

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

**TEMA:**

**Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem**

**AUTOR:**

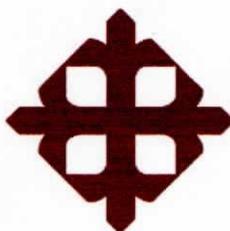
**Rivera Aguilar, Joel Israel**

**Componente práctico del examen complejo previo a la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**

**REVISOR:**

**Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando Mgs.**

**Guayaquil, Ecuador  
15 de febrero del 2023**



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

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente **componente práctico del examen complejo**, fue realizado en su totalidad por **Rivera Aguilar, Joel Israel** como requerimiento para la obtención del título de **INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES**.

REVISOR

\_\_\_\_\_

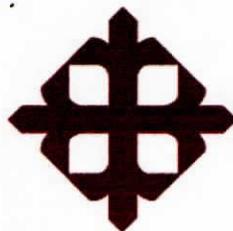
Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando Mgs.

DIRECTOR DE CARRERA

\_\_\_\_\_

M. Sc. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo

Guayaquil, a los 15 días del mes de febrero del año 2023



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

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, Rivera Aguilar, Joel Israel**

**DECLARÓ QUE:**

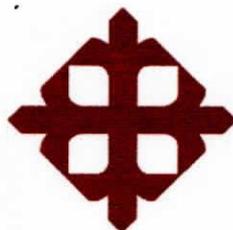
**El componente práctico del examen complejo, Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan 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 15 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR

RIVERA AGUILAR, JOEL ISRAEL



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

**AUTORIZACIÓN**

**Yo, Rivera Aguilar, Joel Israel**

Autorizó a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del **componente práctico del examen complejo, Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem** cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 15 días del mes de febrero del año 2023

EL AUTOR

RIVERA AGUILAR, JOEL ISRAEL

# REPORTE DE URKUND

**URKUND**

**Documento** [Titulacion Rivera.pdf](#) (D157702176)

**Presentado** 2023-02-02 23:01 (-05:00)

**Presentado por** Néstor Zamora (nestor.zamora@cu.ucsg.edu.ec)

**Recibido** nestor.zamora.ucsg@analysis.orkund.com

**Mensaje** Analisis Documento Rivera [Mostrar el mensaje completo](#)

1% de estas 20 páginas, se componen de texto presente en 1 fuentes.

---

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

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

TEMA:

Evaluación de un sistema de comunicación

óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem AUTOR: Rivera Aguilar, Joel Israel

Componente práctico del examen complejo

previo a

la obtención del grado de INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES REVISOR: Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando Mgs. Guayaquil, Ecuador 20 de enero del 2023

Néstor Zamora C.

## **DEDICATORIA**

Le dedico este trabajo a Dios, por ser quién a guiado mi camino, y a mi familia, que han sido mi apoyo fundamental y mi motor en este proceso que estoy culminando, sin su motivación no hubiese podido lograrlo.

**EL AUTOR**

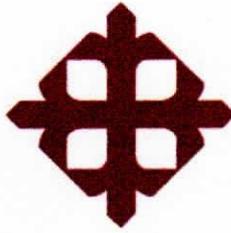
**RIVERA AGUILAR, JOEL ISRAEL**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi tutor y a mis docentes que han contribuido con mi proceso de formación universitaria y han sido el apoyo para lograr este grado académico.

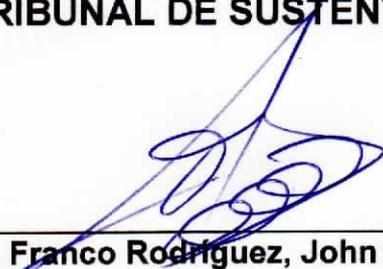
EL AUTOR

RIVERA AGUILAR, JOEL ISRAEL

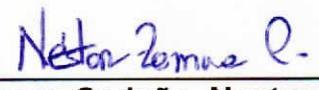


**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN TELECOMUNICACIONES**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.   
Ing. Franco Rodríguez, John Eloy Ph.D.  
DECANO

f.   
Ing. Bohórquez Escobar, Celso Bayardo Mgs.  
DIRECTOR DE CARRERA

f.   
Ing. Zamora Cedeño, Nestor Armando Mgs.  
TUTOR

## Índice General

Índice de Figuras .....	XI
Índice de Tablas .....	XIV
Resumen.....	XV
Abstract.....	XVI
<b>CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL .....</b>	<b>2</b>
1.1. Introducción .....	2
1.2. Objetivos del Problema de Investigación.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos. ....	2
<b>CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....</b>	<b>3</b>
2.1. Introducción .....	3
2.2. Descripción general de una fibra óptica.....	4
2.3. Componentes de un enlace óptico .....	4
2.3.1. Dispositivos de transmisión o fuente óptica .....	5
2.3.2. Medio de transmisión por fibra óptica .....	6
2.3.2.1. Fibra óptica monomodo (SMF).....	6
2.3.2.2. Fibra óptica multimodo (MMF).....	7
2.3.2.3. Estudio del principio de propagación en la fibra.....	9
2.3.3. Dispositivos de recepción óptica.....	10
2.4. Aplicaciones de la fibra óptica .....	11
2.5. Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica .....	11
2.6. Redes ópticas.....	12
2.6.1. Red totalmente óptica (o red transparente) .....	12
2.6.2. Red no óptica (o red opaca) .....	12
2.7. Características de las diferentes partes de una red de comunicaciones. ....	12
2.7.1. Red de acceso .....	13
2.7.2. Red Metropolitana .....	13

2.7.3.	Red central o core.....	13
2.8.	Clasificación de las redes por zonas geográficas .....	14
2.8.1.	Redes de área amplia (WAN).....	14
2.8.1.1.	Redes terrestres .....	15
2.8.1.2.	Redes submarinas .....	15
2.8.2.	Redes de Área Metropolitana (MAN) .....	15
2.8.3.	La red de área local (LAN).....	17
2.8.4.	Comparativa entre los tipos de redes por zonas geográficas.....	18
Capítulo 3:	Diseño, Implementación y Análisis de Resultados .....	19
3.1.	Descripción de la herramienta informática de simulación.....	19
3.1.1.	Características y beneficios del software .....	20
3.2.	Descripción general del sistema óptico.....	21
3.3.	Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA en la red propuesta .....	22
3.3.1.	Resultados de la simulación 1 .....	24
3.4.	Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA y de la fibra compensador de dispersión (DCF) en la red propuesta.....	28
3.4.1.	Resultados obtenidos del escenario de simulación con amplificadores EDFA y DCF .....	28
3.5.	Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA y fibra DCF en la red propuesta .....	33
3.5.1.	Resultados obtenidos del escenario de simulación con amplificadores EDFA y fibra DCF.....	33
CAPÍTULO 4:	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	38
4.1.	Conclusiones.....	38
4.2.	Recomendaciones.....	38
FUENTES CONSULTADAS	.....	40

## Índice de Figuras

### Capítulo 2

Figura 2. 1: Estructura del cable de fibra óptica .....	4
Figura 2. 2: Representación esquemática simplificada de un enlace óptico ...	4
Figura 2. 3: Representación esquemática de una fibra óptica monomodo (SMF).....	6
Figura 2. 4: Modos de propagación de una fibra óptica multimodo de índice escalonado .....	7
Figura 2. 5: Modos de propagación de una fibra óptica multimodo de índice gradual. ....	8
Figura 2. 6: Gráfica comparativa de la atenuación entre fibras monomodo y multimodo .....	9
Figura 2. 7: Principio de propagación mediante reflexión total interna.....	9
Figura 2. 8: Tipos de fotodetectores PIN.....	10
Figura 2. 9: Estructura de una red central o core.....	13
Figura 2. 10: Arquitectura de redes WAN de la jerarquía de protocolos al multiprotocolo sobre SONET .....	14
Figura 2. 11: Arquitectura de una red óptica metropolitana.....	16
Figura 2. 12: Arquitectura de una red LAN óptica .....	18

### Capítulo 3

Figura 3. 1: Ventana de trabajo de OptiSystem .....	20
Figura 3. 2: Parámetros de un amplificador de Raman.....	21
Figura 3. 3: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica usando multiplexación OADM .....	23
Figura 3. 3: Diseño de la red óptica usando multiplexación OADM.....	23
Figura 3. 5: Resultado obtenido del factor de calidad en función de la longitud de la fibra óptica .....	26

Figura 3. 6: Resultado obtenido de la BER en función de la longitud de la fibra óptica .....	26
Figura 3. 7: Resultado obtenido del mejoramiento del factor Q en función de la longitud de la fibra óptica .....	27
Figura 3. 6: Resultado obtenido del mejoramiento de la BER en función de la longitud de la fibra óptica .....	27
Figura 3. 9: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 2 EDFA) usando multiplexación OADM.....	28
Figura 3. 10: Resultado obtenido del factor Q en función de la longitud de la fibra óptica para la red modificada con 2 EDFA.....	29
Figura 3. 11: Resultado obtenido del BER en función de la longitud de la fibra óptica para la red modificada con 2 EDFA.....	29
Figura 3. 12: Resultado obtenido del factor Q en función de la tasa de bits para la red modificada con 2 EDFA.....	30
Figura 3. 13: Resultado obtenido del BER en función de la tasa de bits para la red modificada con 2 EDFA.....	30
Figura 3. 14: Comparativa del factor Q entre los dos escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.....	31
Figura 3. 15: Comparativa de la BER entre los dos escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.....	31
Figura 3. 16: Comparativa del factor Q entre los dos escenarios de simulación en función de la tasa de bits.....	32
Figura 3. 17: Comparativa de la BER entre los dos escenarios de simulación en función de la tasa de bits.....	32
Figura 3. 18: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM .....	33
Figura 3. 19: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM .....	34
Figura 3. 20: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM .....	34

Figura 3. 21: Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM .....	35
Figura 3. 22: Comparativa del factor Q entre los tres escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.....	35
Figura 3. 23: Comparativa de la BER entre los tres escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.....	36
Figura 3. 24: Comparativa del factor Q entre los tres escenarios de simulación en función de la tasa de bits.....	37

## Índice de Tablas

### Capítulo 2

Tabla 2. 1: Comparativa entre las fibras monomodo y multimodo .....	8
Tabla 2. 2: Comparativa entre los tipos de redes ópticas según su cobertura geográfica. ....	18

## Resumen

El presente trabajo se basó en la <Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem=. Desde este contexto, la finalidad que persiguió este proyecto fue identificar las mejoras que aportan la fibra óptica monomodo (SMF), los amplificadores EDFA y las fibras DCF en términos de calidad de servicio (factor Q) y tasa de error de bits (BER). En consecuencia, el presente trabajo de examen complejo se centra más exactamente en el estudio de la red óptica usando la técnica de multiplexación OADM, y que se dividió en tres capítulos, el primero se basó en las generalidades relativas del examen complejo, el segundo se caracterizó la fibra óptica, así como las distintas características y componentes de la cadena de transmisión óptica. Finalmente, en el capítulo 3 se presentó el diseño de simulación y evaluación de los resultados obtenidos de la red de comunicación óptica sin y con amplificadores EDFA y fibras DCF.

**Palabras claves:** Comunicaciones, Fibra, Calidad, Velocidad, Amplificador, Compensación.

## **Abstract**

This work was focused on the "Evaluation of an optical communication system by AODM multiplexing technique using OptiSystem software". From this context, the goal pursued by this project was to identify the improvements provided by single-mode optical fiber (SMF), EDFA amplifiers and DCF fibers in terms of quality of service (Q factor) and bit error rate (BER). Therefore, the present work of complexive examination is more precisely focused on the study of optical network using OADM multiplexing technique, and which was divided into three chapters, the first one was based on the relative generalities of complexive examination, the second one characterized the optical fiber, as well as the different characteristics and components of the optical transmission chain. Finally, chapter 3 presented the simulation design and evaluation of the obtained results of the optical communication network without and with EDFA amplifiers and DCF fibers.

**Keywords:** Communications, Fiber, Quality, Speed, Amplifier, Compensation.

# **CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN GENERAL**

## **1.1. Introducción.**

Con la evolución que han experimentado las telecomunicaciones a través de la fibra óptica, se ha incrementado la cantidad de arquitecturas de red, así como las técnicas de codificación y los componentes disponibles. Por otra parte, los diseños de los sistemas asociados resultan cada vez más complejos, debido al gran número de parámetros existentes que influyen en el rendimiento del enlace. En consecuencia, las herramientas de simulación se emplean cada vez más como ayuda para descubrir soluciones rápidamente, tanto a nivel de componentes como de sistemas.

Sin embargo, para las transmisiones ópticas, a diferencia de la electrónica y las microondas, carecía de herramientas de simulación estandarizadas y bien aceptadas. En los últimos años han aparecido en el mercado varios paquetes de software que permiten la simulación de sistemas de comunicación óptica, entre ellos el más utilizado OptiSystem.

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

### **1.3.1. Objetivo General.**

Realizar la evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Describir los fundamentos teóricos de las comunicaciones ópticas mediante la revisión de literatura.
- Realizar el diseño de la red de comunicaciones óptica utilizando la multiplexación óptica Add/Drop (OADM) sobre el software de simulación OptiSystem.
- Evaluar los resultados obtenidos en el simulador OptiSystem de la red diseñada.

## CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. Introducción.

Las transmisiones de voz fueron un deseo innato del ser humano. Históricamente, los cables telefónicos representaron el primer medio de comunicación y con ello se permitió el desarrollo del telégrafo y del teléfono (Geo, 2022). Actualmente es el medio principal de conexión a las redes telefónicas e informáticas (teléfono, fax, Internet...), a través de los pares trenzados. A continuación, apareció el cable coaxial (guía de ondas) y las microondas (Mora S. & Samaniego M., 2021).

En los sistemas digitales de mayor velocidad se transmitía información a una tasa de 10 Mbps, por lo que el cable coaxial resultaba absolutamente adecuado como medio de transmisión, sin embargo, con el surgimiento de nuevos servicios asociados al desarrollo de sistemas multimedia, y la necesidad de una mayor velocidad de transmisión de información, surgieron alternativas al cable coaxial por sus altas pérdidas, sus cortas distancias de propagación y sus limitadas prestaciones.

