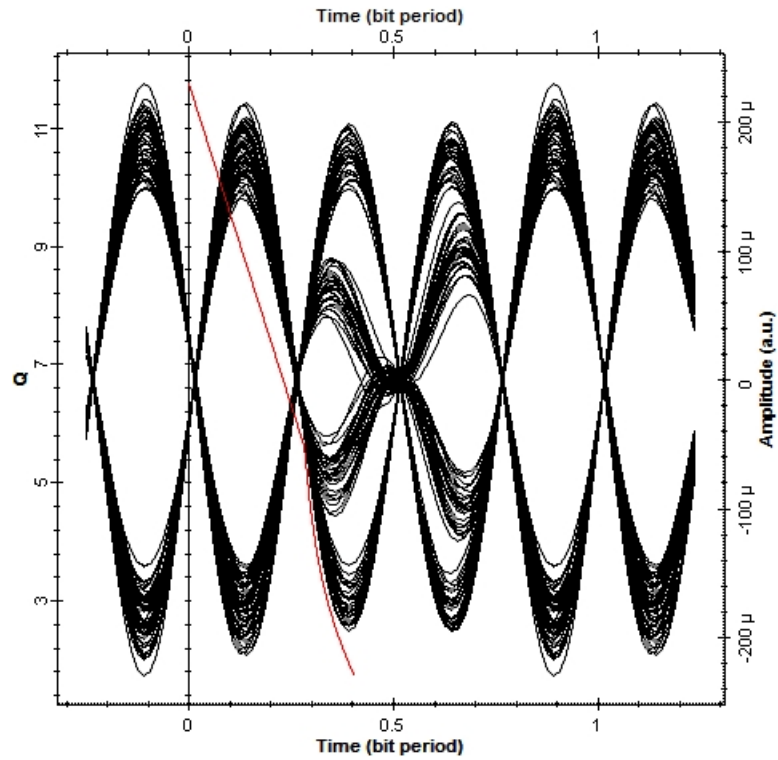


Figura 3. 7: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 2.  
Elaborado por: Autor.

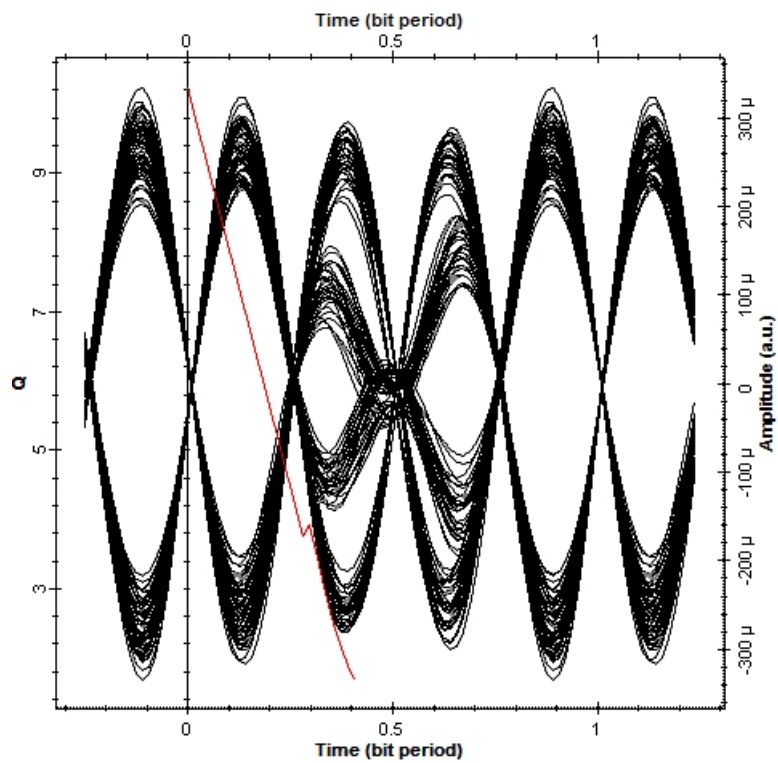


Figura 3. 8: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 2.  
Elaborado por: Autor.

Los resultados de la modulación por desplazamiento de fase diferencial (DPSK) son casi iguales a los de la modulación PSK en cuanto a la altura del ojo y el factor de calidad (Q) máximo, pero los resultados de la modulación PSK son mejores que los de la modulación DPSK en cuanto a la BER y la potencia de la señal recibida en el receptor. Los valores de la BER en sentido descendente y ascendente se aceptan porque son inferiores a la BER mínima normalizada de  $1 \times 10^{-10}$  para la tecnología GPON.

Tabla 3. 2: Comparativa de métricas en enlaces descendente y ascendente para escenario 2.

Parámetros	Descendente	Ascendente
Factor Q máximo	10.45	9.45
BER mínimo	$1.38 \times 10^{-25}$	$9.14 \times 10^{-22}$
Altura del ojo	$6.48 \times 10^{-5}$	$6.85 \times 10^{-5}$
Potencia de Tx	$-45.22 \text{ dBm}$	$-40.99 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.

