

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN**

**MENCIÓN REDES DE COMUNICACIONES**

**TEMA:**

**ESTUDIO DE UN SISTEMA A 400 GB/S PARA CONEXIÓN DE DATA CENTERS  
A HÍPER ESCALA**

**AUTOR: LEOPOLDO WLADIMIR COQUE LOROÑA**

**DIRECTOR: Dr. GERMAN AREVALO B. (PHD)**

**Quito, 2021 MARZO**

## **DEDICATORIA**

Doy gracias a Dios porque abrió las puertas para empezar con este Trabajo de Titulación, todo esto se lo debo a Dios porque sé que siempre ha estado a mi lado guiando y bendiciendo grandemente para realizar este estudio.

Este logro es dedicado a mis padres, por ser el pilar fundamental en mi vida para lograr una meta más, siempre estaré agradecido por los padres que Dios me dio, y de igual manera porque siempre estuvieron dándome esas fuerzas necesarias para culminar con este gran objetivo.

De igual manera agradezco a mi novia Jessy que estuvo cuando más la necesité, día y noche dándome su apoyo en todo lo necesario para poder terminar este Trabajo de Titulación.

Me fue bien en la competencia:

he peleado bien,

he terminado la carrera

y no he perdido la fe.

2 Timoteo 4:7

## **AGRADECIMIENTO**

En el proceso de la realización del Proyecto de Titulación agradezco al Dr. German Arévalo B. (PHD) por brindar su conocimiento profesional, ya que con su asesoramiento fue una guía muy importante para cumplir mi objetivo.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Dedicatoria.....	II
Agradecimiento.....	III
Resumen.....	XII
Abstract.....	XIII
Problemática.....	XIV
Justificación.....	XV
Antecedentes.....	XVI
Objetivos.....	XVIII
Objetivo General.....	XVIII
Objetivos Específicos.....	XVIII
CAPÍTULO I.....	1
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	1
Centro de Datos de Interconexión (DCI).....	1
Centro de datos a híper escala.....	2
Fibra Óptica.....	5
La Fibra Óptica ofrece:.....	5
Componentes de la fibra Óptica.....	6

Tipos de Fibra Óptica: .....	6
Fibra Óptica Multimodo .....	7
Fibra Óptica Monomodo.....	8
Receptores Ópticos .....	9
Tipos de fotodiodos .....	10
Fotodiodo PIN (Positiva Intrínseca Negativa).....	10
Fotodiodo APD (Fotodiodo de Efecto Avalancha).....	11
Parámetros de transmisión.....	11
Tasa de Errores de Bit (BER) .....	11
Diagrama de Ojo.....	12
Modulación .....	13
Modulación de Señales Ópticas.....	13
Modulación de intensidad.....	14
Modulación de fase.....	16
Redes de alta velocidad.....	17
Ethernet.....	17
400G Ethernet .....	19
Velocidades a más de 400G.....	22
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>24</b>
<b>ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES 400 G</b> .....	<b>24</b>

CAPÍTULO III.....	34
DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA A 400G .....	34
Introducción a Matlab.....	34
Optsim.....	36
Técnica de Propagación Espectral (SPT).....	37
Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS) .....	38
Configuración para la creación de la co-simulación en Optsim y Matlab.....	38
Simulación y configuración de los parámetros .....	45
Elementos para la simulación del Sistema.....	46
Láser CW lorentzian .....	46
Modulador óptico de amplitud.....	47
Enlace de fibra óptica .....	47
Rejilla de fibra .....	48
Atenuador óptico.....	49
Fotodiodo PIN.....	50
Sonda eléctrica.....	51
Medidor de potencia óptica.....	52
CAPÍTULO IV .....	53
ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	53
CONCLUSIONES .....	60

RECOMENDACIONES.....61

Referencias.....62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Figura 1. Centro de datos de Interconexión .....	1
Figura 2. Evolución de las velocidades de Ethernet .....	3
Figura 3. Doble portadora a 400G .....	4
Figura 4. 400 gigabit Ethernet .....	4
Figura 5. Portadora única a 400G .....	5
Figura 6. Estructura de la Fibra Óptica.....	6
Figura 7. Tipos de Fibra Óptica .....	7
Figura 8. Fibra Óptica Multimodo.....	7
Figura 9. Fibra Óptica Monomodo .....	8
Figura 10. Estructura de fotodiodo PIN.....	10
Figura 11. Estructura del fotodiodo APD .....	11
Figura 12. Densidad de probabilidad y tasa de errores en los bits.....	12
Figura 13. Diagrama de Ojo .....	13
Figura 14. Comparación de una señal PAM2 (OOK) con una PAM-4 .....	16
Figura 15. Modulación PAM.....	17
Figura 16. Evolución de Ethernet a lo largo del tiempo .....	18
Figura 17. Tasas de información.....	19
Figura 18. Forma de Onda y diagrama de ojo para PAM-4 .....	19
Figura 19. Desarrollo de estándares de Ethernet .....	21
Figura 20. "BER" vs OSNR para 400 Gb/s capacidad de 16 QAM .....	22

Figura 21. 800 Gb/s capacidad 64QAM para implementación variable.....	23
Figura 22. Configuración experimentada en tiempo real de dos señales PAM-4.....	25
Figura 23. Optimización de Potencia.....	26
Figura 24. Medición a largo plazo del BER para el canal con FEC .....	26
Figura 25. Diagrama de Ojo .....	27
Figura 26. Diagrama de ojo de un dispositivo de una señal a 400 Gb/s .....	28
Figura 27. Circuitos integrados Fotónicos.....	29
Figura 28. Redes WDM.....	30
Figura 29. Canales más predominantes en el mundo.....	31
Figura 30. Requerimientos para Data Center.....	32
Figura 31. Waveserver 5 es adecuado para todas las aplicaciones .....	33
Figura 32. Interfaz Gráfica de Matlab .....	35
Figura 33. Técnicas de Simulación.....	37
Figura 34. Elemento de Co-simulación Matlab.....	38
Figura 35. Configuración de Componentes .....	39
Figura 36. Configuración de Parámetros .....	39
Figura 37. Creación de Puerto TX.....	40
Figura 38. Ventana de acceso a los archivos fuente de la co-simulación con Matlab.....	40
Figura 39. Generación de archivos y su correspondiente ruta.....	41
Figura 40. Creación de puerto TX .....	41
Figura 41. Creación del puerto RX.....	42
Figura 42. Comunicación TX y RX.....	42
Figura 43. Corrida de prueba para la Co-simulación.....	43