Las necesidades de capacidad de las redes de telecomunicaciones a nivel mundial han hecho que estos medios tradicionales de comunicación se hayan saturado, tanto en términos de velocidad como de ancho de banda (Núñez et al., 2020). Con la aparición de la fibra óptica, los servicios de telecomunicaciones se han ampliado mucho en cuanto a prestaciones y oferta de ancho de banda y velocidades a las que el cobre es incapaz de dar respuesta frente al incremento de la demanda de nuevos servicios multimedia de muy alta velocidad. (Nieto, 2019)

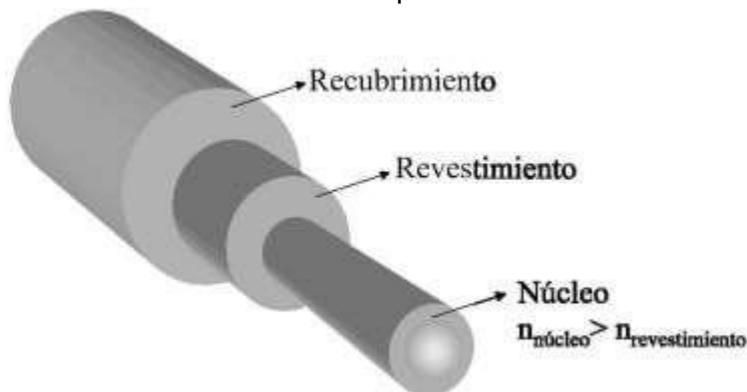
La llegada de las tecnologías de fibra óptica ha revolucionado el mundo de las telecomunicaciones. Este capítulo se centra en la fibra óptica en general, las características de un enlace óptico, sus ventajas e inconvenientes y los diferentes tipos de redes ópticas.

## 2.2. Descripción general de una fibra óptica.

La fibra óptica tiene forma de guía de ondas cilíndrica y consta de los siguientes elementos básicos. (Addanki et al., 2018)

1. El núcleo: se trata de la parte central de la fibra óptica encargada de guiar las ondas luminosas, cuyo índice de refracción es  $n_1$ .
2. Revestimiento: representan un estrato que cubre el núcleo de la fibra con un índice de refracción apenas inferior al del núcleo, que en consecuencia permite la reflexión total e indefinida de los modos en la interfaz núcleo-revestimiento.
3. Recubrimiento: se trata de un recubrimiento que proporciona protección a la fibra óptica ya sea para instalaciones aéreas, subterráneas y submarinas.

Figura 2. 1:  
Estructura del cable de fibra óptica.

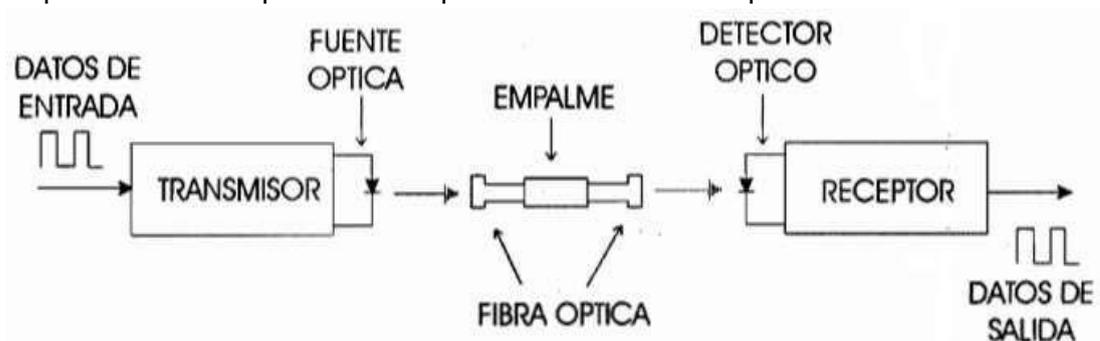


Fuente: Hernandez-Garcia et al., (2010)

## 2.3. Componentes de un enlace óptico

Para un enlace de fibra óptica punto a punto se requieren varios subconjuntos básicos, según se muestra en la Figura 2.2.

Figura 2. 2:  
Representación esquemática simplificada de un enlace óptico.



Fuente: Panda Ancha, (2015)

### **2.3.1. Dispositivos de transmisión o fuente óptica.**

En el campo de un sistema de comunicaciones ópticas, la exigencia de emplear anchos de banda cada vez más amplios exige la elección de fuentes con espectros reducidos, como los diodos láser (LD) y los diodos emisores de luz (LED).

#### **1. Diodos láser (LD)**

Su funcionamiento se basa en dos mecanismos fundamentales: la absorción o bombeo de corriente eléctrica y la emisión estimulada (amplificación en semiconductores). El diodo láser actúa como diodo coherente y es utilizado fundamentalmente en sistemas de transmisión a muy larga distancia (baja anchura espectral y gran ancho de banda). De esta manera, el diodo láser es la fuente más apropiada en el campo de las comunicaciones ópticas, ya que ofrece la mejor eficacia de acoplamiento óptico con la fibra. Los láseres son osciladores compuestos por un medio de amplificación (A) y un bucle de retroalimentación (CR). (Addanki et al., 2018)

Las características de los diodos láser son las siguientes

- ❖ La fuente luminosa es coherente y monocromática.
- ❖ Ancho de espectro estrecho.
- ❖ Las transmisiones están en la misma dirección (patrón de radiación directiva).
- ❖ Utilizados en sistemas de transmisiones de larga distancia.

#### **2. Diodo emisor de luz (LED)**

El LED es una fuente incoherente y basada en la emisión espontánea, generalmente es utilizada en enlaces de corta distancia con fibra multimodo, con un espectro de emisión bastante amplio y aplicado en sistemas de transmisión que no requieran anchos de banda muy elevados. Las características de este dispositivo son:

- ❖ Se trata de una fuente policromática, e incoherente.
- ❖ El rango del espectro es bastante amplio.
- ❖ El comportamiento de la radiación resulta ser menos direccional

- ❖ El comportamiento de la potencia y la corriente resulta relativamente lineal.
- ❖ Utilizados en sistemas de transmisión que no requieren un mayor ancho de banda.

### 2.3.2. Medio de transmisión por fibra óptica.

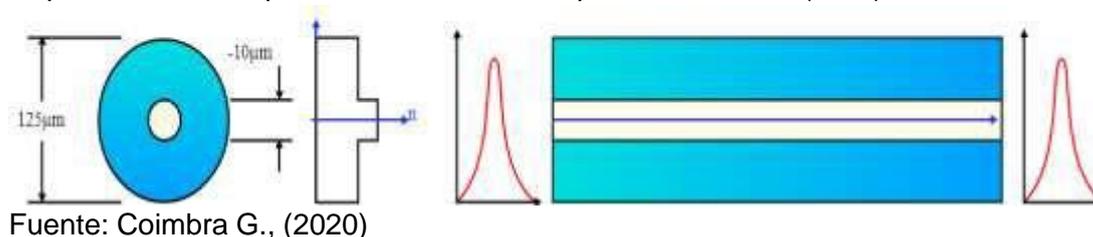
Las fibras ópticas se caracterizan por las dimensiones del núcleo y el revestimiento y por la variación del índice de refracción dentro del núcleo. Los diferentes caminos que puede tomar un haz de luz que se propaga por el núcleo de la fibra se denominan modos de propagación. Según este criterio, se pueden distinguir dos categorías de fibras ópticas, que son: fibra óptica monomodo y fibra óptica multimodo. (Cai et al., 2013)

#### 2.3.2.1. Fibra óptica monomodo (SMF).

El ancho de banda es casi infinito, superior a 10 GHz/km con una longitud de onda de corte de  $1.2 \frac{1}{4} \mu\text{m}$ . El diámetro del núcleo es  $10 \frac{1}{4} \mu\text{m}$  (véase la Figura 2.3) y la apertura numérica resultan ser muy pequeños a fin de que los rayos de luz sean propagados simultáneamente con tiempos de recorrido iguales. A este tipo de fibra se destinan fundamentalmente comunicaciones de larga distancia. El reducido diámetro del núcleo de la fibra requiere una elevada potencia de emisión proporcionada por los diodos láser. Así, las longitudes de onda que se utilizan son 1310, 1550 y 1625 nm.

Figura 2. 3:

Representación esquemática de una fibra óptica monomodo (SMF).



Entre las ventajas de utilizar una fibra monomodo destacan las siguientes

- ✓ Rendimiento: unos 1 Tbps
- ✓ Alcance máximo: unos 100 km.

✓ Atenuación: 0.1 dB/km

### 2.3.2.2. Fibra óptica multimodo (MMF).

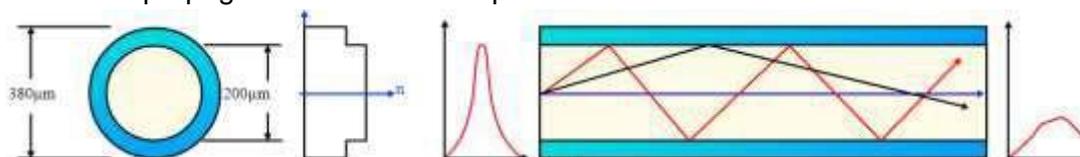
Este tipo de fibra es la más utilizada para distancias cortas y puede conseguir una velocidad de Gbps, con un mayor diámetro de núcleo (entre 50  $\mu\text{m}$  a 62.5  $\mu\text{m}$ ). Existen dos tipos de fibras ópticas multimodo:

#### a. Fibra multimodo de índice escalonado.

La capacidad de transmisión de datos en esta fibra alcanza los 50 Mbps. En el centro, la propagación provoca una importante distorsión de la señal de entrada y, por tanto, una dispersión de la señal transmitida. Es decir, que los diferentes rayos toman trayectorias distintas, ya que sus recorridos ópticos y sus tiempos de propagación son diferentes, tal como se muestra en la Figura 2.4. De este modo, se produce una dispersión intermodal. Es posible reducir este efecto mediante la modificación del perfil del índice del núcleo para crear un "índice escalonado".

Figura 2. 4:

Modos de propagación de una fibra óptica multimodo de índice escalonado.



Fuente: Coimbra G., (2020)

Con una fibra multimodo de salto es posible beneficiarse de:

- ✓ Bajo coste
- ✓ Fáciles de implementar
- ✓ Rendimiento: unos 50 Mbps
- ✓ Alcance máximo: unos 2 km
- ✓ Atenuación: 10 dB/km

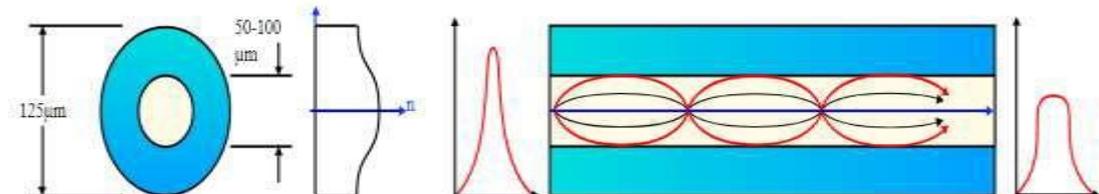
Como desventaja, las fibras multimodo de salto se caracterizan por tener elevadas pérdidas y distorsiones.

#### b. Fibra multimodo de índice gradual

En las redes de área local se utilizan fibras multimodo con índice gradual. Al tratarse de una fibra multimodo, los modos de propagación que

coexisten son varios (véase la Figura 2.5). Contrariamente a la fibra de índice escalonado o de salto, no existe una gran diferencia en el índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento. Por otra parte, el núcleo de las fibras de índice graduado consta de varias capas de material con índice de refracción cada vez más alto, por lo que la atenuación en este tipo de fibras es de menor importancia que en las fibras de índice escalonado.

Figura 2. 5:  
Modos de propagación de una fibra óptica multimodo de índice gradual.



Fuente: Coimbra G., (2020)

La ventaja de una fibra multimodo de índice graduado es:

- ✓ Un ancho de banda razonable
- ✓ Buena calidad de transmisión
- ✓ Rendimiento: aproximadamente 1 Gbps
- ✓ Alcance máximo: aprox. 2 km
- ✓ Atenuación: 10 dB/km

Como desventaja, una fibra de índice graduado multimodo es difícil de implementar. La Figura 2.6 muestra el rendimiento de los tres tipos de fibra óptica, la atenuación es casi constante en la SMF. Mientras, que en la MMF la atenuación es mucho mayor a medida que se incrementa la distancia del enlace óptico. La Tabla 2.1 presenta una comparación entre SMF y MMF.

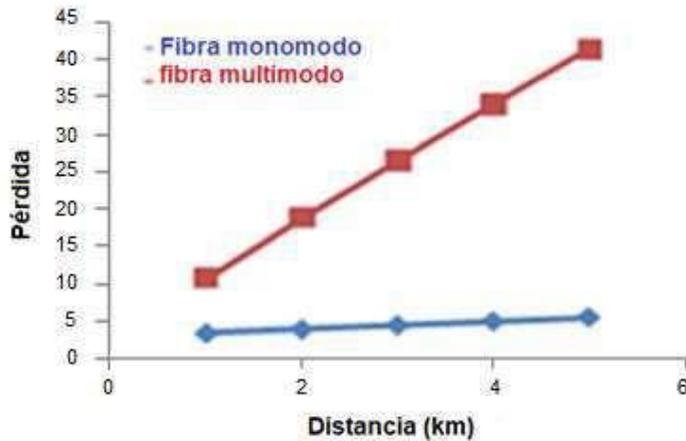
Tabla 2. 1:  
Comparativa entre las fibras monomodo y multimodo.

Fibra monomodo	Fibra multimodo
Baja dispersión	Alta dispersión
Conexión delicada	Fácil de conectar
Baja atenuación	Alta atenuación
Alta velocidad, larga distancia	Red local

Fuente: Abadía S., (2017)

Figura 2. 6:

Gráfica comparativa de la atenuación entre fibras monomodo y multimodo.