### 3.3.3. Análisis de resultados del escenario 3: modulación OQPSK.

En esta sección se realizan las pruebas con la modulación por desplazamiento de fase en cuadratura compensada (OQPSK) y una longitud de fibra de 20 km. La señal de datos se regenera a la frecuencia de trabajo de 5 GHz, tal como se muestra en la figura 3.9 para el canal ascendente y descendente. La figura 3.10 muestra el diagrama de ojo y la BER para la ONU-1 para el canal descendente, y los resultados de todas las ONUs (desde ONU-2 hasta ONU-32) son iguales a los de la ONU-1. La figura 3.11 muestra el diagrama de ojos y la BER para el canal ascendente.

Los diagramas de ojo recibido de las señales descendente y ascendente se midieron en la ONU y la OLT respectivamente. Tanto en la parte del enlace descendente como en la parte del enlace ascendente, en el cual se puede observar que el ojo es claro y abierto, y el factor de calidad (Q) tiene un valor aceptable ya que es mayor a 6. Los valores de la BER en la parte descendente y ascendente son aceptables ya que es inferior a la BER mínima estandarizada de  $1 \times 10^{-10}$ . En la tabla 3.3 se comparan las dos partes,

quedando claro que el sistema es más eficiente en el canal descendente debido a las pérdidas en TDMA en el canal ascendente.

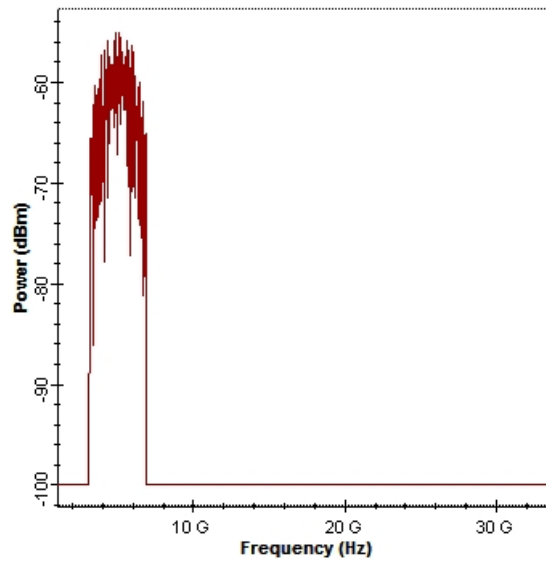


Figura 3. 9: Espectro de la señal RF para una frecuencia de trabajo de 5 GHz del escenario 3.  
Elaborado por: Autor.

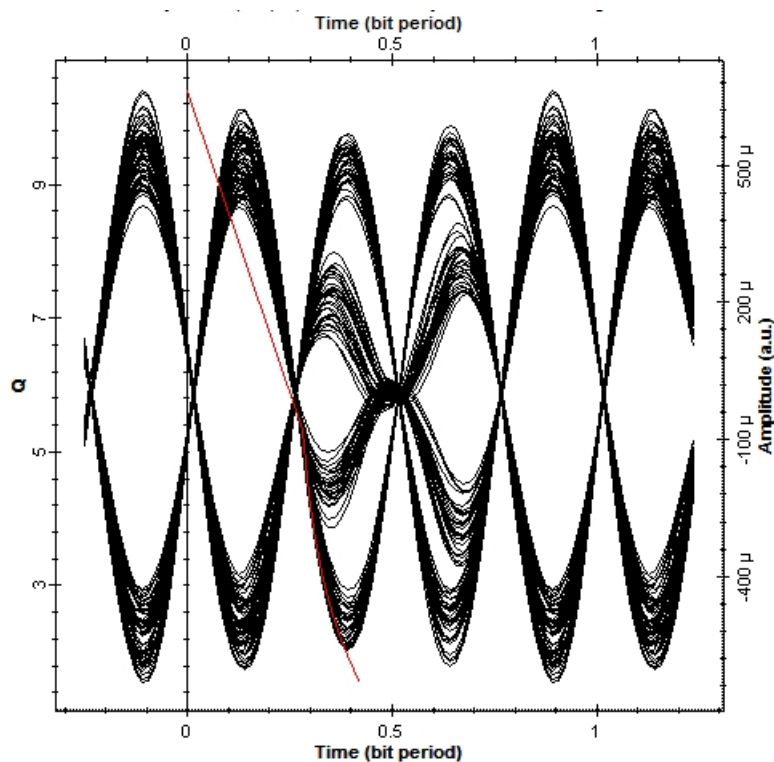


Figura 3. 10: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace descendente en el escenario 3.  
Elaborado por: Autor.