Figura 44. Resultados de comunicación exitosa entre Matlab y Optsim.....	44
Figura 45. Esquema de la simulación del sistema de transmisión a 100, 200 y 400 Gb/s ...	45
Figura 46. Configuración del láser CW lorenziano .....	46
Figura 47. Modulador de amplitud lineal .....	47
Figura 48. Ícono y ventana de configuración del módulo de simulación de la fibra óptica en Optsim .....	48
Figura 49. Rejilla de fibra .....	49
Figura 50. Atenuador óptico .....	50
Figura 51. Símbolo y ventana de configuración de parámetros de un fotodiodo PIN.....	51
Figura 52. Sonda eléctrica .....	52
Figura 53. Medidor de Potencia Óptica.....	52
Figura 54. Señales PAM-4 empleadas en la simulación: a) señal transmitida, b) señal recibida .....	53
Figura 55. Diagrama de ojo de la señal PAM-4 con comunicación Back to back en perfectas condiciones .....	54
Figura 56. Diagrama de Ojo para una velocidad de 100 Gb/s con una potencia recibida de -21.2 dBm .....	55
Figura 57. Diagrama de Ojo para una velocidad de 200 Gb/s con una potencia recibida de -23.72 dBm .....	56
Figura 58. Diagrama de Ojo para una velocidad de 400 Gb/s con una potencia recibida de -25.19 dBm .....	56
Figura 59. BER vs potencia recibida para los sistemas a 100, 200 y 400 Gb/s para un enlace óptico de 20 km .....	59

## ÍNDICE DE TABLA

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Características Fibra Multimodo y Monomodo.....	8
Tabla 2. Variantes de Ethernet para 400G.....	21
Tabla 3. Características de Optsim .....	36
Tabla 4. Parámetros generales de la simulación a 100, 200 y 400 Gb/s.....	57

## RESUMEN

Los sistemas de comunicación de datos con velocidades de transmisión iguales o mayores a 400 Gb/s, pretenden alcanzar un mayor rendimiento en los centros de datos que demandan tasas muy grandes de velocidad de transferencia de información, teniendo un ahorro de consumo de energía y aumentando las densidades de conexión a nivel de híper escala.

El presente Trabajo de Titulación tiene como finalidad estudiar la factibilidad de usos de sistemas de transmisión óptica de alta velocidad, para la conexión de Datacenters a híper escala empleando técnicas no coherentes de transmisión de datos que soporten las aplicaciones de nueva generación que demandan mayor ancho de banda. Para la simulación de los sistemas a 100, 200 y 400Gb/s se utilizó el software de simulación de sistemas de transmisión por fibra óptica Optsim. Este software permite entre otros resultados, obtener los diagramas de forma de onda de la señal, diagramas de ojo, tasa de bits errados (BER), potencia óptica recibida, mapas de potencia y dispersión. Dichos resultados facilitan el diseño y análisis de sistemas de comunicación por fibra óptica con gran precisión y con resultados confiables. Una de las características más importantes de Optsim es la facilidad de incluir elementos de co-simulación con Matlab, permitiendo potenciar aún más la capacidad y flexibilidad de simulación de Optsim. Los resultados obtenidos demuestran que se puede alcanzar velocidades de 400 Gb/s con muy poca penalidad en el BER en comparación a los sistemas a 100 y 200 Gb/s, si se transmite en distancias de hasta 20km, que son típicamente las mayores distancias de interconexión requeridas en entornos urbanos.

## ABSTRACT

The data communication systems with transmission speeds are greater or equal to 400 Gb /s. They aim to achieve higher performance in data centers that demand very high rates of information transfer speed saving energy consumption and increasing connection densities at the hyper-scale level.

The purpose of this Degree Project is to study the feasibility of using high-speed optical transmission systems for the connection of hyper-scale Datacenters using non-coherent data transmission techniques which support new generation applications that demand greater bandwidth. For the system at 100, 200 and 400Gb /s, a fiber optic transmission systems simulation software was used by OptSim. This software allows the user to obtain the waveform diagrams of the signal, view eye diagrams, bit error rate (BER), received optical power, power maps, and dispersion. These results facilitate the design and analysis of fiber optic communication systems with great precision and reliable results. One of the most important features of OptSim is the ease of including co-simulation elements with Matlab, allowing to further enhance OptSim's simulation capacity and flexibility. The results obtained demonstrate that speeds of 400 Gb /s can be achieved with very little BER penalty compared to systems at 100 and 200 Gb /s. It is transmitted over distances up to 20 km, which are typically the longest distances of interconnection required in urban environments.

## **PROBLEMÁTICA**

En la actualidad muchos centros de datos se encuentran saturados ya que cuentan con conexiones de red de baja velocidad, mediante el cual permite que exista una sobresaturación en la prestación de servicios que demandan gran ancho de banda, tales como video de alta definición, video llamadas, juegos en línea, redes sociales masivas, etc.

Un problema recurrente que se agrava con el crecimiento exponencial del tráfico de datos es la continua interrupción de la conectividad debido a problemas en la red, provocando inestabilidad y baja calidad de servicio.

En centro de datos conectados a híper escala típicamente usan enlaces Ethernet a 100 Gb/s, pero esta velocidad de transmisión no es suficiente para soportar la demanda de las aplicaciones de nueva generación, lo que exige a los centros de datos de alta gama a pasar rápidamente a interconexiones de mayor velocidad.