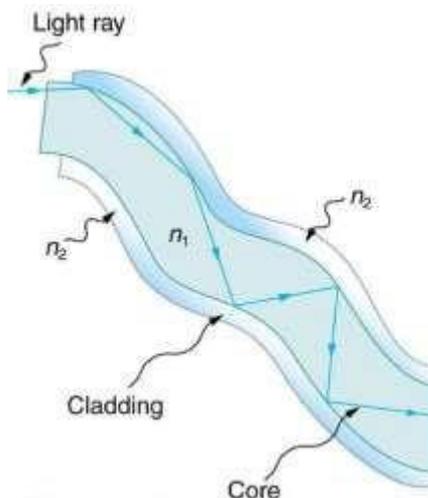
Fuente: Abadía S., (2017)

### 2.3.2.3. Estudio del principio de propagación en la fibra

La propagación de las señales luminosas en las fibras ópticas se basa en el principio de la reflexión total. Los rayos de luz que viajan por el núcleo de la fibra chocan con la superficie de la fibra con un ángulo de incidencia mayor que el ángulo crítico: toda la luz se refleja entonces en la fibra (ver Figura 2.7). Así, la luz puede propagarse a grandes distancias, reflejándose miles de veces. Para evitar la pérdida de luz debido a su absorción por las impurezas de la superficie de la fibra, el núcleo de la fibra se recubre con un revestimiento de vidrio con un índice de refracción mucho más bajo; las reflexiones se producen entonces en la interfaz núcleo-revestimiento, tal como se ilustra en la Figura 2.7.

Figura 2. 7:

Principio de propagación mediante reflexión total interna.



Fuente: (OpenStax, 2022)

### 2.3.3. Dispositivos de recepción óptica.

En las comunicaciones por fibra óptica, es fundamental el fotodetector. Tiene como función transformar la señal óptica enviada por la fibra óptica en una señal eléctrica, que es tratada por los dispositivos electrónicos. La mayoría de los fotodetectores que se utilizan en los sistemas de transmisión por fibra óptica son los fotodiodos y los fotodiodos PIN. (Zhu et al., 2018)

#### 1. Fotodiodo

Se trata de una unión PN de polarización inversa. Los electrones minoritarios en P absorben los fotones de luz y se vuelven libres en N, luego serán extraídos al exterior por el campo eléctrico del generador, creando una débil corriente eléctrica.

#### 2. Fotodetector PIN

Se trata de una unión PN intercalada por una capa I intrínseca, con el objetivo de disminuir el dopaje de N para aumentar la corriente eléctrica generada por la unión. En la transmisión óptica los detectores deben:

- ✓ Proporcionar un buen acoplamiento a la fibra.
- ✓ Tener una alta sensibilidad a la longitud de onda de funcionamiento.
- ✓ Tener un ancho de banda adecuado.
- ✓ Tener un requisito de baja tensión de la fuente.
- ✓ No hay influencia de las condiciones externas en las características.
- ✓ Tener una alta fiabilidad (buena eficiencia cuántica).
- ✓ Tienen un tiempo de respuesta muy corto y poco ruido adicional.

Figura 2. 8:  
Tipos de fotodetectores PIN.



Fuente: (OpenStax, 2022)

## **2.4. Aplicaciones de la fibra óptica**

Entre las aplicaciones de la fibra óptica podemos mencionar:

- ❖ Telecomunicaciones, para la realización de redes de alta velocidad de larga distancia en tecnología WDM, SDH, ATM.
- ❖ Redes de telecomunicaciones nacionales e internacionales.
- ❖ Redes locales en entornos ruidosos.
- ❖ Audiovisual, para la realización de redes de televisión por cable en combinación con el cable coaxial utilizado para la conexión de los abonados.
- ❖ Medicina, donde se utiliza especialmente la fibra óptica:
  - En cirugía, para llevar el rayo láser hasta el tejido a tratar.
  - En endoscopia, para iluminar el interior del cuerpo y transmitir las imágenes al médico.
- ❖ Iluminación (espacios museográficos, arquitectónicos, públicos o domésticos).
- ❖ Ámbito militar: la fibra óptica satisface las necesidades de los lanzadores de misiles ópticos, los sistemas de radar ópticos y los sistemas de control.

## **2.5. Ventajas e inconvenientes de la fibra óptica.**

### **A. Ventajas**

- ✓ Las pérdidas de señal a larga distancia son muy bajas
- ✓ Ancho de banda muy elevado,
- ✓ Inmunidad al ruido,
- ✓ No hay radiación hacia el exterior,
- ✓ No hay diafonía,
- ✓ Las fibras ópticas son insensibles a las radiointerferencias.
- ✓ Aislamiento eléctrico
- ✓ Peso y dimensiones reducidas,
- ✓ Excelente calidad de transmisión,
- ✓ Velocidades de datos muy altas, de hasta 1 Tbps
- ✓ Bajo índice de mantenimiento

✓ Larga vida útil

#### B. Desventajas

✓ Las interfaces eléctricas/ópticas y los conectores son caros

✓ Componentes frágiles

✓ Dificultad de adaptación con transductores optoelectrónicos.

✓ Altos requisitos micromecánicas (conexiones, alineación)

✓ Dificultades de conexión tanto entre dos fibras como entre una fibra y el módulo transmisor o receptor.

### **2.6. Redes ópticas**

Las redes ópticas permiten transmitir señales ópticas en lugar de señales eléctricas en las redes convencionales. Las redes ópticas suelen clasificarse en dos categorías: totalmente ópticas y no ópticas. (Booz, 2018)

#### **2.6.1. Red totalmente óptica (o red transparente)**

Las redes ópticas transmiten la información en forma de señales ópticas en lugar de eléctricas: en este tipo de redes, los datos no se transportan por medio de corrientes eléctricas, sino por medio de la luz.

#### **2.6.2. Red no óptica (o red opaca)**

Una red óptica opaca es una red óptica que requiere conversiones optoelectrónicas de la señal entrante en cada puerto de entrada de un nodo de la red. La señal óptica se convierte en una señal eléctrica en cada nodo. En este tipo de red, la capa óptica sólo se utiliza para transportar una señal óptica entre dos nodos de la red. Esta red no permite una conexión óptica de extremo a extremo.

### **2.7. Características de las diferentes partes de una red de comunicaciones.**

Las redes de comunicaciones pueden subdividirse en tres partes: la red central, la red metropolitana y la red de acceso, tal como se muestra en la

figura 2.9. Estas diferentes partes se caracterizan por el tamaño de sus áreas de cobertura, las tecnologías utilizadas y las funciones a realizar.

### 2.7.1. Red de acceso

La red de acceso conecta a los clientes con las redes de los operadores. En el diseño de las redes de acceso se utilizan diferentes tecnologías, como xDSL, wifi (véase la figura 2.9), Ethernet o FTTH. La red de acceso tiene un alcance inferior a 10 km.

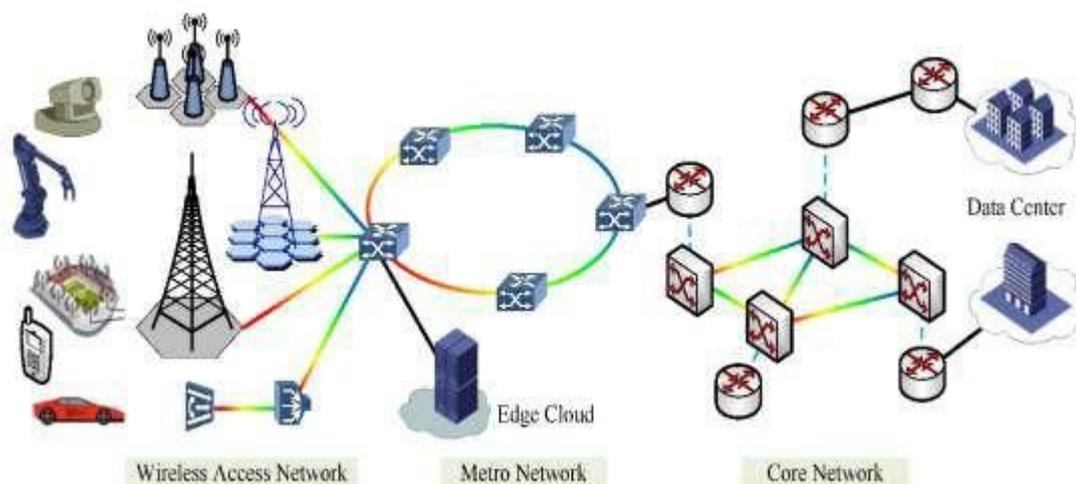
### 2.7.2. Red Metropolitana

La red metropolitana recoge el flujo de información procedente de las redes de acceso y lo transmite a la red central o distribuye el flujo recibido a las diferentes redes de acceso.

### 2.7.3. Red central o core.

La red core interconecta redes metropolitanas entre sí, con Internet y con diferentes redes de otras operadoras. La red core suele tener una topología de malla y se extiende a lo largo de varios kilómetros. Utiliza las últimas tecnologías para aumentar la velocidad de transmisión, ya que transporta una gran cantidad de datos de la red. Tiene una autonomía de más de 100 km.

Figura 2. 9:  
Estructura de una red central o core.



Fuente: Zong et al., (2020)

## 2.8. Clasificación de las redes por zonas geográficas

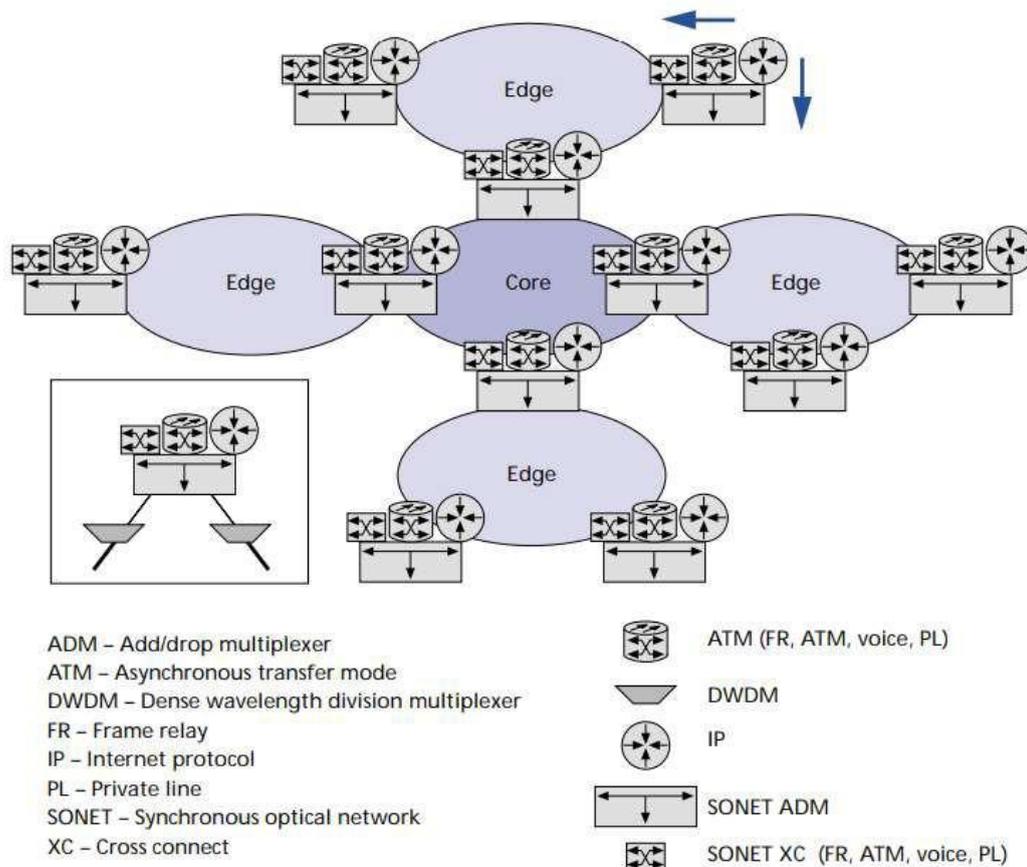
Las redes están clasificadas en tres partes principales en función de su alcance máximo y son descritas en las siguientes subsecciones.

### 2.8.1. Redes de área amplia (WAN)

La Figura 2.10 representa la arquitectura de una red de área amplia (WAN) sobre infraestructura SONET (relacionada a la fibra óptica). Las redes troncales de área amplia (WAN) de los países con gran cobertura geográfica se construyen utilizando jerarquías topológicas y de protocolos. La jerarquía de protocolos incluye el protocolo de Internet (IP), el modo de transferencia asíncrono (ATM), la red óptica síncrona (SONET) y la multiplexación por división de onda (WDM). (Doshi et al., 2002)

Figura 2. 10:

Arquitectura de redes WAN de la jerarquía de protocolos al multiprotocolo sobre SONET.



Fuente: Doshi et al., (2002)

Este sistema puede desplegarse en todo un país o continente y sus nodos consisten en centros urbanos muy grandes. Este tipo de sistema

- ❖ incluye sistemas terrestres o submarinos;
- ❖ transmite datos de alta velocidad a través de largas distancias de más de 100 km
- ❖ utiliza repetidores que pueden regenerar la señal óptica.

Estos repetidores están formados por regeneradores optoelectrónicos 3R (Retemporización, Reenvío, Regeneración) y amplificadores ópticos dopados de erbio (EDFA).

#### **2.8.1.1. Redes terrestres**

El término redes terrestres comprende a las redes que:

- ❖ tienen una extensión aproximada de unos cientos de kilómetros lo que permite interconectar los principales centros urbanos, a través de multiplexores que permiten su extracción.
- ❖ utilizan la topología propia de SDH a través de bucles de doble anillo, lo que permite, ante un fallo de uno de los anillos, dirigir las señales al otro;
- ❖ son muy flexibles con relación a la demanda; aunque actualmente son de 2.5 Gbps, es posible aumentarlas, por medio de la multiplexación DWDM en N canales, hasta  $N \times 2.5$  Gbps o  $N \times 10$  Gbps.