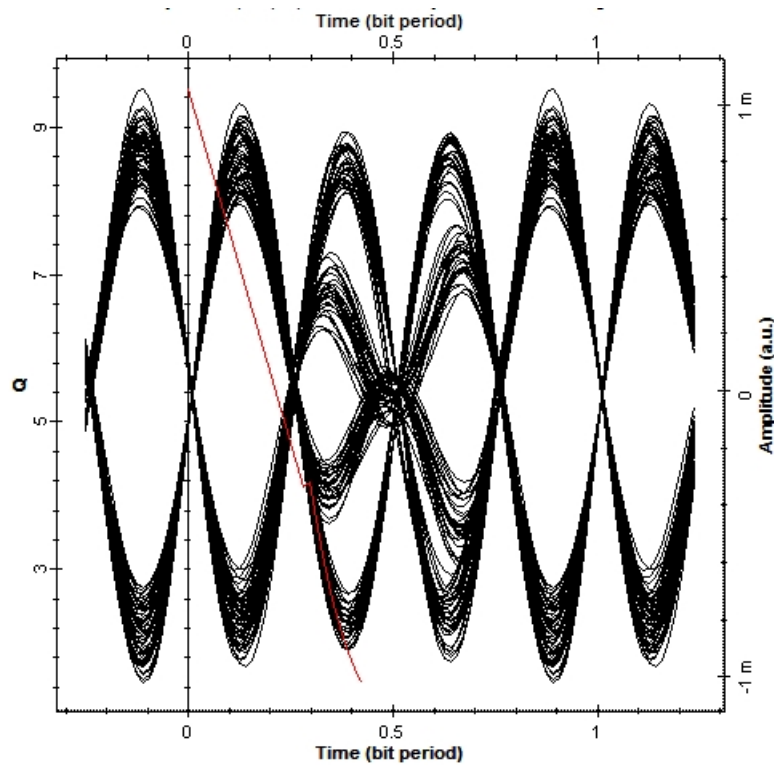


Figura 3. 11: Diagrama de ojo y tasa de error de bits en la ONU-1 para enlace ascendente en el escenario 3.

Elaborado por: Autor.

Tabla 3. 3: Comparativa de métricas en enlaces descendente y ascendente para escenario 3.

Parámetros	Descendente	Ascendente
Factor Q máximo	10.31	9.31
BER mínimo	$1.16 \times 10^{-25}$	$8.98 \times 10^{-22}$
Altura del ojo	$1.48 \times 10^{-4}$	$1.65 \times 10^{-4}$
Potencia de Tx	$-38.36 \text{ dBm}$	$-34.89 \text{ dBm}$

Elaborado por: Autor.

### 3.4. Evaluación comparativa de las modulaciones digitales entre los escenarios implementados.

En esta sección se evaluará el rendimiento del sistema para PSK, DPSK y OQPSK con una longitud de fibra de 10 km a 60 km. La figura 3.12 muestra la BER para el canal descendente y ascendente del sistema con modulación PSK para una longitud de fibra entre 10 km y 60 km. En la figura 3.12 se observa que la BER se incrementa cuando la longitud de la fibra aumenta de valor. El rendimiento de la señal descendente es mejor que el ascendente con

una longitud de fibra de hasta 47 km. La señal del canal ascendente parece ser mejor para las longitudes de fibra entre 50 km y 60 km, pero se encuentra por debajo de  $10^{-10}$  y no es aceptable en comunicaciones ópticas.

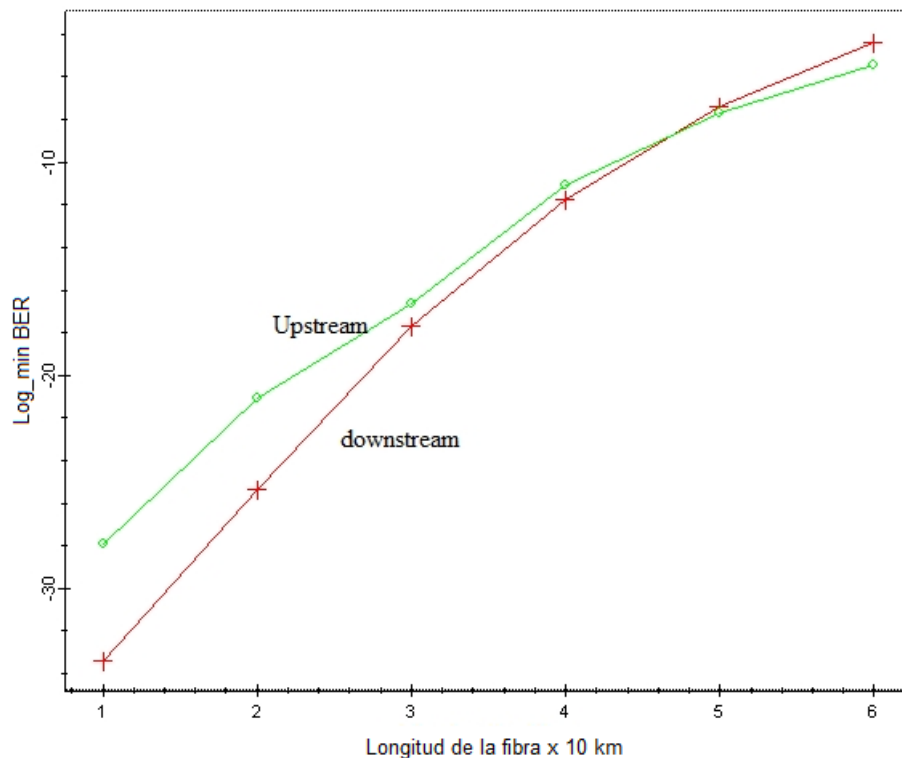


Figura 3. 12: Tasa de error de bits para el esquema PSK  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.13 muestra la potencia de la señal en el receptor para el flujo descendente y ascendente del sistema con modulación PSK para una longitud de fibra de 10 km a 60 km. Es evidente que la potencia de la señal recibida en el receptor disminuye a medida que aumenta la longitud de la fibra. La Figura 3.14 muestra la tasa de error de bits (BER) para los canales descendente y ascendente del sistema con modulación PSK diferencial (DPSK) para una longitud de fibra de 10 km a 60 km. En la figura 3.14 se observa que la tasa de error de bits (BER) aumenta con el incremento de la longitud de la fibra.