## **JUSTIFICACIÓN**

Mediante el estudio de las diferentes tecnologías de conexión a alta velocidad, se tendrá una mejor comprensión del rendimiento que estos sistemas pueden ofrecer para la interconexión de centros de datos de nueva generación.

La disponibilidad de sistemas de transmisión de datos de alta velocidad permitirá además que los centros de datos brinden a sus usuarios servicios con mayor calidad de conexión y prestación.

Particularmente, las interconexiones de próxima generación, a 400 Gb/s, pretenden en corto plazo obtener un mayor rendimiento en los centros de datos logrando ahorrar el consumo de energía y aumentando las densidades de conexión.

## **ANTECEDENTES**

En lo que respecta a la conexión a híper escala de data centers, (Son Thai Le, 2019) en su artículo habla sobre la detección directa (DD) de banda lateral única (SSB) que se ha considerado como un esquema de transmisión atractivo para lograr velocidades de datos superiores a 100 Gb/s por canal debido a su capacidad de compensación de dispersión electrónica.

Para lograr capacidades de 400 Gb/s, una solución tradicional ha sido el uso de transceptores coherentes que funcionan a velocidades de símbolo más altas, pero esto requiere componentes costosos de gran ancho de banda que utilizan nuevas tecnologías electro-ópticas implementadas con fosforo de indio y fotónica de silicio (Kim Roberts, 2017). Este tipo de sistemas se están utilizando en enlaces de largas distancias, típicamente en enlaces trans e intercontinentales.

En la interconexión de centros de datos en entornos urbanos se busca el uso de tecnologías no coherentes. (Le, Son T., 2019) reportó por primera vez una velocidad de datos neta por canal más allá de 400 Gb/s, usando modulación de intensidad de varios niveles de modulación de amplitud de pulsos (PAM) y detección directa (DD).

En el estudio de (Kim Roberts, 2017) se habla sobre las tecnologías avanzadas de hardware basadas en fosforo de indio (InP) y fotónica de silicio (SiP) para componentes de mayor ancho de banda y menor potencia, también se presentarán enfoques digitales avanzados. Esto permitirá

la realización exitosa de la próxima generación en transceptores coherentes para capacidades de canal de 400 Gb/s y más para proporcionar un mejor rendimiento en redes flexibles.

La demanda de energía de centro de datos de alta velocidad es muy grande y su número crece de forma exponencial. De hecho, los centros de datos de hiper escala aumentaron desde un número de 259, que se tenía a fines de 2015, a 485 en 2020. Estos centros de datos representan el 47% de todos los servidores instalados en 2020 (Cisco, 2016).

Se debe tomar en cuenta que el crecimiento en el número de servidores ha sido impulsado por la presencia de grandes centros de datos, donde los servidores a menudo están configurados para una productividad máxima y operan a altas tasas de utilización. El consumo de energía del servidor aumenta constantemente, y esta tendencia continuará en el futuro cercano para los servidores de potencia de gama media y alta (Shehabi A., 2016).

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Diseñar un sistema óptico no coherente operante a 400 Gb/s, para conexión de data centers a nivel de híper escala, con la ayuda de software de simulación, comparando su desempeño con sistemas a 200 Gb/s y 100 Gb/s.

### **Objetivos Específicos**

- Estudiar el software y técnicas existentes que se pueden utilizar para aplicar en el proceso de diseño del sistema a 400 Gb/s para conexión de data centers a híper escala.
- Simular un sistema a 400 Gb/s y otros dos sistemas similares operantes a menor velocidad: 100 Gb/s y 200 Gb/s con el fin de comparar su desempeño.
- Analizar los resultados de la simulación mediante el análisis comparativo del desempeño de los sistemas simulados.

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### Centro de Datos de Interconexión (DCI)

Actualmente los centros de datos son una parte fundamental para los servicios en la nube, y la tecnología más utilizada por su interconexión son los sistemas de transmisión por fibra óptica de alta velocidad. Las tecnologías de próxima generación ofrecen un mayor ancho de banda en los centros de datos de interconexión en diferentes redes, brindando hasta 400 Gb/s por longitud de onda (Kent, 2019).

Con el aumento de velocidades a híper escala se ha incrementado la adopción temprana de 400 Gb/s, para la construcción de redes de centro de datos de interconexión. (Xenos, CIENA, 2018).

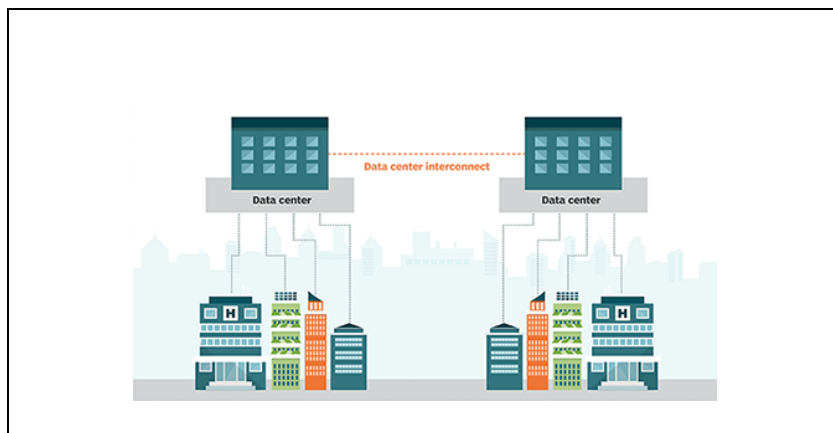


Figura 1. Centro de datos de Interconexión

Fuente: (Dergurahian, 2020)