#### **2.8.1.2. Redes submarinas**

Estas redes se definen como aquellas que:

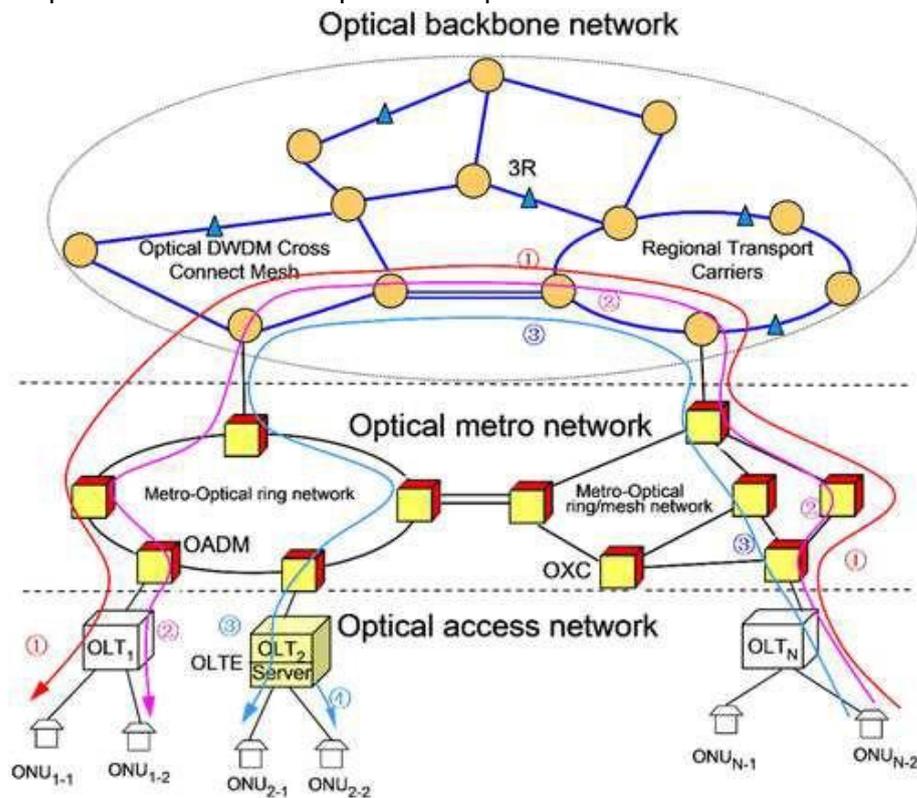
- ❖ pueden extenderse hasta varios miles de kilómetros
- ❖ también pueden conectar islas o países del mismo continente. Por otro lado, resulta más económico instalar cables submarinos en comparación con los subterráneos;
- ❖ utiliza la tercera ventana de la fibra óptica a  $\approx 1550$  nm, donde la atenuación es menor.

No obstante, en los sistemas más modernos se adopta una estructura en anillo para poder redirigir las señales si falla un canal.

#### **2.8.2. Redes de Área Metropolitana (MAN)**

En la Figura 2.11 se muestra un ejemplo de transmisión de servicios. En la PON, la  $ONU_{1-1}$  y la  $ONU_{1-2}$  solicitan a la  $ONU_{N-1}$  el mismo medio de transmisión, por lo que las dos ONUs tienen que establecer conexiones ( $d$  y  $e$ , como se muestra en la figura 2.10) en la red troncal óptica y en la de área metropolitana (MAN) para llevar a cabo la duplicación del servicio, lo que supone un desperdicio de ancho de banda y puede provocar congestiones. (Li et al., 2018)

Figura 2. 11:  
Arquitectura de una red óptica metropolitana.



Fuente: Li et al., (2018)

Sin embargo, en la red óptica pasiva asistida por servidor de contenidos (CSA-PON), la  $ONU_{2-1}$  también establece una conexión con  $ONU_{N-1}$ , pero los servicios se guardan en el servidor de contenidos del terminal de línea óptica-extendida (OLTE) local. Así,  $ONU_{2-2}$  puede obtener los mismos servicios del OLTE local ( $f$  y  $g$  mostrados en la figura 2.11), lo que significa que la conexión entre  $ONU_{2-2}$  y  $ONU_{N-1}$  es innecesaria, y el ancho de banda se libera como resultado. (Li et al., 2018)

En consecuencia, este tipo de red da servicio a las grandes ciudades y sus alrededores:

- ❖ tiene entre 1 y 100 km de longitud;
- ❖ es un tipo reciente, en constante evolución y crecimiento
- ❖ tiene un alto grado de conectividad;
- ❖ utiliza anillos metropolitanos que se caracterizan generalmente por un tráfico en malla con un cierto grado de concentración ligado a la interconexión con la red de larga distancia. Los anillos de acceso suelen recoger el tráfico de varios nodos y concentrarlo en un nodo compartido con una red troncal metropolitana.
- ❖ A diferencia de la WAN, el sistema tiene que admitir numerosos formatos, protocolos y velocidades de transmisión.
- ❖ Permite combinar el tráfico de la jerarquía digital síncrona (SDH) con otros tráficos. Los amplificadores ópticos son esenciales para este tipo de aplicaciones de red;
- ❖ Con frecuencia están equipados a través de tarjetas transpondedores universales, que aceptan cualquier velocidad desde 100 Mbps hasta 2.5 Gbps;
- ❖ Utiliza DWDM, ofreciendo las mismas ventajas que los sistemas de larga distancia
- ❖ Las distancias más pequeñas implican que se necesitan menos amplificadores ópticos, lo que permite ampliar la banda espectral más allá de los amplificadores EDFA y reducir los problemas de dispersión.

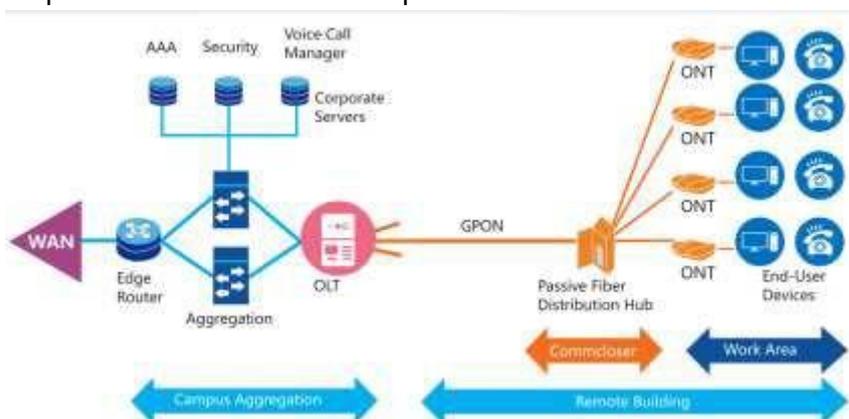
### **2.8.3. La red de área local (LAN)**

El presente trabajo está orientado a las redes óptica pasivas y en esta parte no se trata de una LAN tradicional sino de una red óptica pasiva de área local (Passive Optical Lan, POL). Es decir, que una POL está formada por una red LAN corporativa integrada con tecnología PON para proporcionar a los usuarios los servicios de datos, voz y vídeo, entre otros, a través de la fibra óptica (véase la Figura 2.12). No es una nueva tecnología, al contrario, aplica a la red empresarial la tecnología de red PON que ha sido probada durante mucho tiempo en la red de los ISP. POL puede aportar un

gran valor a los clientes y, al mismo tiempo, no cambiará la planificación empresarial existente ni el modo de conexión a la red de los clientes, y puede proporcionar todas las funciones que ofrece la red LAN tradicional. También llamada red de acceso o de servicio, esta red:

- ❖ tiene una longitud que varía de 2 a 70 m;
- ❖ consta de una parte de fibra entre la central y la terminación de la red óptica, seguida de una parte de conductor metálico que va al terminal del abonado.

Figura 2. 12:  
Arquitectura de una red LAN óptica.



Fuente: (Shenzhen, 2021)

#### 2.8.4. Comparativa entre los tipos de redes por zonas geográficas.

En el ámbito de las redes fijas se distinguen tres tipos de redes, que se diferencian por su cobertura geográfica y sus protocolos de comunicación. En la Tabla 2.2 se muestra la comparación de los tres tipos de redes.

Tabla 2. 2:  
Comparativa entre los tipos de redes ópticas según su cobertura geográfica.

	Redes LAN	Redes MAN	Redes WAN
<b>Cantidad de elementos</b>	un conjunto de equipos, pertenecientes a la misma empresa	Interconexión de múltiples redes LAN	Interconexión de múltiples redes LAN y MAN
<b>Disposición geográfica</b>	las instalaciones están situadas en un perímetro geográficamente restringido	Redes LAN geográficamente cercanas	Distancias muy grandes
<b>Protocolos</b>	Ethernet, Token Ring, FDDI, etc.	FDDI, ATM, SDH, etc.	SDH, SONET, WDM, etc.

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

El presente capítulo se compuso de tres apartados: (1) descripción de la herramienta informática de simulación (OptiSystem), (2) diseño de la red óptica en anillo, basada en fibra óptica monomodo y amplificador de fibra óptica dopada con erbio, y (3) evaluación de los parámetros de la red, interpretación de los resultados de la simulación y la determinación de los mejores parámetros posibles, es decir, cantidad de terminales, potencia transmitida y velocidad de transmisión.

### **3.1. Descripción de la herramienta informática de simulación.**

OptiSystem, se trata de un paquete de software para diseñar, probar y optimizar cualquier tipo de enlace óptico en la capa física sobre un amplio espectro de redes ópticas (MAN y WAN). OptiSystem, resulta ser un simulador de sistemas de comunicaciones de fibra óptica con un potente entorno de simulación y capacidad de definición jerárquica de componentes y sistemas. Además, sus funciones permitirán la escalabilidad gracias a la adición de componentes e interfaces gestionados por los usuarios para una serie de herramientas ampliamente utilizadas.

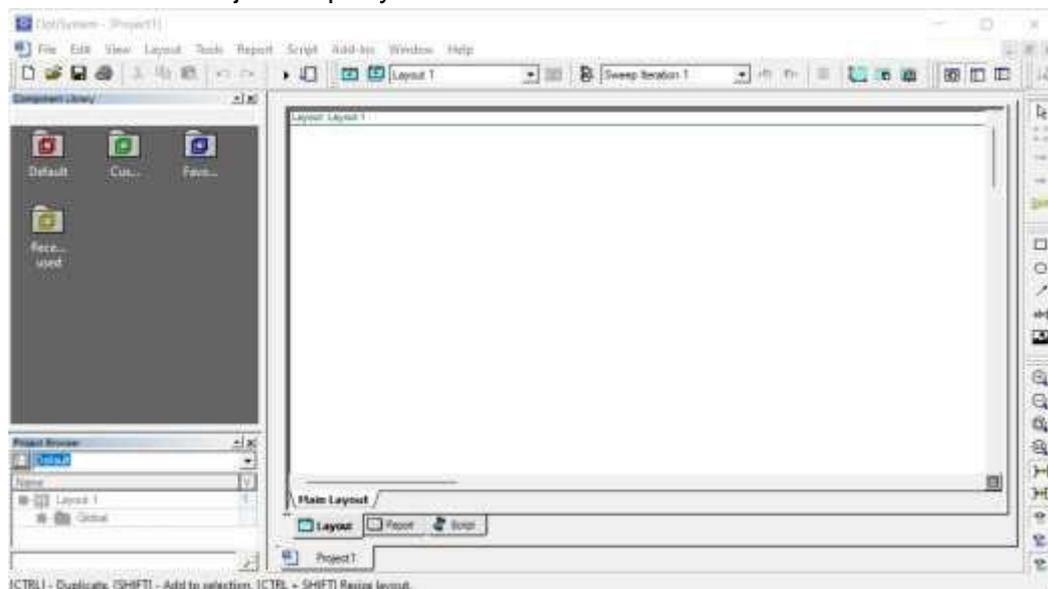
A través de una amplia interfaz gráfica de usuario será posible controlar la disposición de los componentes ópticos, así como los modelos y las gráficas de presentación. En la librería de componentes de OptiSystem se incluyen varios elementos que nos permiten obtener medidas de los dispositivos reales. Así, es posible integrar nuevos elementos basándose en subsistemas establecidos por el usuario a partir de las propias librerías.

OptiSystem permitió combinar los formatos de mensajes de señales ópticas y eléctricas en la librería de componentes. Con el objetivo de responder a las necesidades de científicos, ingenieros de telecomunicaciones en el ámbito de la óptica, especialistas en integración de sistemas, universitarios y demás usuarios, OptiSystem es una herramienta muy eficaz y sencilla de usar en el diseño de sistemas ópticos, para satisfacer las necesidades actuales del mercado en el ámbito de la óptica.

Este programa funciona bajo el sistema operativo Windows y está compuesto principalmente por una ventana de trabajo dividida en varias partes, tal como se muestra en la figura 3.1.

1. Librería: base de información de diversos componentes disponibles.
2. Editor de diagramas: sirve para editar y configurar los diagramas utilizados.
3. Proyecto activo: permite la visualización de diferentes ficheros y componentes pertenecientes al proyecto existente.

Figura 3. 1:  
Ventana de trabajo de OptiSystem.



Elaborado por: Autor.

OptiSystem no es más que un paquete de software para diseñar y modelar componentes ópticos. Durante el diseño, sólo hay que arrastrar el componente desde la librería a la plantilla. En la figura 3.2 se observa un aspecto visual de un componente óptico de la librería OptiSystem, y que en este caso es amplificador de Raman que tiene todos sus parámetros.

### 3.1.1. Características y beneficios del software

- Proveer una visión general del rendimiento general de los sistemas de fibra óptica.
- Analizar las sensibilidades de los parámetros relacionados con las especificaciones de tolerancia del diseño.



con topología de anillo experimenten un mayor dinamismo en el tráfico comparado con la mayoría de las redes existentes a gran distancia. Por otra parte, este tipo de redes prevé que tengan una transparencia óptica en los nodos y un mínimo número de regeneraciones de potencia óptica, lo que puede deberse a varios factores:

1. Las pérdidas de la fibra óptica varían respecto a la longitud de onda.
2. La ganancia es dependiente de la longitud de onda en los amplificadores.
3. Variación de la pérdida de inserción de canal a canal en multiplexores/demultiplexores.