La figura 3.15 muestra la potencia total en el receptor para los canales descendente y ascendente del sistema con modulación DPSK para una longitud de fibra de 10 km a 60 km. La potencia de la señal recibida en el receptor disminuye a medida que aumenta la longitud de la fibra, como se muestra en la figura 3.15.

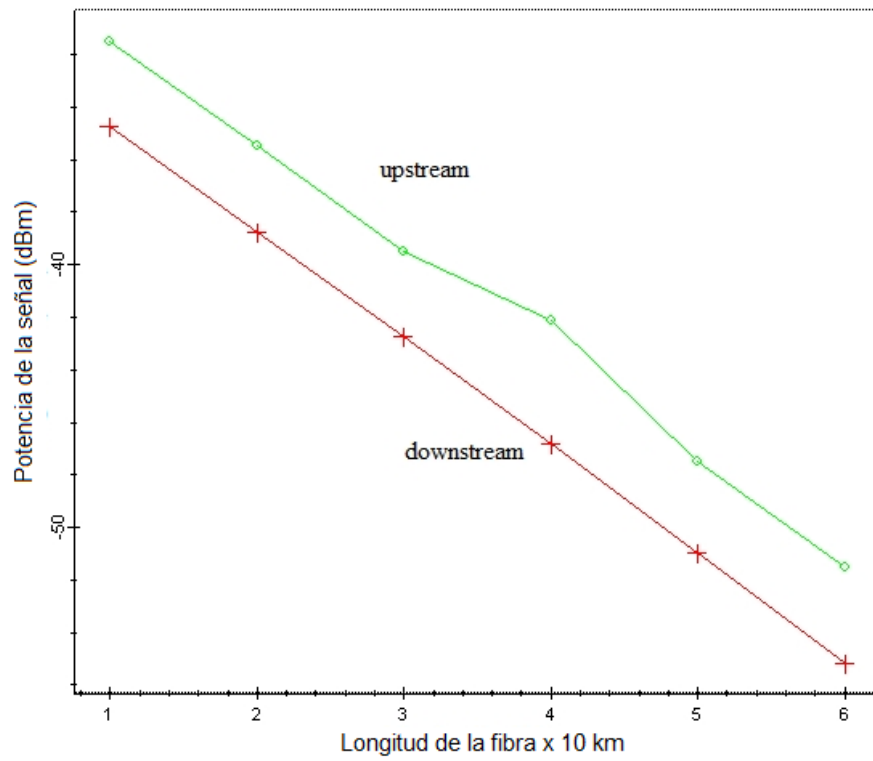


Figura 3. 13: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK.  
Elaborado por: Autor.

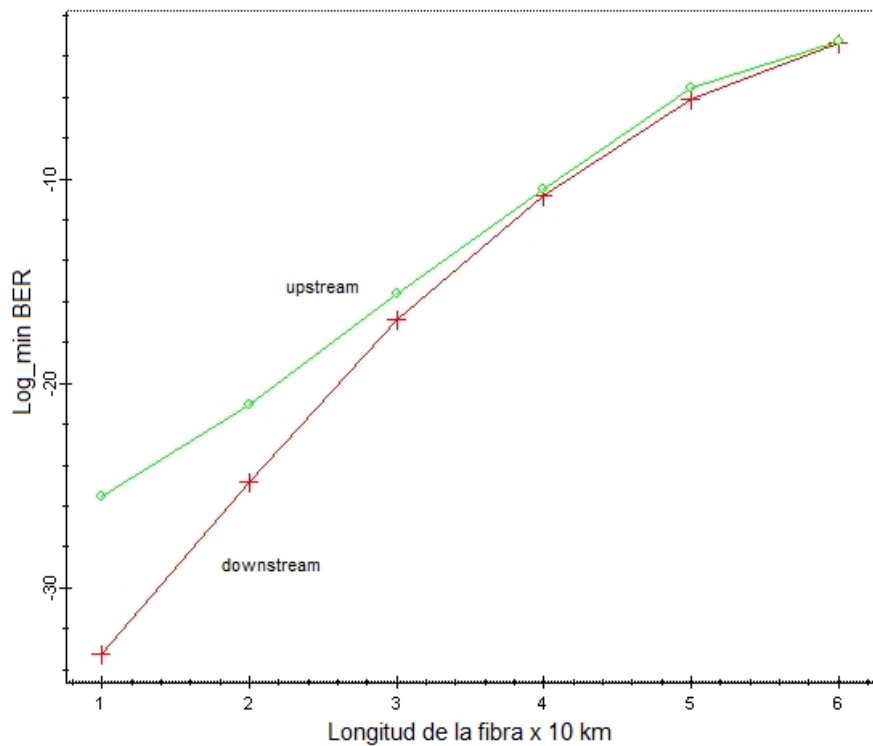


Figura 3. 14: Tasa de error de bits para el esquema PSK diferencial (DPSK).  
Elaborado por: Autor.