## **Centro de datos a híper escala**

Los data center a híper escala tienen la capacidad de escalar de forma rápida y rentable, al tiempo que se mantiene la capacidad de respuesta y la fiabilidad. Su principal objetivo es buscar un costo total de propiedad más bajo con más modularidad y escalabilidad para ofrecer capacidad de TI<sup>1</sup> bajo demanda con mayor eficiencia y flexibilidad en cualquier momento y lugar. A diferencia de un data center empresarial tiene la necesidad de contar con servicios que se adaptan a los sistemas tecnológicos que se utilizan. Es por eso que las empresas tanto pequeñas como medianas y grandes se ven en la necesidad de contar con data centers a híper escala, debido al crecimiento exponencial del tráfico de datos y siendo una de las arquitecturas más rápidas y escalables. Los sistemas de transmisión por fibra óptica son la única opción para una conectividad efectiva de los centros de datos. Además, muchos centros requieren un upgrade de acceso hacia enlaces de 200 y 400 Gb/s. Las interconexiones de 400 Gb/s no solo ofrecen múltiples ventajas de velocidad de transferencia de datos, sino que los dispositivos ópticos de nueva generación que se emplean en estos sistemas que consumen menor energía que los enlaces tradicionales (Horner, 2020).

---

<sup>1</sup> TI.- Se refiere al uso de equipos de telecomunicaciones y computadoras (ordenadores) para la transmisión, el procesamiento y el almacenamiento de datos.

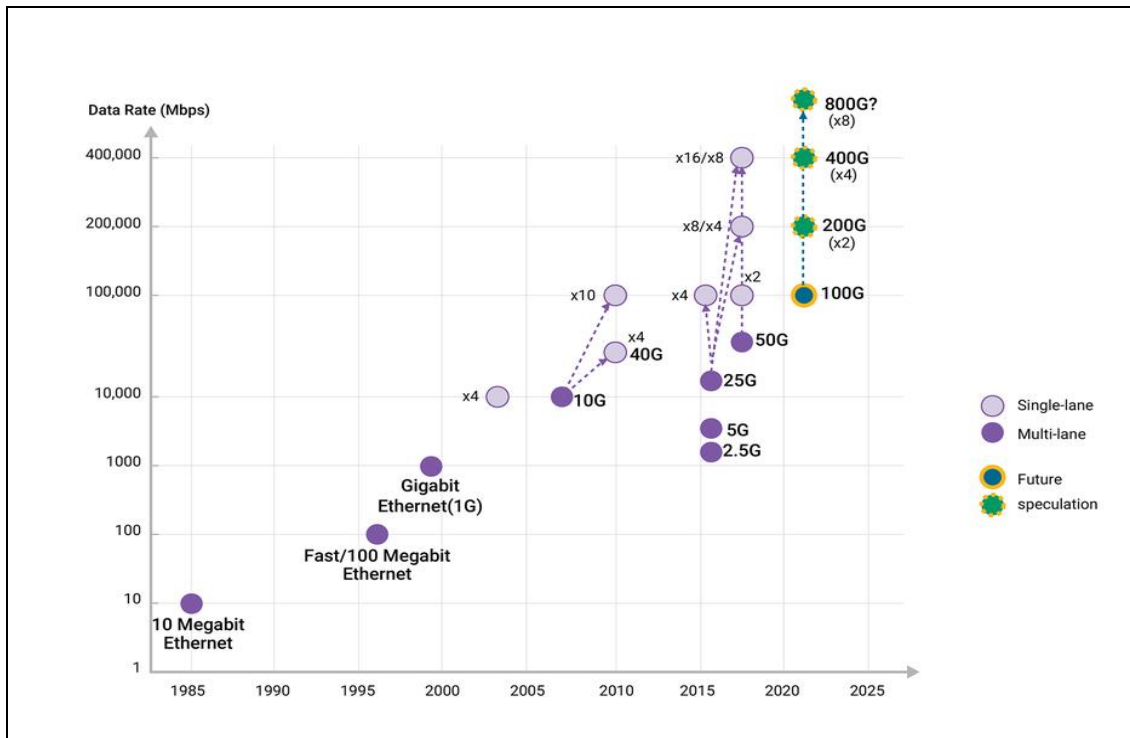


Figura 2. Evolución de las velocidades de Ethernet

Fuente: (Horner, 2020)

De acuerdo con la investigación realizada por el instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (Ingenieros.es, 2014), en la actualidad la tecnología 400 Gb/s se está aumentando en su uso en gran escala respecto a 100 Gb/s. Una solución para alcanzar esta velocidad es el uso de dos longitudes de onda de 200 Gb/s usando como base a la tecnología coherente tradicional de 32-35 GBd/s, esto se define como doble portadora a 400 Gb/s o doble longitud de onda de 400 Gb/s (Xenos, CIENA, 2018).

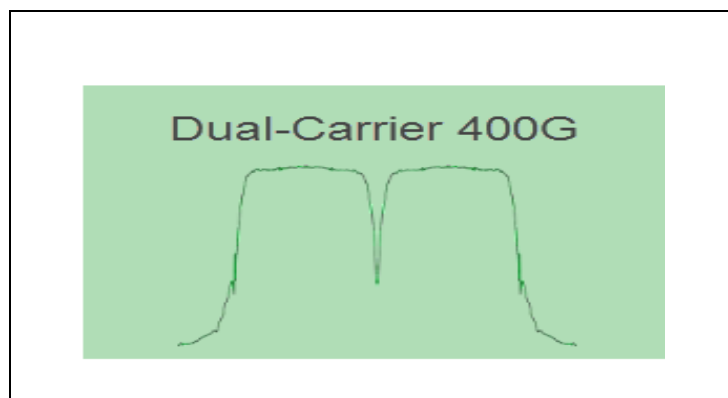


Figura 3. Doble portadora a 400G

Fuente: (Xenos, CIENA, 2018)

Las redes Ethernet también han evolucionado hasta alcanzar los 400 Gb/s. El estándar actual trabaja a una velocidad de 400 GE IEEE 802.3bs.