En el caso de la fibra, esta degradación óptica se produce a lo largo de la misma hasta llegar al final del enlace óptico, como consecuencia de la naturaleza dinámica de la red. Los multiplexores Add/Drop denominados <OADM= introducen una pérdida de inserción compuesta por dos partes: determinista y aleatoria. En efecto, las pérdidas varían en función de la longitud de onda. Las pérdidas de la fibra dependen del tipo de fibra y de la longitud de onda. La variación de los tipos de conmutadores ópticos y las diferentes longitudes que hay en la red dan lugar a una pérdida aleatoria, que es difícil de predecir.

### **3.3. Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA en la red propuesta.**

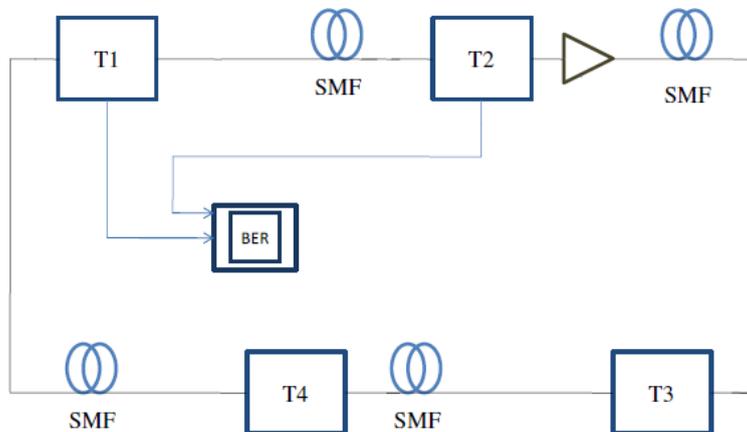
En la figura 3.4 se resume el diagrama esquemático del primer sistema que se utiliza en este trabajo, que consiste en una red en anillo, integrada por cuatro centrales, interconectadas por fibras ópticas cuya atenuación es de 0.25 dB/km, con una longitud de onda de 1550 nm y a una distancia de 200 km, sin ningún otro componente óptico, y que dispone de un amplificador con una ganancia de 53 dB situado justo a la salida de la terminal T2, y de un analizador de BER situado entre dos terminales que nos da los valores del factor de calidad y de la tasa de error de bit (BER).

A continuación, se estudia una red óptica en anillo compuesta por un multiplexor óptico de adición/reducción (ODM), un EDFA y un DCF. En

primer lugar, se añadieron dos amplificadores EDFA para mejorar el sistema en términos de rendimiento y distancia. En segundo lugar, se añadieron dos amplificadores más y cuatro fibras de compensación DCF para conseguir una buena calidad de transmisión. El estudio de estos enlaces nos ha permitido llegar a una conclusión sobre el planteamiento que debe utilizarse para crear una red de fibra en anillo con una tasa de transmisión muy elevada, una distancia bastante grande entre los terminales y la potencia necesaria para hacer llegar la señal al transmisor respetando el factor de calidad y la tasa de error de bits en las redes ópticas.

Figura 3. 3:

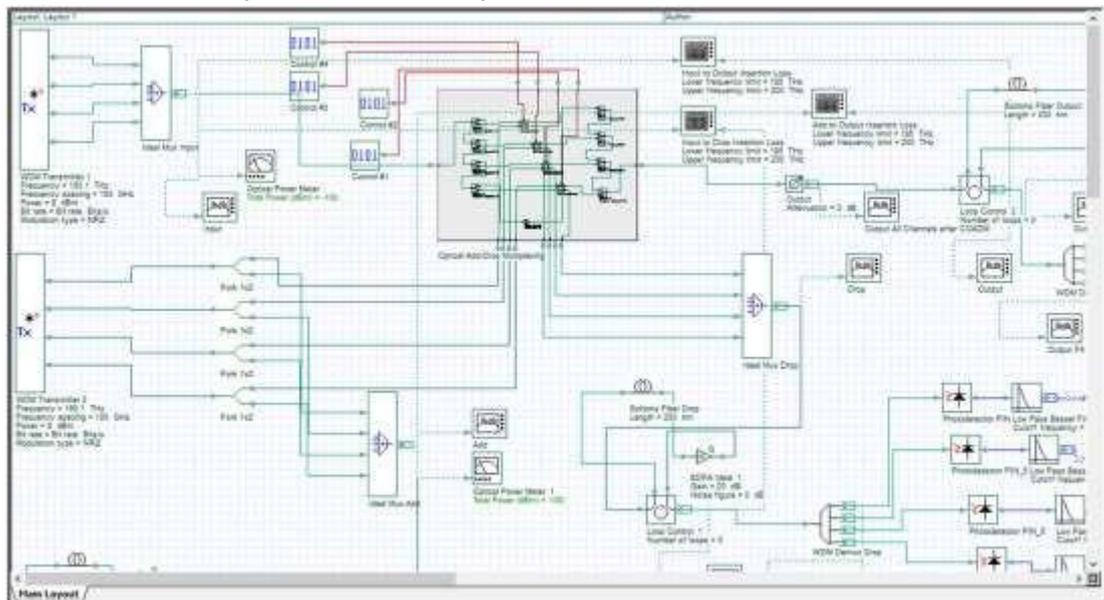
Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica usando multiplexación OADM.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 4:

Diseño de la red óptica usando multiplexación OADM.



Elaborado por: Autor.

A continuación, se describen los elementos más relevantes en el diseño propuesto:

### **1. Generador binario**

Es un generador de secuencias de longitud conocida, de "0s" y "1s" lógicos. Se denomina aleatoria porque es una secuencia arbitraria. Sin embargo, cuando la secuencia llega a su fin, el generador no deja de funcionar. La secuencia ya transmitida se reproduce de nuevo, de ahí el término "pseudoaleatorio", y la velocidad de datos utilizada es de 2.5 Gbps.

### **2. Filtro de Bessel pasa bajo**

El filtro de Bessel es un filtro polinómico omnipolar de orden superior cuya principal característica es ofrecer un retardo de ancho de banda constante. En términos prácticos, esto significa que todas las frecuencias puras, dentro de la banda, pasan a través de ella exactamente al mismo tiempo. Por tanto, el filtro de Bessel minimiza la distorsión que sufre una señal compleja durante una operación de filtrado. La frecuencia de corte de este filtro es de 0.75 Hz.

### **3. Atenuador óptico**

El atenuador es un dispositivo para reducir la amplitud y energía de una señal a través del medio (corriente, tensión o, más a menudo, potencia). La atenuación es de 3.8 dB.

#### **3.3.1. Resultados de la simulación 1.**

Este trabajo consiste fundamentalmente en la variación de parámetros de la red, por ejemplo, la longitud de la fibra óptica, la tasa de bits, el número de terminales y la potencia transmitida, y en evaluar la calidad del enlace. Para estudiar la calidad de transmisión de un enlace, son importantes dos parámetros: el factor de calidad (Q) y la tasa de error de bits (BER).

- **Calidad de transmisión de un enlace:** para definir la calidad de una transmisión óptica, existen varios criterios. Los dos principales criterios de calidad de una señal transmitida son la tasa de error de bits BER y el factor de calidad Q. Estos dos criterios se describen a continuación.

- **Tasa de error de bits (BER):** la tasa de error de bits se expresa en potencia negativa. El método para evaluar el rendimiento de un sistema consiste en comparar los bits enviados con los recibidos.

$$BER = \frac{\text{Bits errāneās}}{\text{Bits transmīdās}}$$

Aunque la BER es una cantidad medible, no puede estimarse con un software de simulación. Este último considera la propagación de la onda óptica en la fibra y calcula la onda óptica de salida teniendo en cuenta las distintas degradaciones de la onda durante su propagación. Además, en una simulación sólo se utilizan unos pocos bits, por lo que es imposible contar los errores y obtener estadísticas satisfactorias. La BER que se suele aceptar para una transmisión de buena calidad es inferior a  $10^{-9}$  o incluso a  $10^{-12}$ .

- **El factor de calidad:** este método permite cuantificar y evaluar la señal sin tener que contar directamente los errores. Se basa en la hipótesis gaussiana de la distribución del ruido de amplitud para cada símbolo. Si se supone que el ruido es gaussiano y se conocen las tensiones medias ( $V_0$  y  $V_1$ ) y las varianzas ( $\sigma_1$  y  $\sigma_0$ ) de los niveles "0" y "1", el factor de calidad (Q) viene dado por:

$$\hat{y} = \frac{V_1 - V_0}{\sigma_1 - \sigma_0}$$

En la práctica, se elige un umbral de discriminación  $V_T$  para distinguir entre "1" y "0"; este umbral se elige en el punto medio y corresponde al que da la BER con "0" y "1" equiprobables ( $\sigma_1 = \sigma_0 = \sigma$ ). Por lo tanto:

$$\hat{y} = \frac{V_T - V_0}{\sigma}$$

Otro parámetro utilizado para cuantificar la calidad de la transmisión es el factor Q, que se relaciona con la BER por:

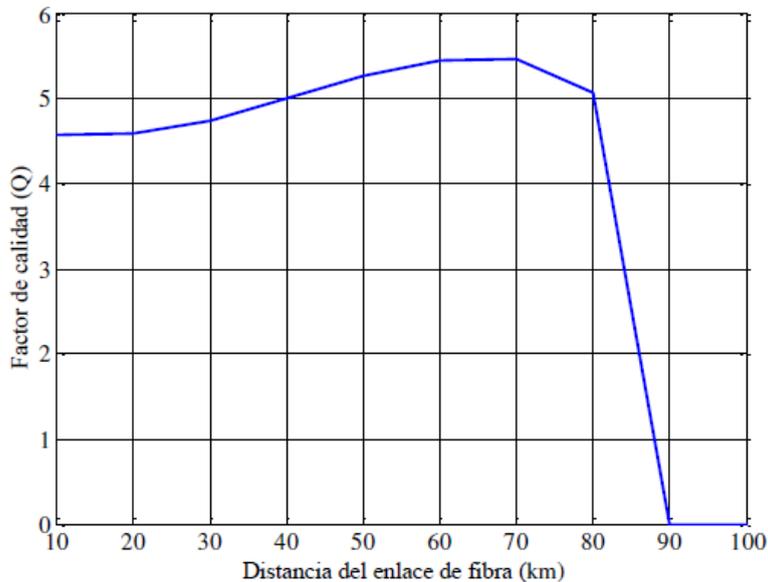
$$BER = \frac{1}{2} [\text{erfc}(\frac{\hat{y}}{\sqrt{2}})]$$

Donde erfc es la función de error complementaria.

Utilizando un formato de codificación de no retorno a cero (NRZ), con tasa de bits de 2.5 Gbps, se obtienen el factor de calidad, así como la tasa de error de bits (BER) en función de la longitud de la fibra óptica, tal como se muestran en las figuras 3.5 y 3.6.

Figura 3. 5:

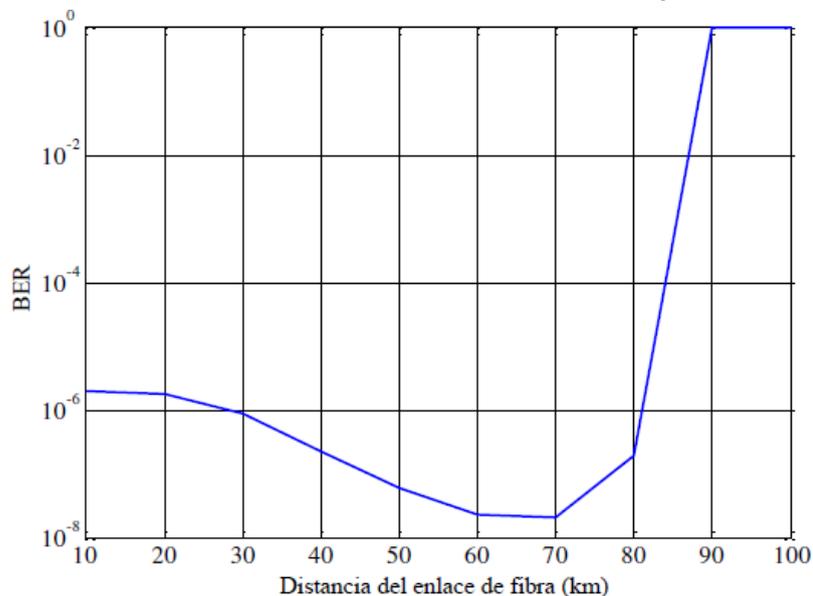
Resultado obtenido del factor de calidad en función de la longitud de la fibra óptica.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 6:

Resultado obtenido de la BER en función de la longitud de la fibra óptica.



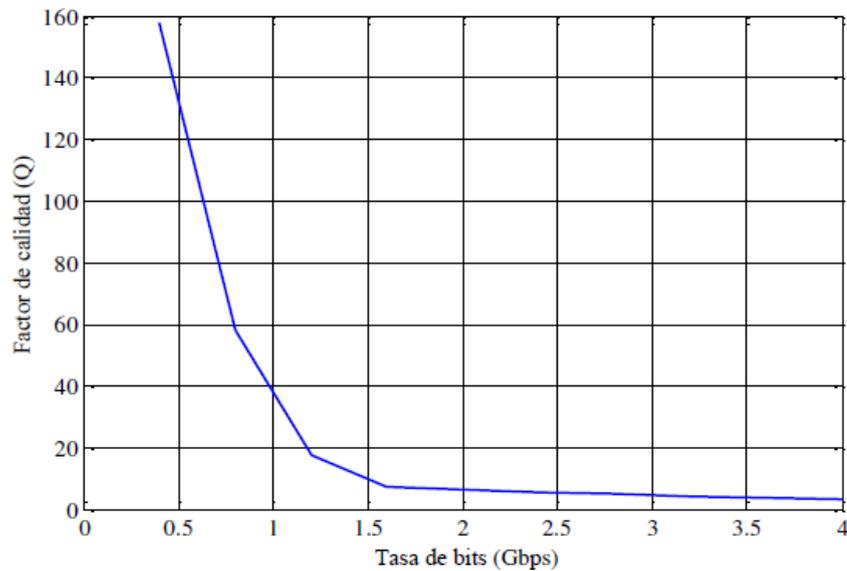
Elaborado por: Autor.