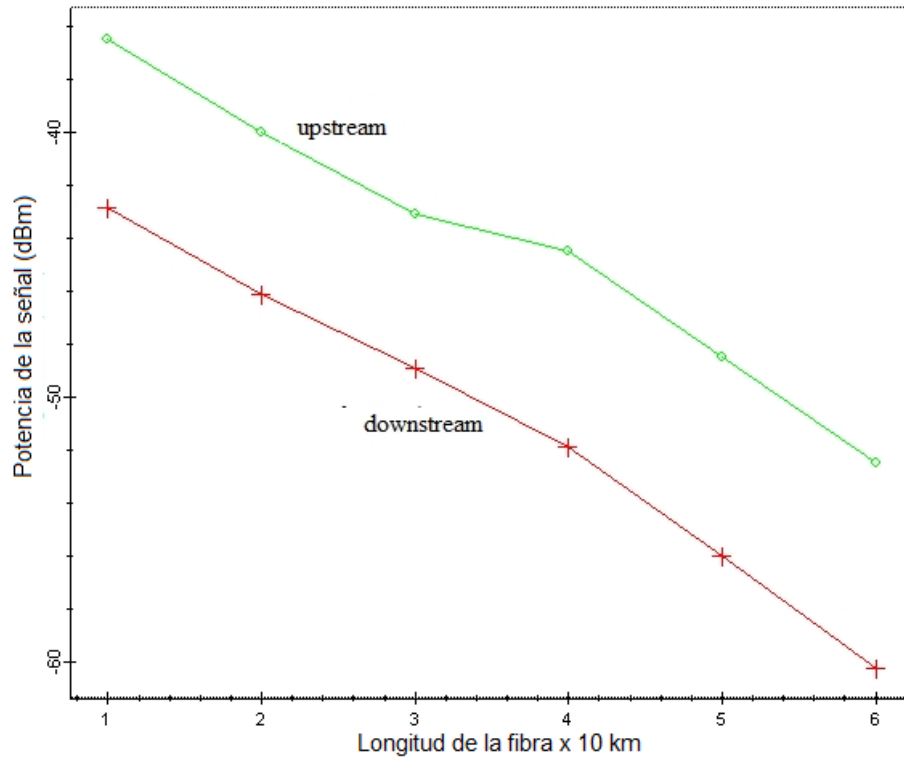


Figura 3. 15: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK diferencial (DPSK).  
Elaborado por: Autor.

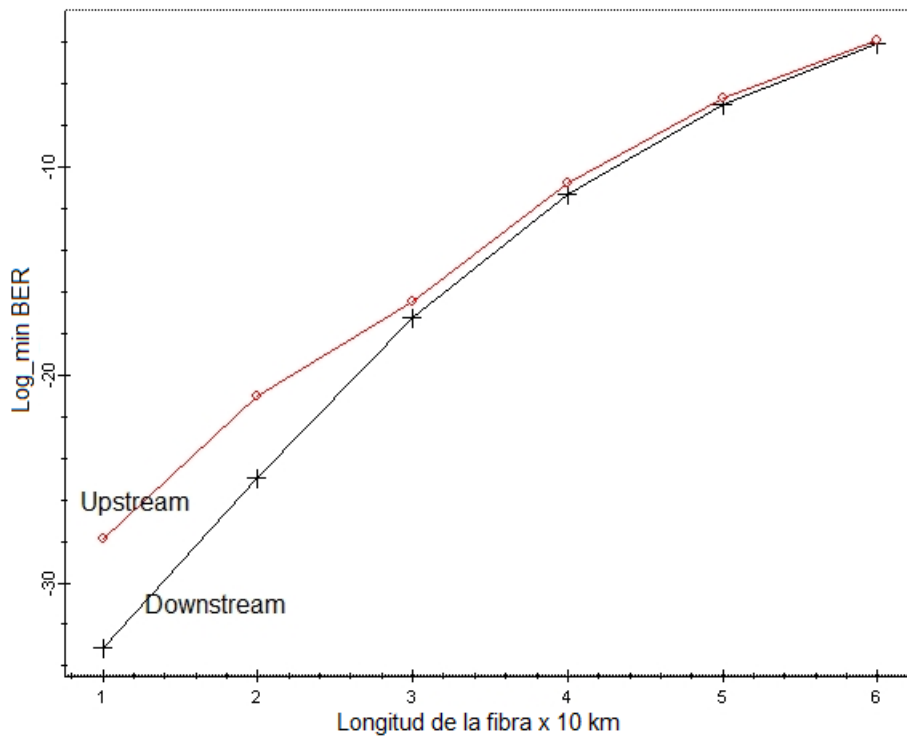


Figura 3. 16: Tasa de error de bits para el esquema PSK en cuadratura compensada (OQPSK).  
Elaborado por: Autor.



La figura 3.16 muestra la tasa de error de bits (BER) para los canales descendente y ascendente del sistema con modulación OQPSK para una longitud de fibra de 10 km a 60 km. Es evidente que la BER aumenta con la longitud de la fibra. La figura 3.1 muestra la potencia de la señal en el receptor para los canales descendente y ascendente del sistema con modulación OQPSK para una longitud de fibra de 10 km a 60 km. La potencia de la señal recibida en el receptor disminuye a medida que aumenta la longitud de la fibra, tal como se muestra en la figura 3.17.