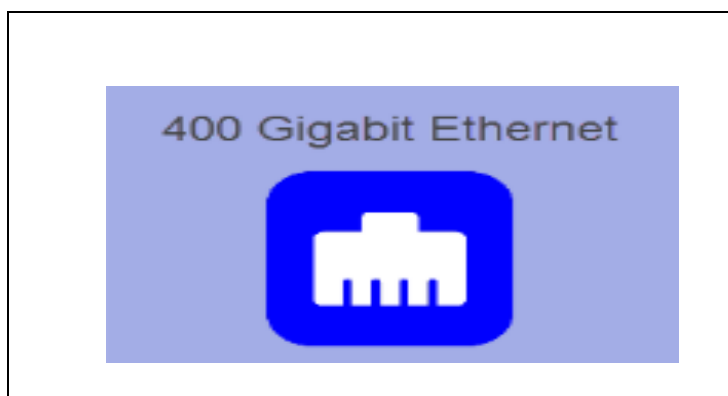


Figura 4. 400 gigabit Ethernet

Fuente: (Xenos, CIENA, 2018)

Una tendencia actual en la investigación que se realiza alrededor de las redes ópticas coherentes<sup>2</sup> es la posibilidad de alcanzar 400 Gb/s con una sola longitud de onda.

---

<sup>2</sup> Óptica coherente. - Es una técnica que utiliza la modulación de la amplitud y la fase de la luz, así como la transmisión a través de dos polarizaciones, para permitir el transporte de información considerablemente mayor a través de un cable de fibra óptica.

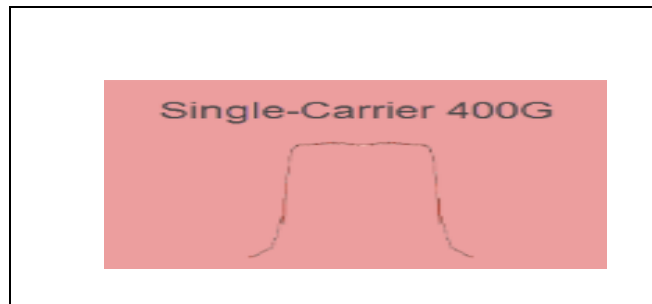


Figura 5. Portadora única a 400G

Fuente: (Xenos, CIENA, 2018)

## **Fibra Óptica**

La Fibra Óptica es un medio de transmisión, que permite enviar y recibir gran cantidad de datos a diferentes velocidades y distancias, este medio de transmisión es hoy utilizado en gran parte del mundo por su velocidad de transferencia de datos a grandes distancias. Los cables ópticos pueden ser tanto terrestres como submarinos (Instituto Tecnológico de Aguas Calientes, 2020).

### **La Fibra Óptica ofrece:**

- Poca atenuación
- Economía a largo plazo
- Inmunidad Electromagnética
- Consideraciones de seguridad
- Diámetro pequeño y poco peso
- Potencial de ancho de banda aumentado

## Componentes de la fibra Óptica

Los componentes más esenciales de la fibra óptica son el núcleo, revestimiento y la cubierta protectora, siendo el núcleo la parte más importante, el revestimiento tiene la función de proteger la fibra para que las ondas de luz no se escapen del núcleo y sean reflejadas. La cubierta protectora ofrece una resistencia sumamente buena para que la fibra no sufra rupturas o daños (Yupa, 2016).

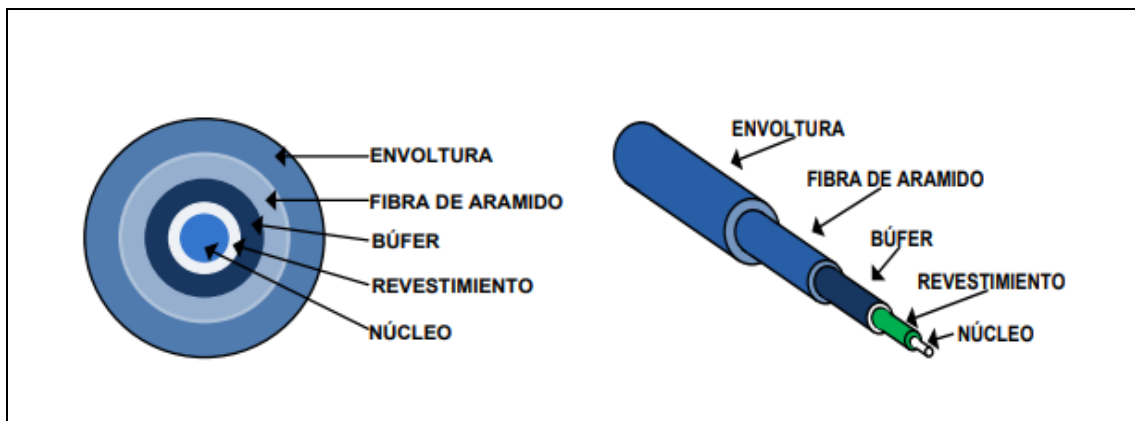


Figura 6. Estructura de la Fibra Óptica

Fuente: (Garzón, 2015)

## Tipos de Fibra Óptica:

Existen dos tipos de fibra óptica:

Fibra óptica monomodo: Propagación de un solo haz de luz.

Fibra óptica Multimodo: Propagación de múltiples haces de luz.