En cuanto a la calidad de transmisión, se observa un mejoramiento al incrementar la longitud de la SMF, hasta la longitud 80 Km donde se observa

una degradación con una  $BER = 10^{-17}$  y  $Q=5$ , en cuanto a la mejor calidad de transmisión, ésta se obtiene con  $L=70$  Km con una  $BER = 10^{-18}$  y  $Q=5.4$ , estos resultados no son satisfactorios, ya que no se alcanzó el objetivo, y es necesario efectuar cambios en la red para alcanzar el objetivo fijado. Además, se ha realizado otra prueba de la calidad de la transmisión en función de la velocidad de transmisión, para  $L=50$  Km, cuyos resultados se muestran en las figuras 3.7 y 3.8.

Figura 3. 7:

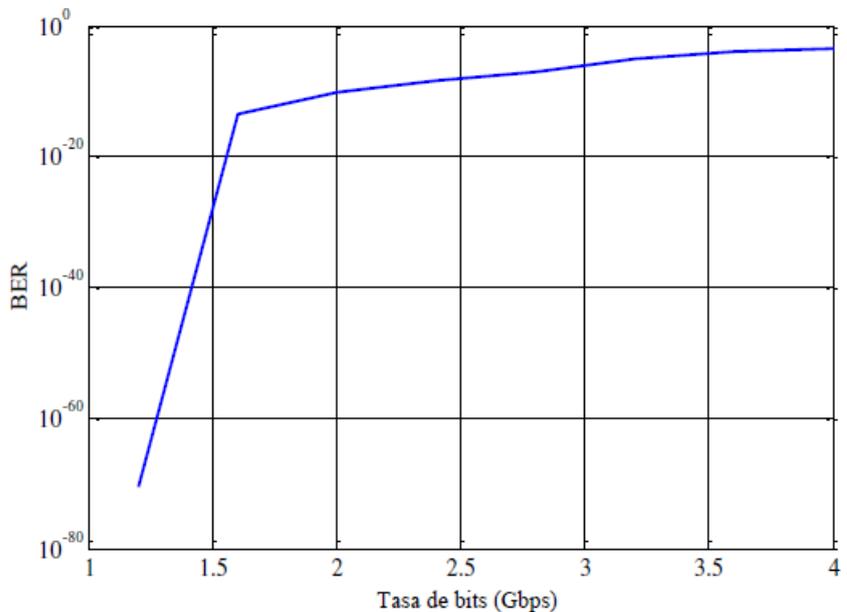
Resultado obtenido del mejoramiento del factor Q en función de la tasa de bits.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 8:

Resultado obtenido del mejoramiento de la BER en función de la tasa de bits.



Elaborado por: Autor.

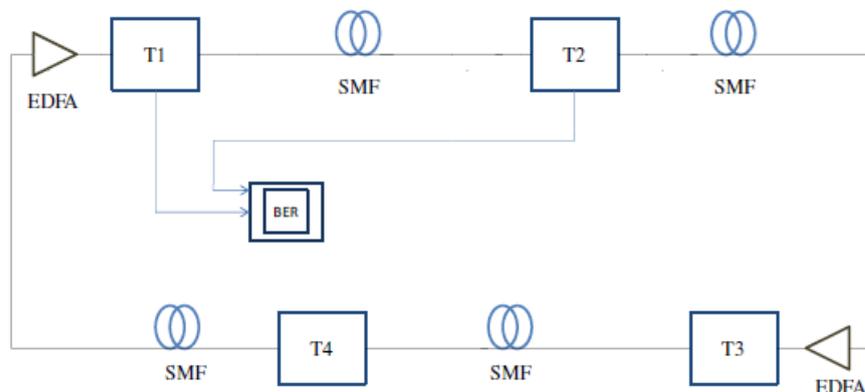
Aunque se obtiene una mejor BER a una tasa de datos de 1,2 Gbps, es posible mejorar el enlace, y por ello se probará otra configuración a continuación se analiza en la sección 3.4.

### 3.4. Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA y de la fibra compensador de dispersión (DCF) en la red propuesta.

En la figura 3.9 se muestra la configuración de la red modificada con la adición de dos amplificadores EDFA, para compensar las pérdidas de los 4 terminales, pero conservando los mismos parámetros de los demás componentes utilizados en el primer sistema. Para empezar, se variará la longitud de la fibra monomodo entre dos terminales consecutivos (véase los resultados en las figuras 3.10 y 3.11), y después se modificará la velocidad de datos (véase los resultados en la figura 3.12 y 3.13) y se evaluará la calidad de la red, para comprobar el efecto de los amplificadores EDFA.

Figura 3. 9:

Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 2 EDFA) usando multiplexación OADM.



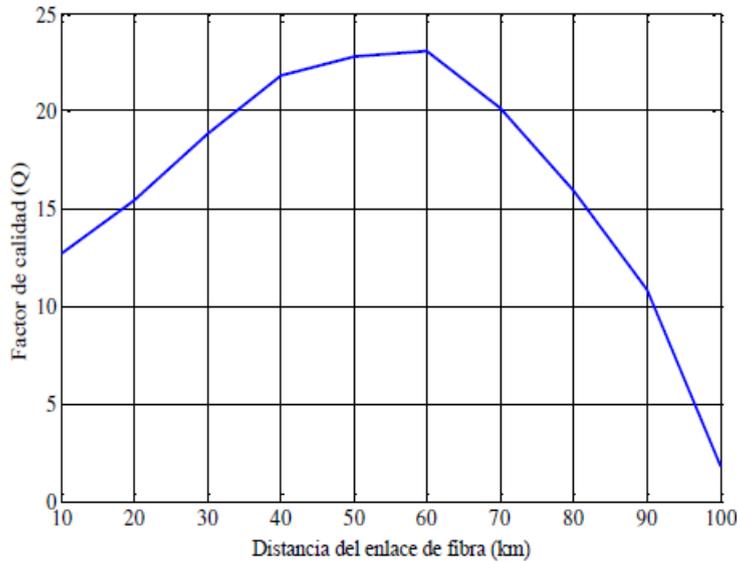
Elaborado por: Autor.

#### 3.4.1. Resultados obtenidos del escenario de simulación con amplificadores EDFA y DCF.

En la figura 3.10 se puede observar que con un enlace de fibra óptica de 60 km se obtiene el mejor resultado, en la que el factor de calidad (Q) es 23.1, y un máximo valor de  $BER = 10^{-118}$ . Además, se puede ver que, para enlaces superiores a 90 km de longitud de fibra óptica, la calidad del enlace se degrada considerablemente y también disminuye la  $BER = 10^{-25}$ .

Figura 3. 10:

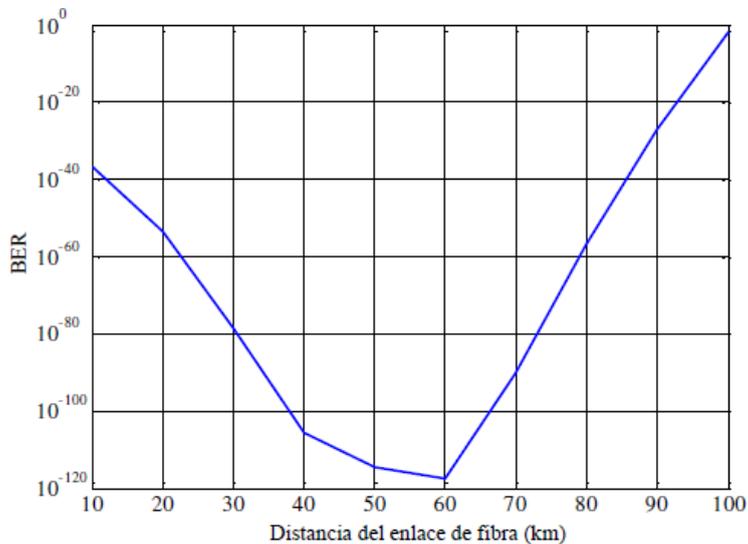
Resultado obtenido del factor Q en función de la longitud de la fibra óptica para la red modificada con 2 EDFA.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 11:

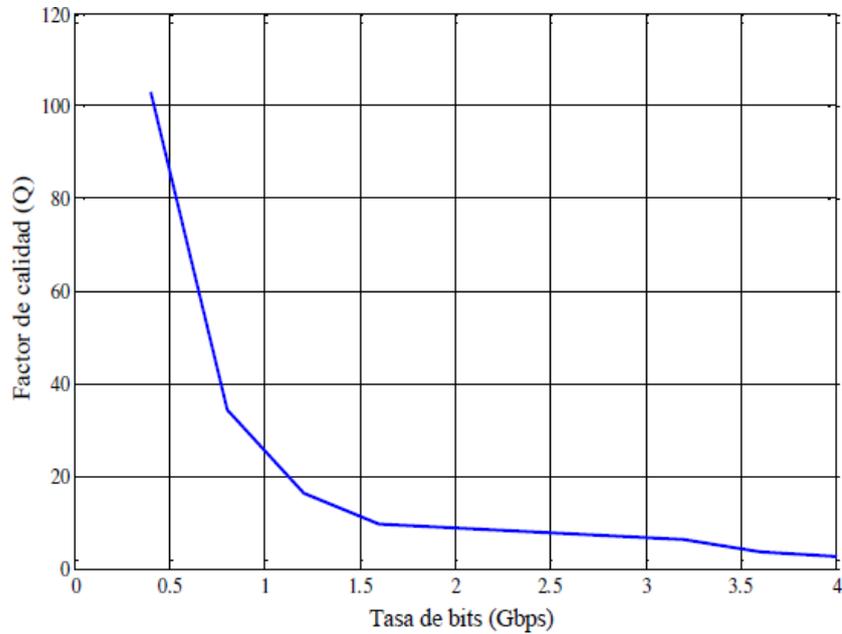
Resultado obtenido del BER en función de la longitud de la fibra óptica para la red modificada con 2 EDFA.



Elaborado por: Autor.

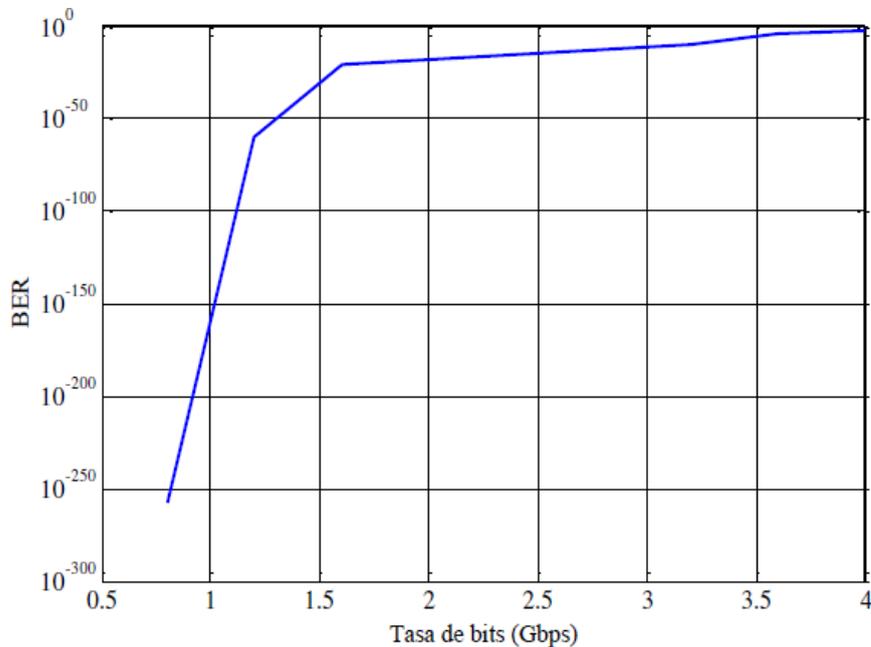
Ahora, se analiza el diseño en función de la tasa de transmisión de la red óptica usando multiplexación AODM. Se puede observar en las figuras 3.12 y 3.13 que se produce una disminución del factor de calidad, que es inversamente proporcional a la tasa de datos, y un incremento de la BER, que puede alcanzar una tasa máxima de 2.5 Gbps para una buena calidad de la señal recibida cuyo valor máximo de la BER es  $10^{-10}$ .

Figura 3. 12:  
Resultado obtenido del factor Q en función de la tasa de bits para la red modificada con 2 EDFA.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 13:  
Resultado obtenido del BER en función de la tasa de bits para la red modificada con 2 EDFA.



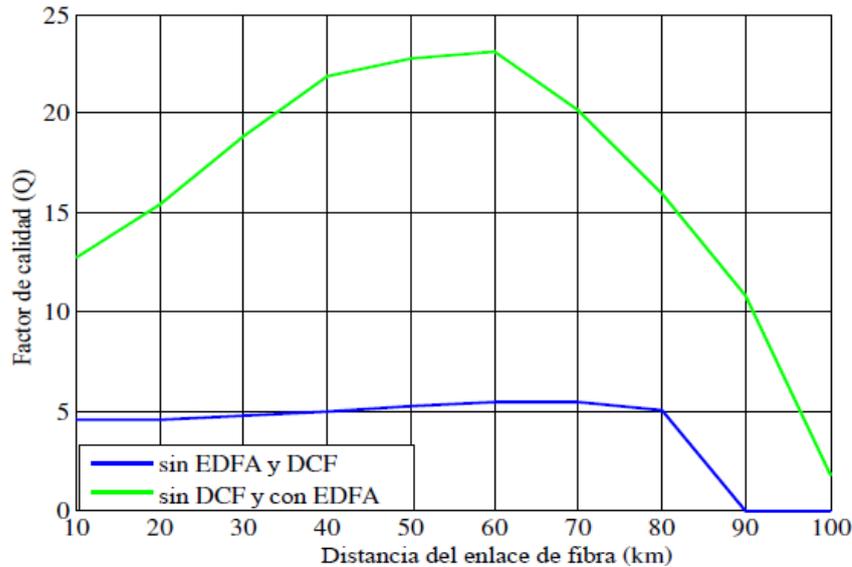
Elaborado por: Autor.