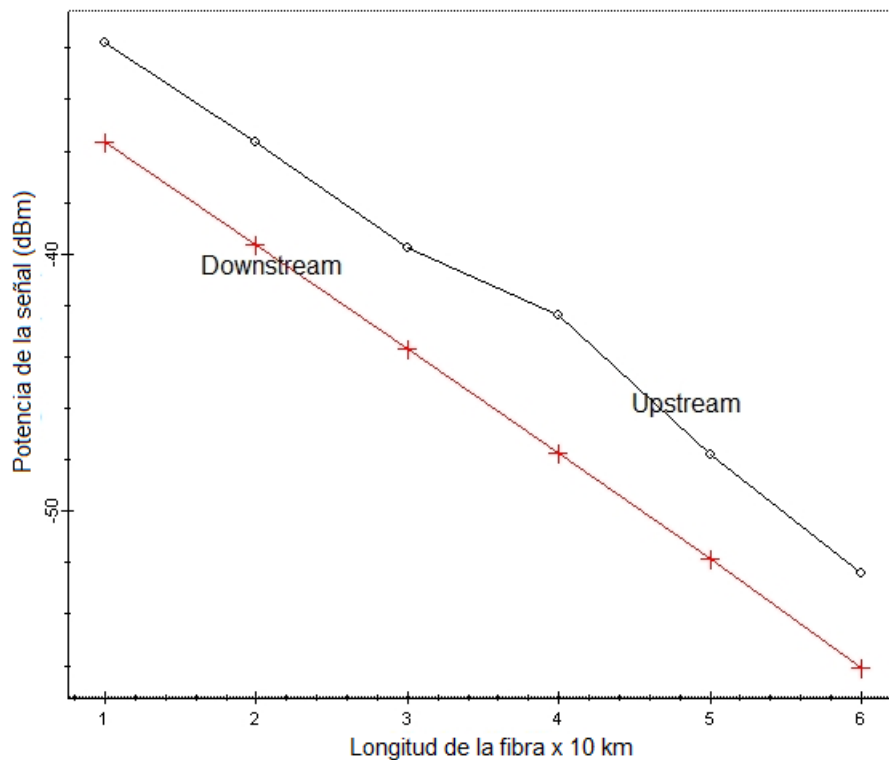


Figura 3. 17: Potencia de la señal recibida para el esquema PSK en cuadratura compensada (OQPSK).  
Elaborado por: Autor.

### 3.5. Análisis comparativo de los resultados obtenidos con diferentes esquemas de modulación y longitudes de fibra

La figura 3.18 muestra la tasa de error de bits (BER) del canal descendente para diferentes esquemas de modulación y diferentes longitudes de fibra. De la figura 3.18 se puede observar, que la BER de la modulación PSK es mejor que la modulación DPSK y OQPSK en el canal descendente, y la BER se acepta para una longitud de fibra de hasta 40 km, a esta distancia, la BER para PSK, DPSK y OQPSK son  $1.6 \times 10^{-12}$ ,  $1.6 \times 10^{-11}$  y  $5.11 \times 10^{-12}$

respectivamente. A una longitud de fibra de 50 km y 60 km, la BER está por debajo de lo aceptable en redes GPON.

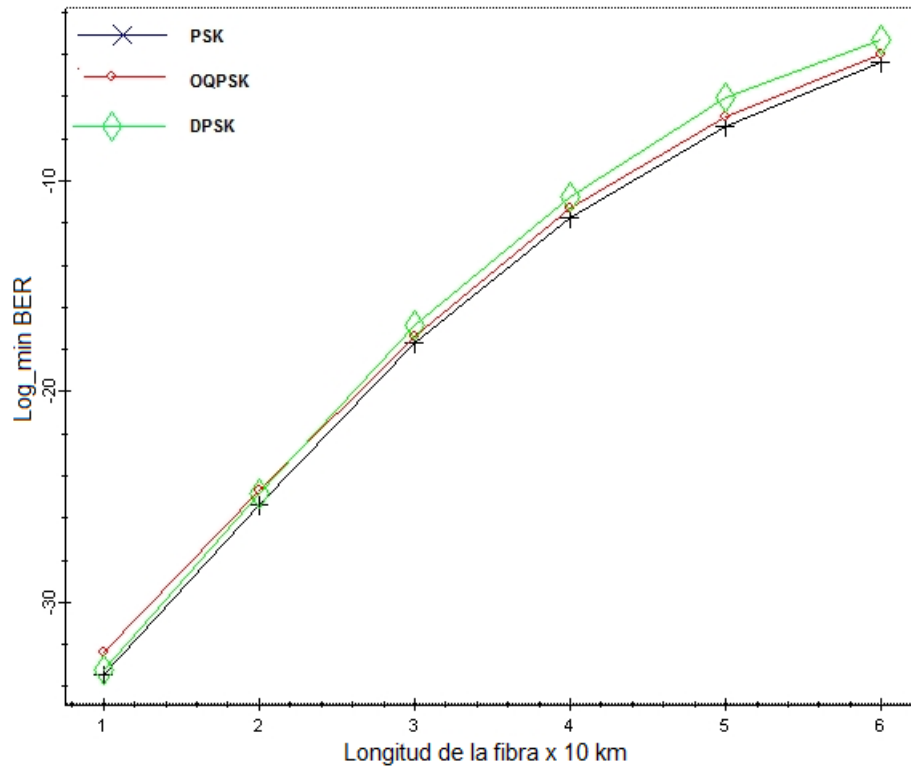


Figura 3. 18: Comparativa de los esquemas de modulación en cada escenario de simulación para el canal descendente.  
Elaborado por: Autor.