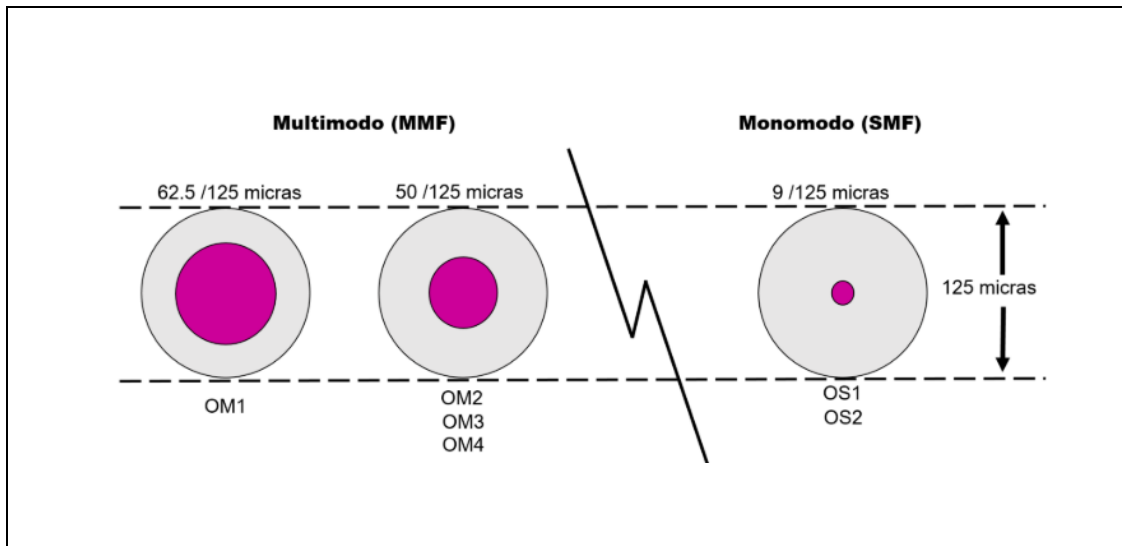


Figura 7. Tipos de Fibra Óptica

Fuente: (Syscom, 2020)

## Fibra Óptica Multimodo

La fibra óptica multimodo soporta redes de alta velocidad a corta distancia. El diámetro de la fibra óptica multimodo es de  $50\ \mu\text{m}$  o  $62.5\ \mu\text{m}$ . Su función principal están en redes LAN<sup>3</sup> de mayor velocidad y distancia que los cables de cobre (Yupa, 2016).

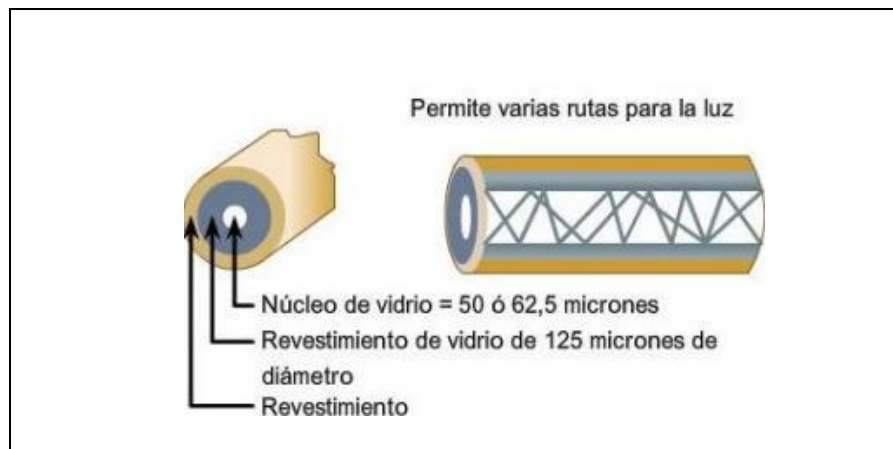


Figura 8. Fibra Óptica Multimodo

Fuente: (Yupa, 2016)

<sup>3</sup> Redes LAN. - Son un conjunto de dispositivos electrónicos conectados entre sí que comparten una línea de comunicación común o un enlace inalámbrico con un servidor.

## Fibra Óptica Monomodo

La fibra óptica monomodo permite la propagación de un solo haz de luz, esto se debe a que su núcleo es de  $9\mu m$ . Este tipo de fibra alcanza distancias y tasas de transmisión de datos mayores a los de la fibra multimodo debido a su mayor ancho de banda y menor atenuación y dispersión (Yupa, 2016).

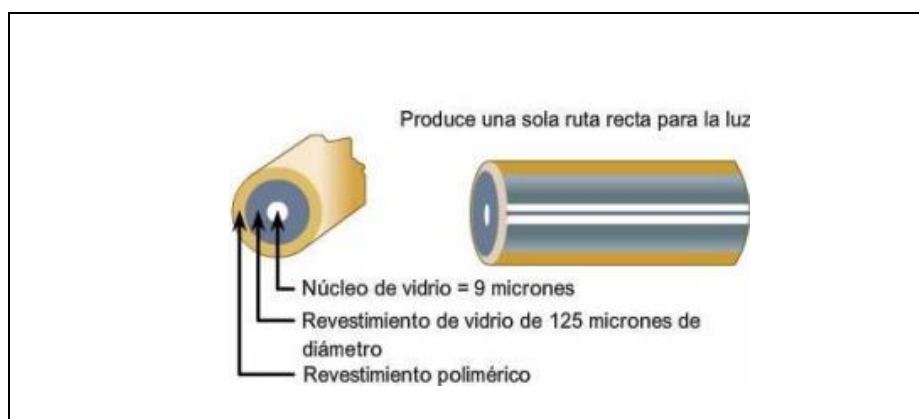


Figura 9. Fibra Óptica Monomodo

Fuente: (Yupa, 2016)

Tabla 1. Características Fibra Multimodo y Monomodo

Característica	Fibra Multimodo	Fibra Monomodo
Diámetro del núcleo	50 $[\mu m]$ y 62.5 $[\mu m]$	4 $[\mu m]$ a 10 $[\mu m]$
Apertura numérica	Mayor	Menor
Distancia máxima	2 [km]	100 [km]
Velocidad de operación	1.2 [Gb/s]	100 [Gb/s]
Fuente de luz	Led	Laser
Conectorización	No requiere de electrónica de precisión	Requiere de electrónica de precisión

Fuente: (Moreta, 2016)

## Receptores Ópticos

El receptor óptico se encuentra en el extremo opuesto del sistema. Se usa como detector de la intensidad óptica y transductor de la señal (de óptica a eléctrica). En un sistema de transmisión por modulación de amplitud la información está codificada precisamente en la intensidad de potencia de los pulsos de luz: un pulso de luz codifica a un uno lógico y la ausencia de un pulso de luz (un periodo de "obscuridad") codifica a un cero lógico.