A continuación, la configuración descrita en este escenario de simulación puede ser comparada con el primer experimento o escenario de simulación, por lo que los resultados comparativos en función de la distancia

del enlace de la fibra óptica (véase las figuras 3.14 y 3.15) y de la tasa de bits (véase las figuras 3.16 y 3.17). En las figuras 3.14 y 3.15 se observa que el sistema modificado (añadiendo un amplificador óptico dopado de Erblio, EDFA) ha cumplido el propósito de mejorar notablemente la calidad de servicio (Q) y la BER, respectivamente.

Figura 3. 14:

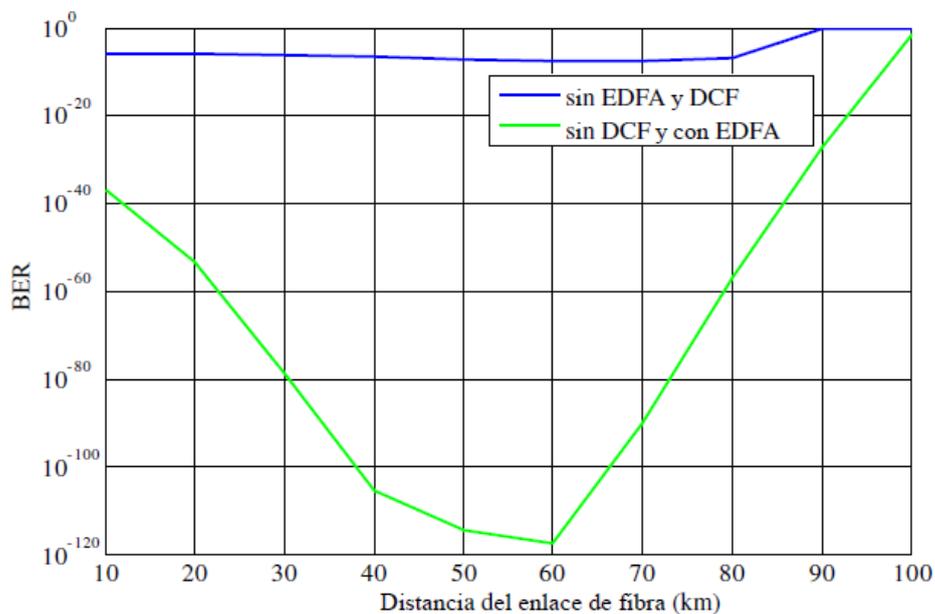
Comparativa del factor Q entre los dos escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 15:

Comparativa de la BER entre los dos escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.

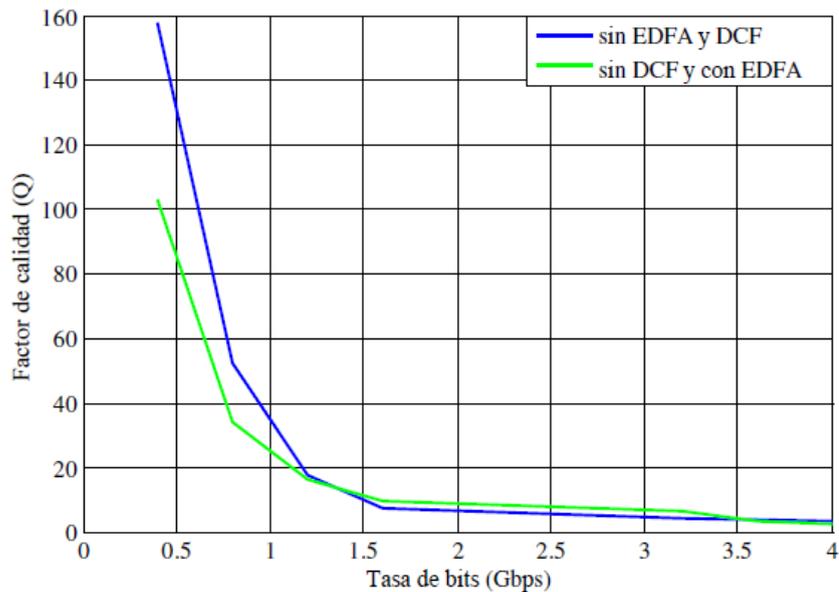


Elaborado por: Autor.

Según las dos primeras curvas, hay una clara superioridad del segundo sistema, con una BER de  $10^{-120}$ . Si se observan las figuras 3.16 y 3.17, a una baja tasa de bits (1.2 Gbps) el primer sistema funciona bien, pero a medida que la tasa de bits aumenta, el segundo sistema funciona ligeramente mejor, por lo que se puede afirmar que el EDFA ha mejorado el sistema en términos de tasa de bits.

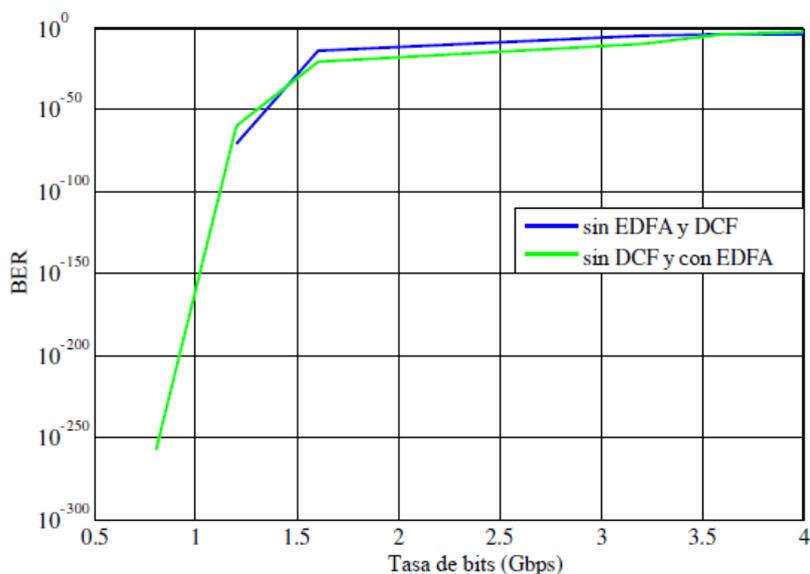
Figura 3. 16:

Comparativa del factor Q entre los dos escenarios de simulación en función de la tasa de bits.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 17: Comparativa de la BER entre los dos escenarios de simulación en función de la tasa de bits.



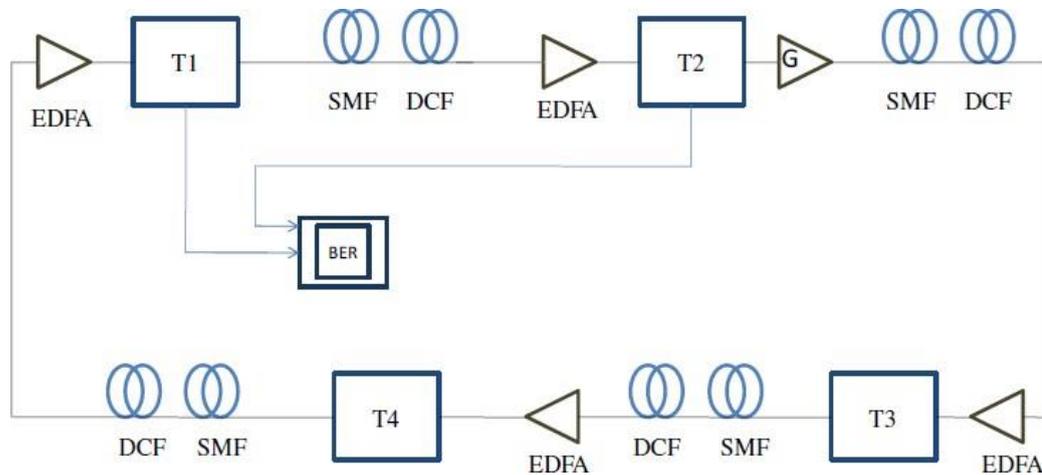
Elaborado por: Autor.

### 3.5. Influencia que ejerce los amplificadores ópticos EDFA y fibra DCF en la red propuesta.

En esta sección se modifica la red propuesta en las secciones 3.3 y 3.4 en la que se añade más amplificadores y se incorpora en cada terminal fibras compensativas de dispersión (DCF). A continuación, la figura 3.18 representa otra configuración de la red con la incorporación de dos amplificadores más para dar un total de cuatro, y cuatro fibras DCF. Entre dos terminales consecutivos hay una fibra SMF, un amplificador EDFA y finalmente una fibra DCF.

Figura 3. 18:

Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM.



Elaborado por: Autor.

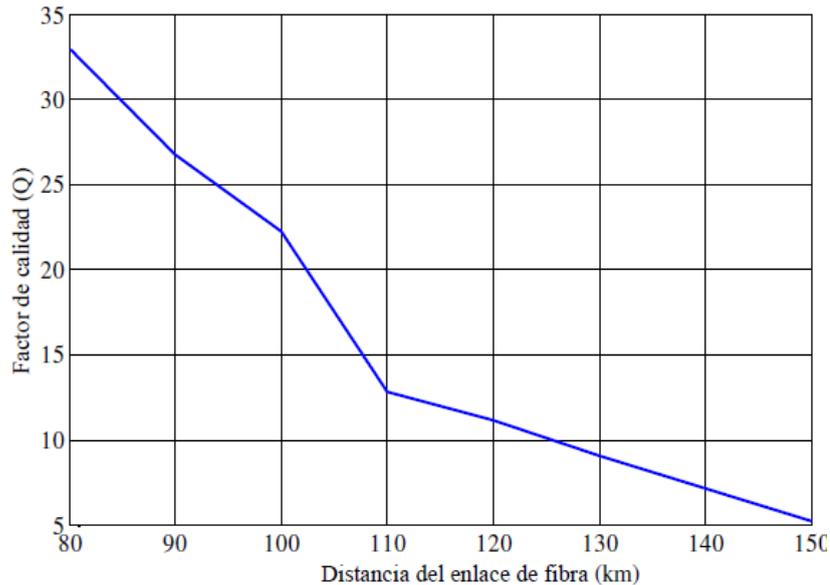
#### 3.5.1. Resultados obtenidos del escenario de simulación con amplificadores EDFA y fibra DCF.

El sistema propuesto se configura a una tasa de bits de 2.5 Gbps y también se fue variando la longitud de la fibra óptica monomodo (SMF). Las figuras 3.19 y 3.20 representan la influencia que tiene la longitud del enlace sobre la calidad de la señal (factor Q) y de la BER. En la figura 3.19 se observa, que a medida que se incrementa la longitud del enlace, se reduce el factor de calidad Q del sistema propuesto. En la figura 3.20 se observa que a medida que aumenta la longitud del enlace de fibra se incrementa la BER.

La figura 3.21 presenta el comportamiento del factor Q en función de la tasa de transmisión de datos para un enlace de fibra de 50 km. En la figura 3.17 se muestra un incremento del factor Q con una velocidad de 1.2 Gbps, después del cual se produce una degradación del factor. La máxima tasa de bits llega a 11 Gbps, y el factor Q es aproximadamente 7.

Figura 3. 19:

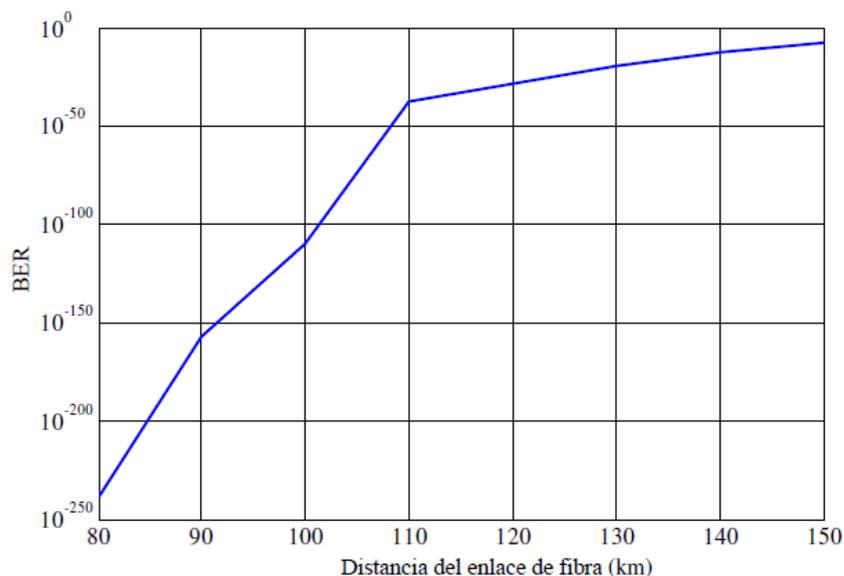
Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 20:

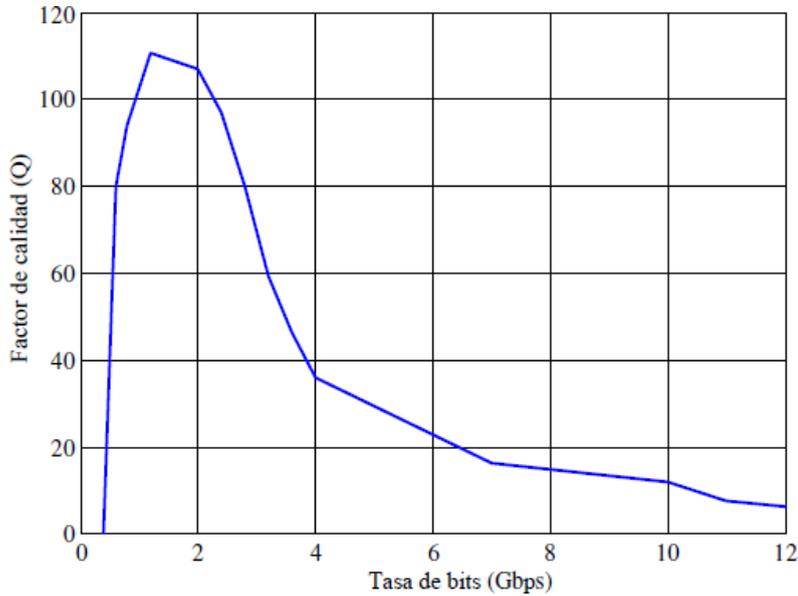
Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 21:

Diagrama esquemático del sistema propuesto de una red óptica modificada (adición de 4 EDFA y 4 DCF) usando multiplexación OADM.