La figura 3.19 muestra la BER del canal ascendente para la modulación PSK, DPSK y QPPSK para longitudes de fibra de 10 km a 60 km. De la figura 3.19 puede verse, que la BER de la modulación PSK es mejor que la de la modulación DPSK y OQPSK en sentido ascendente. La BER se acepta para diferentes esquemas de modulación y longitud de fibra hasta 40 km, a esta distancia, la BER de PSK, DPSK y OQPSK son  $8.3 \times 10^{-12}$ ,  $3.4 \times 10^{-11}$  y  $1.6 \times 10^{-11}$  respectivamente. A una longitud de fibra de 50 km y 60 km la BER está por debajo de lo aceptable en redes GPON.

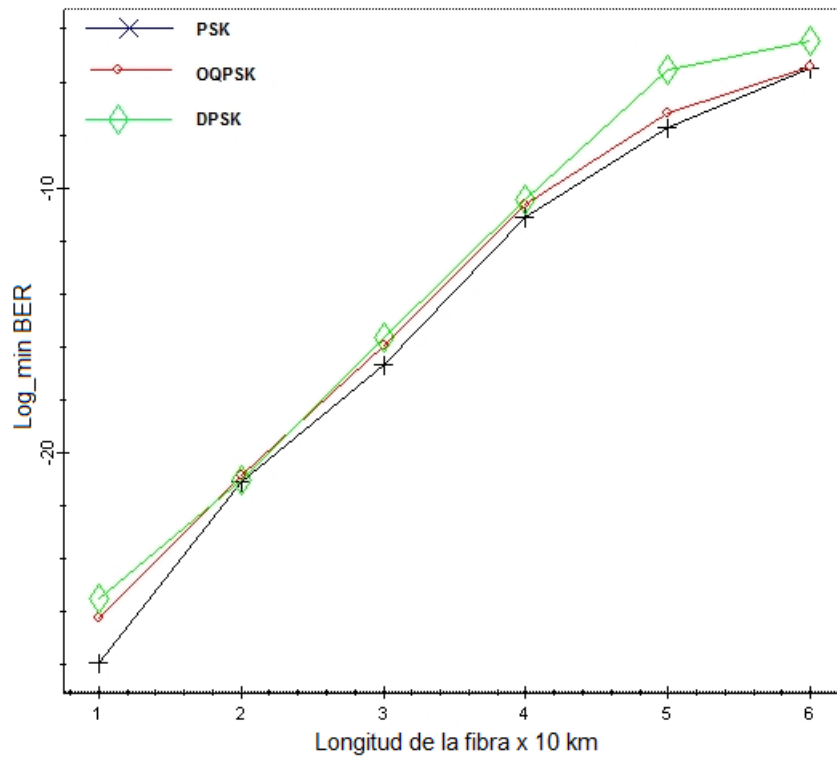


Figura 3. 19: Comparativa de los esquemas de modulación en cada escenario de simulación para el canal ascendente.  
Elaborado por: Autor.

## Conclusiones

La tecnología GPON ha cobrado mucho interés en las redes actuales por su flexibilidad y su conexión pasiva sencilla y de bajo coste. Por ejemplo, la tecnología GPON se ha desplegado con éxito en la fibra hasta el hogar (FTTH) que soporta servicios Triple-Play que combinan los datos de Internet, la telefonía y el vídeo hasta el hogar a través de un solo cable. Esta investigación proporciona la caracterización de la arquitectura GPON empleada por RoF para la red de distribución inalámbrica.

La tecnología RoF y GPON es una solución prometedora para las comunicaciones de hoy en día, ya que el número de usuarios de Internet inalámbrico aumenta continuamente. PSK es el esquema de modulación más adecuado. Proporciona la máxima potencia y la mínima tasa de error de bits (BER) para un rendimiento satisfactorio del receptor.

El sistema GPON empleado por RoF se probó con diferentes esquemas de modulación. En primer lugar, el sistema se probó con una longitud de fibra de 20 km y diferentes esquemas de modulación. Se midieron los diagramas de ojo recibidos de las señales descendentes y ascendentes en las ONUs y OLT respectivamente. Tanto en la etapa de enlace descendente como en la de enlace ascendente, el ojo era claro y abierto, y se aceptaban los valores de BER y de potencia de la señal para diferentes esquemas de modulación. En segundo lugar, se probó el sistema para diferentes esquemas de modulación y longitudes de fibra desde 10 Km hasta 60 Km y se realizó una comparación. Tanto en sentido descendente como ascendente, al aumentar la longitud de la fibra, la BER aumenta y la potencia de la señal disminuye. Se acepta la BER para una longitud de fibra de hasta 40 km en sentido ascendente y descendente para diferentes esquemas de modulación. Los resultados de la BER de la modulación PSK son mejores que los de la modulación DPSK y OQPSK en los canales descendente y ascendente.

## **Recomendaciones**

A continuación, se recomienda trabajos futuros a partir del presente proyecto.