En general se tienen dos tipos de detectores ópticos:

**Los fototransistores:** los cuales tienen buena sensibilidad y entregan una corriente amplificada, pero con bajo tiempo de respuesta.

**Los fotodiodos:** son en esencia diodos semiconductores (fabricados con materiales como Si, Ge, InP, InGaAs, GaAs, entre otros), en los cuales, al aplicarse energía eléctrica adquieren la capacidad de absorber los fotones de luz<sup>4</sup> que estimulan la creación de pares electrón-hueco en el material, y que a su vez da lugar a la conducción de una corriente eléctrica.

### Características deseables:

Un detector óptico se caracteriza fundamentalmente por los siguientes parámetros:

Respuesta rápida

Ruido interno mínimo

---

<sup>4</sup> Fotón de luz. - Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluidos los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas y las ondas de radio.

Sensibilidad alta a la frecuencia de operación

Pequeña área para tener poca capacitancia, pero suficiente para acoplar la fibra

### **Tipos de fotodiodos**

Existen dos tipos de fotodiodos:

Fotodiodo PIN

Fotodiodo APD

### **Fotodiodo PIN (Positiva Intrínseca Negativa)**

El PIN es el dispositivo más utilizado en los sistemas de comunicación por fibra óptica, esto se debe fundamentalmente a que su tiempo de vida es mayor y su consumo de energía es menor que en los APD. Está conformado por una capa casi pura de material semiconductor intrínseco, colocado en medio de una capa tipo n y una capa tipo p (Arévalo G, 2019).

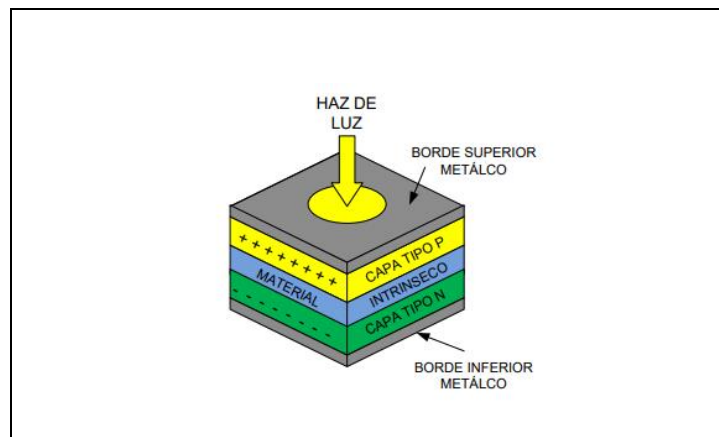


Figura 10. Estructura de fotodiodo PIN

Fuente: (Garzón, 2015)

## Fotodiodo APD (Fotodiodo de Efecto Avalancha)

Un fotorreceptor APD está conformado por una estructura N-P-I-P, misma que incrementa el campo eléctrico interno. Acumula mayor energía cinética lo que resulta en una ganancia de corriente (Arévalo G, 2019).

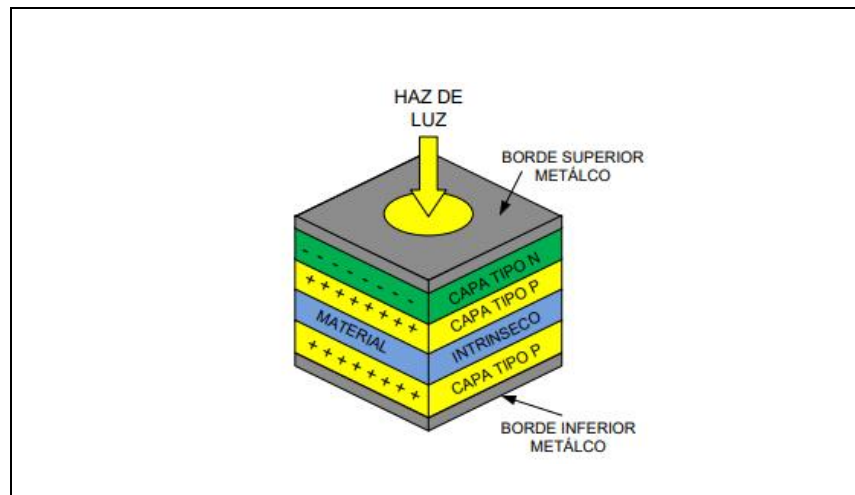


Figura 11. Estructura del fotodiodo APD

Fuente: (Garzón, 2015)

## Parámetros de transmisión

### Tasa de Errores de Bit (BER)

El BER mide el desempeño de la red que se usa actualmente en los sistemas de telecomunicaciones, se puede detectar el número de bits transmitidos y el número de errores detectados. En sistemas ópticos un BER aceptable es  $10^{-9}$  o menor, pero si se usa corrección de errores hacia adelante (FEC) generalmente se busca alcanzar un BER cercano a  $10^{-3}$  (Arévalo G, 2019).

El BER se mide o estima de las siguientes formas:

- Por comparación de bits:

Transmitidos: ...00100110010111010011000101010010011...

Detectados: ...00100010010110010011010101010010011...