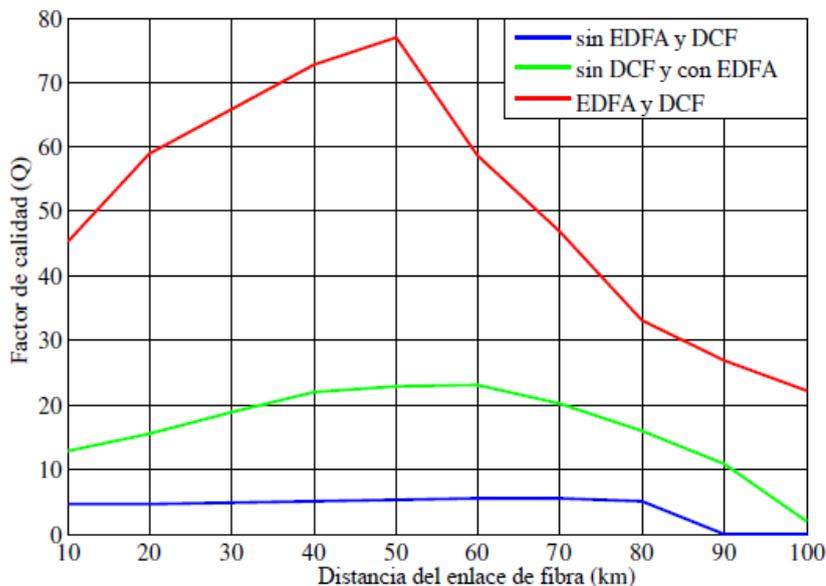


Elaborado por: Autor.

A continuación, se realizan gráficas comparativas basada en las tres configuraciones (secciones 3.2 a 3.4 de resultados obtenidos) tal como se muestran en las figuras 3.22 a 3.25. Las figuras 3.22 y 3.23 representan la influencia de la variación de la longitud de la fibra SMF con relación a la calidad de la transmisión y la BER.

Figura 3. 22:

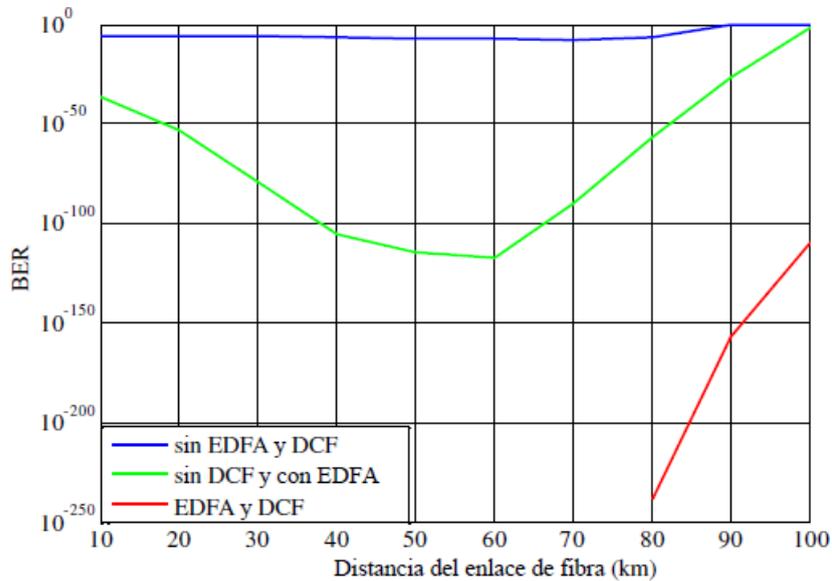
Comparativa del factor Q entre los tres escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.



Elaborado por: Autor.

Figura 3. 23:

Comparativa de la BER entre los tres escenarios de simulación en función de la distancia del enlace de la fibra.

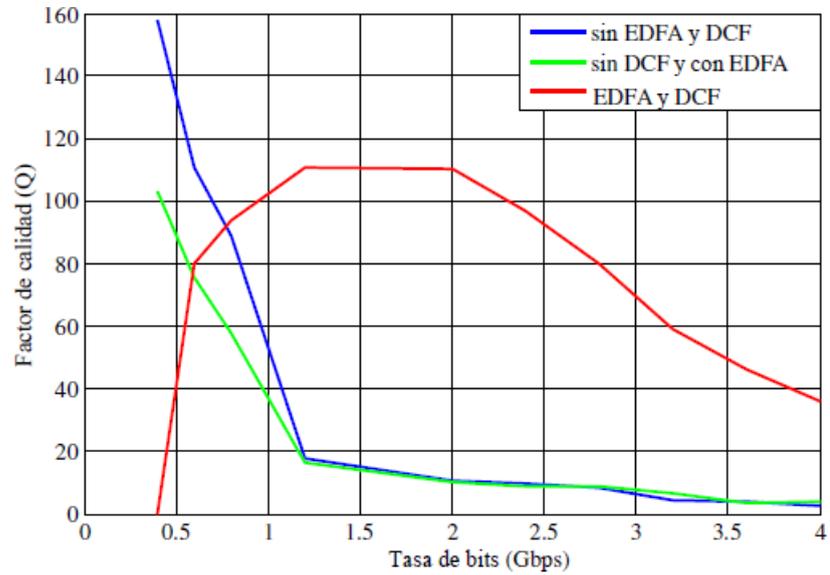


Elaborado por: Autor.

En el caso de la primera figura (factor Q) se puede afirmar que, con respecto a las tres curvas, el mejor valor de transmisión corresponde a 50 km, aunque en realidad esta distancia entre dos terminales consecutivos no es la real, puesto que hay que tener en cuenta la longitud del amplificador EDFA, prácticamente despreciable, y especialmente la longitud de la fibra DCF, equivalente a 1/5 de la longitud de la fibra SMF, así que para una longitud de fibra de 50 km, la distancia entre terminales será de 60 km.

En la figura 3.24 puede observarse el comportamiento de la calidad de transmisión en función de la velocidad de transmisión. Obsérvese que, a velocidades de datos menores de 0.8 Gbps el enlace sin fibra DCF y amplificador EDFA es mejor, en cambio cuando el sistema tiene añadido amplificador EDFA y DCF resulta ser más eficaz para velocidades de datos mayores. También se observa cómo el primer sistema admite velocidades de datos de 1.5 Gbps (buena calidad de transmisión), mientras que el segundo sistema se puede llegar a 3.5 Gbps y la última configuración puede alcanzar velocidades de datos muy superiores, es decir, en el orden de 16 Gbps.

Figura 3. 24:  
Comparativa del factor Q entre los tres escenarios de simulación en función de la tasa de bits.



Elaborado por: Autor.

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

### **4.1. Conclusiones.**

- A través de la revisión bibliográfica de los fundamentos teóricos de los sistemas de comunicaciones por fibra óptica se caracteriza el modelo de red óptico que se propone en el capítulo 3 mediante simulación en OptiSystem aplicando la técnica de multiplexación AODM.
- Mediante los diseños de escenarios de simulación propuestos se logra implementar el sistema de comunicación por fibra óptica sin y con amplificadores ópticos, lo que permite mejorar el rendimiento de la red para enlaces ópticos superiores a los 20 km de distancia.
- Para los resultados obtenidos en los escenarios de simulación de determinan diferentes métricas para varios parámetros de evaluación, dando como resultado el mejor rendimiento de la red usando amplificadores ópticos y multiplexación AODM.

### **4.2. Recomendaciones.**

- Motivar a los futuros profesionales de telecomunicaciones al uso de herramientas de simulación, debido a que en el ámbito laboral se utilizan diferentes plataformas mediante el uso de tecnologías de la información en la que existen empresas de telecomunicaciones a nivel nacional e internacional que contratan profesionales de telecomunicaciones para trabajos remotos en la que utilizan herramientas para controlar y monitorear las redes de comunicaciones móviles.
- El presente trabajo permite orientar a los estudiantes de la carrera de telecomunicaciones a realizar cursos extracurriculares de certificaciones en networking (CCNA, CCNP), en Ciberseguridad (CISA), en programación avanzada en Python, Azure aplicando Machine Learning. Todas estas herramientas son requisitos en las nuevas ofertas de trabajos para los ingenieros en telecomunicaciones,

y en la que la UCSG debería generar estos cursos de educación continua.

## REFERENCIAS

- Abadía S., D. (2017). *Diseño e implementación de un módulo para simular fibras de pocos modos* [Trabajo Final de Máster]. Universitat Oberta de Catalunya.
- Addanki, S., Amiri, I. S., & Yupapin, P. (2018). Review of optical fibers-introduction and applications in fiber lasers. *Results in Physics*, 10, 743–750. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.028>
- Booz, I. M. (2018, octubre 22). *Fibre to the Home and Passive Optical Network | FTTH and PON - Latest News on Educational and Technical Era*. <https://imbooz.com/technical-articles/fibre-to-the-home-and-passive-optical-network-ftth-and-pon/>
- 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 G., 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>
- Doshi, B. T., Nagarajan, R., Prasanna, G. N. S., & Qureshi, M. A. (2002). Future WAN architecture driven by services, traffic volume, and technology trends. *Bell Labs Technical Journal*, 6(1), 13–32. <https://doi.org/10.1002/bltj.2261>
- Geo. (2022). *Sistemas de Telecomunicación: Tema 1—Historia de las Telecomunicaciones*. Universidad de Valencia. <https://www.uv.es/~hertz/hertz/Docencia/teoria/Historia.pdf>

- Hernandez-Garcia, J., Estudillo-Ayala, J. M., Rojas-Laguna, R., Mata Chavez, R., Martinez-Rios, A., Gutiérrez, J., Trejo Duran, M., Vargas-Rodriguez, E., Lucio, J., & Méndez, E. (2010). Instrumentación y diseño de una fuente de alto voltaje para fabricar rejillas de fibra óptica mediante la técnica de arco eléctrico. *Revista Mexicana de Física*, 56, 255.
- Li, H., Yin, H., & Lin, S. (2018). A novel optical network model for network burden release and congestion reduction based on passive optical network. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 14(10), 155014771880765. <https://doi.org/10.1177/1550147718807652>
- Mora S., J., & Samaniego M., E. (2021). *Fundamentos de Telemática*. Grupo Compás. <https://www.uteq.edu.ec/doc/investigacion/libros/72.pdf>
- Nieto, A. (2019). Beneficios y oportunidades de la fibra óptica. *eSemanal - Noticias del Canal*. <https://esemanal.mx/2019/12/beneficios-y-oportunidades-de-la-fibra-optica/>
- Núñez, G., Jordán, V., & Rojas, F. (2020). Las oportunidades de la digitalización en América Latina frente al Covid-19. *CEPAL - Secretaria Técnica del ELAC*, 36.
- OpenStax. (2022). *Total Internal Reflection*. Physics LibreTexts. [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College\\_Physics/Book%3A\\_College\\_Physics\\_\(OpenStax\)/25%3A\\_Geometric\\_Optics/25.04%3A\\_Total\\_Internal\\_Reflection](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/Book%3A_College_Physics_(OpenStax)/25%3A_Geometric_Optics/25.04%3A_Total_Internal_Reflection)
- Panda Ancha. (2015). *Fibra óptica, ¿qué es?: Tipos, Características y Ventajas* [Internet]. Tecnología. <http://www.pandaancho.mx/noticias/fibra-optica-caracteristicas-ventajas.html>

Shenzhen. (2021, enero 12). Passive Optical LAN(POL) and application prospect. *C-DATA*. <https://ru.cdadataec.com/passive-optical-lanpol-application-prospect/>

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>

Zong, Y., Feng, C., Guan, Y., Liu, Y., & Guo, L. (2020). Virtual Network Embedding for Multi-Domain Heterogeneous Converged Optical Networks: Issues and Challenges. *Sensors*, 20(9), 2655. <https://doi.org/10.3390/s20092655>

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Rivera Aguilar Joel Israel**, con C.C: # 0929434637 autor del **componente práctico del examen complejo, Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem**, previo al 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, 15 de febrero del 2023

f.   
Nombre: Rivera Aguilar, Joel Israel  
C.C: 092943463-7

## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

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

<b>TÍTULO Y SUBTÍTULO:</b>	Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem		
<b>AUTOR(ES)</b>	Rivera Aguilar, Joel Israel		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Zamora Cedeño, Néstor Armando Mgs.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>PROGRAMA:</b>	Ingeniería en Telecomunicaciones		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero en Telecomunicaciones		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	15 de febrero del 2023	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	41
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Fundamentos de Comunicación, Comunicaciones Ópticas		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Comunicaciones, Fibra, Calidad, Velocidad, Amplificador, Compensación.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT (150–250 palabras):</b>	<p>El presente trabajo se basó en la &lt;Evaluación de un sistema de comunicación óptica mediante técnica de multiplexación AODM utilizando software OptiSystem=. Desde este contexto, la finalidad que persiguió este proyecto fue identificar las mejoras que aportan la fibra óptica monomodo (SMF), los amplificadores EDFA y las fibras DCF en términos de calidad de servicio (factor Q) y tasa de error de bits (BER). En consecuencia, el presente trabajo de examen complejo se centra más exactamente en el estudio de la red óptica usando la técnica de multiplexación OADM, y que se dividió en tres capítulos, el primero se basó en las generalidades relativas del examen complejo, el segundo se caracterizó la fibra óptica, así como las distintas características y componentes de la cadena de transmisión óptica. Finalmente, en el capítulo 3 se presentó el diseño de simulación y evaluación de los resultados obtenidos de la red de comunicación óptica sin y con amplificadores EDFA y fibras DCF..</p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	SI	NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-9-60419483 <input type="checkbox"/>	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:ioel_14_1992@hotmail.com">ioel_14_1992@hotmail.com</a>	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE):</b>	<b>Nombre:</b> CELSO BAYARDO BOHORQUEZ ESCOBAR		
	<b>Teléfono:</b> 0995147293		
	<b>E-mail:</b> <a href="mailto:celso.bayardo@cu.ucsg.edu.ec">celso.bayardo@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>			