1. Estudio del rendimiento de la BER en el sistema RoF-OFDM modulado por QAM y PSK
2. Estudio del rendimiento de varias técnicas de compensación de la dispersión en sistemas RoF-OFDM mediante el software OptiSystem

## Bibliografía

- Abadía Salamanca, D. (2017). *Diseño e implementación de un módulo para simular fibras de pocos modos* [Trabajo Final de Máster]. Universitat Oberta de Catalunya.
- Aggarwal, G., Dai, X., Saatchi, R., Binns, R., & Sikandar, A. (2019). Experimental Demonstration of Single-Channel EEG Signal Using 32 x 32 Pixel OLED Screen and Camera. *Electronics*, 8(7), 734. <https://doi.org/10.3390/electronics8070734>
- Bang, H., Thollabandi, M., Kim, S., Lee, D.-S., & Park, C.-S. (2010). Analysis of upstream link bandwidth utilization in GPON with integrated network surveillance. *Photonic Network Communications*, 20(3), 224–231. <https://doi.org/10.1007/s11107-010-0263-1>
- Cai, J., Golovchenko, K., & Mohs, G. (2013). Modern Undersea Transmission Technology. En *Optical Fiber Telecommunications* (pp. 1041–1080). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-396960-6.00030-4>
- Coimbra Gutiérrez, E. (2020). *Redes y Sistemas de Telecomunicaciones: Transmisión por Fibra Óptica* [Sitio Web dedicado a las Telecomunicaciones]. Coimbra Web. <http://www.coimbraweb.com/linkcursos.html>
- Cseh, T., & Berceli, T. (2014). Efficient compensation methods for modal dispersion in radio over multimode fiber links. *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, 1–3. <https://doi.org/10.1109/MIKON.2014.6899953>
- Harrison, M. T., Kershaw, S. V., Burt, M. G., Rogach, A. L., Kornowski, A., Eychmüller, A., & Weller, H. (2000). Colloidal nanocrystals for telecommunications. Complete coverage of the low-loss fiber windows

by mercury telluride quantum dot. *Pure and Applied Chemistry*, 72(1–2), 295–307. <https://doi.org/10.1351/pac200072010295>

Poon, K. F., Ouali, A., Chu, A., & Ahmad, R. (2013). Application of AI Methods to Practical GPON FTTH Network Design and Planning. En G. Owusu, P. O'Brien, J. McCall, & N. F. Doherty (Eds.), *Transforming Field and Service Operations* (pp. 133–151). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-44970-3\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-642-44970-3_9)

Radivojević, M., & Matavulj, P. (2017). PON Evolution. En M. Radivojević & P. Matavulj, *The Emerging WDM EPON* (pp. 67–99). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-54224-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-54224-9_3)

Upadhyay, V., Jaiswal, A. K., & Kumar, M. (2014). *Comparative Analysis of Different Modulation Techniques using ROF in Optical Communication System*. /paper/Comparative-Analysis-of-Different-Modulation-using-Upadhyay-Jaiswal/7d9778b333dfd7d51c94c8fd32bbe5d5d1a42329

Vishwakarma, S., & Ghosh, A. K. (2018). A Review Paper on a Simulation Approach for Dispersion Compensation in Optical System with a FBG. *International Journal of Electronics Communication and Computer Engineering*, 9(3), 107–112.

Wang, B., Peng, L., & Ho, P.-H. (2019). Energy-efficient radio-over-fiber system for next-generation cloud radio access networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1), 118. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1457-6>

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2018). *Física universitaria: Con física moderna*.

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Tene Morocho, Yofre Medardo** con C.C: # 110350021-9 autor del trabajo de titulación: Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON, previo a la obtención del título de **Magister 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, 7 de junio del 2021



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

Nombre: **Tene Morocho, Yofre Medardo**

C.C: 110350021-9



<b>REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA</b>			
<b>FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN</b>			
<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Análisis comparativo de las variantes de la modulación por desplazamiento de fase en sistemas de radio sobre fibra en redes GPON		
<b>AUTOR(ES)</b>	Tene Morocho, Yofre Medardo		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	M. Sc. Quezada Calle, Edgar Raúl; M. Sc. Córdova Rivadeneira, Luis Silvio / M. Sc. Palacios Meléndez, Edwin Fernando		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Sistema de Posgrado		
<b>PROGRAMA:</b>	Maestría en Telecomunicaciones		
<b>TITULO OBTENIDO:</b>	Magister en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	Guayaquil, 7 de junio del 2021	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	63
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Comunicaciones Inalámbricas, Teoría de la Comunicación		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Comunicaciones, Fibra, Modulaciones, Transmisión, Recepción, Pasiva		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>El aumento de la demanda de banda ancha ha llevado a muchos investigadores e investigaciones a encontrar soluciones urgentes y temporales para ayudar a satisfacer las necesidades actuales y futuras. Las comunicaciones por fibra óptica siguen siendo el medio de transmisión de datos que más se utiliza en las telecomunicaciones, seguida de las comunicaciones inalámbricas. Los esquemas de modulación digital, tales como desplazamiento por fase (PSK), frecuencia (FSK), entre otros son abordados en sistemas ópticos. En el presente trabajo se realiza una revisión teórica de la transmisión por fibra óptica y sus características principales que permitieron realizar la propuesta de análisis comparativo del esquema de modulación por desplazamiento de fase estándar y dos variantes DPSK (PSK diferencial) y OQPSK (PSK en cuadratura compensada) utilizado en sistemas de radio sobre fibra en redes óptica pasivas de alta capacidad (GPON). Finalmente, en los sistemas de transmisión/recepción en RoF no solo aumentan el efecto la BER, sino que también incluyen el enlace óptico entre estas ellas, sin embargo, es otro efecto negativo. Para superar esta influencia, se recomienda utilizar una PON.</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> 0998512011	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:ymtene@gmail.com">ymtene@gmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> Manuel Romero Paz		
	<b>Teléfono:</b> 0994606932		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:manuel.romero@cu.ucsg.edu.ec">manuel.romero@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>			