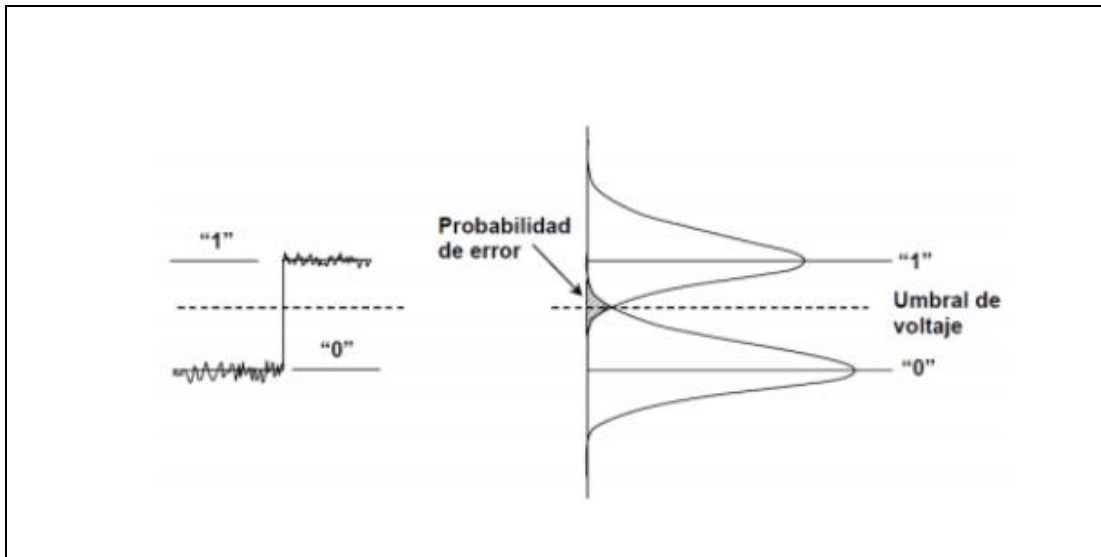


Figura 12. Densidad de probabilidad y tasa de errores en los bits

Fuente: (Imbachi, 2019)

El BER es la razón entre el número de bits errados con respecto a los transmitidos:

$$BER = \frac{\text{número de bits errados}}{\text{número de bits transmitidos}}$$

- Por estimación estadística a partir de la media y varianza del ruido en la señal.

### Diagrama de Ojo

A partir del diagrama de ojo se pueden estimar dos parámetros que cualifican y cuantifican la calidad de la transmisión de datos en un sistema de comunicaciones por fibra óptica: el factor de calidad Q y el BER. El factor de calidad depende de la intensidad de ruido de la señal en los

niveles 1 y 0, dicha densidad de ruido se caracteriza a través del valor medio  $\mu$  y de la varianza  $\sigma$  del ruido a nivel del 1 y del 0 óptico (Arévalo G, 2019).

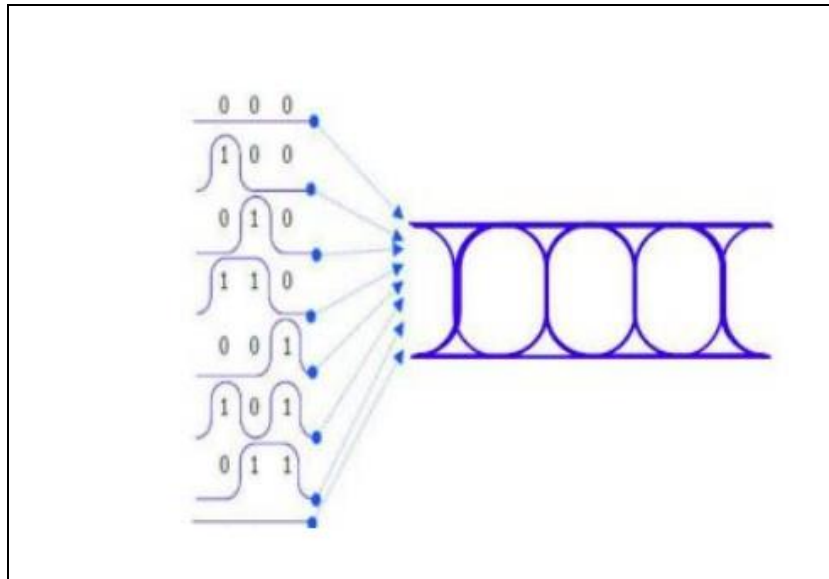


Figura 13. Diagrama de Ojo

Fuente: (Imbachi, 2019)

## Modulación

Es una técnica que se utiliza para la comunicación de un canal que permite enviar información en forma simultánea, a la vez mejora la resistencia frente a ruidos e interferencias que se puedan presentar (Andrade & Cortez, 2012).

## Modulación de Señales Ópticas

Las técnicas de modulación de una señal óptica más empleadas son:

- **Modulación de Intensidad:**

On Off Keying (OOK)

Modulación por amplitud de pulsos de M niveles (M-PAM)

- **Modulación de fase:**

Modulación diferencial por desplazamiento de fase (DPSK)

Modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK)

Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK)

Modulación de amplitud en cuadratura de M niveles (M-QAM)

**Las técnicas de multiplexación más empleadas son:**

Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

Multiplexación de Polarización (POLMUX)

Multiplexación por división de frecuencia ortogonales (OFDM)

## **Modulación de intensidad**

La modulación de intensidad (IM) codifica los 1 y 0 lógicos a través de un valor diferencial de intensidad óptica: 1 = potencia óptica transmitida, 0 = ausencia de potencia óptica transmitida, a esta técnica se conoce como la modulación OOK<sup>5</sup>. La modulación de intensidad exige en recepción una simple detección directa de la intensidad recibida (si se recibe intensidad el receptor decodifica esa señal como un 1, y si no se recibe intensidad óptica -o se recibe muy

---

<sup>5</sup> Modulación OOK. - La modulación de amplitud, también conocida como modulación binaria sencilla y como OOK denota a la forma mas sencilla de modulación ASK que representa datos digitales como la presencia o ausencia de una señal portadora.

poca intensidad óptica- el receptor decodifica esa señal como un 0). Las técnicas más empleadas para la conformación (*shaping*) de los pulsos ópticos, modulados en intensidad, son:

Sin Retorno a cero (NRZ)

Retorno a cero (RZ)

Coseno levantado

Gaussiano

En lo que respecta a la modulación de intensidad, una variante a OOK es la modulación por amplitud de pulsos de varios niveles (M-PAM). La más utilizada en la actualidad es PAM 4 (o 4 PAM), la que permite, como su nombre lo indica, codificar la información a través de cuatro niveles de intensidad óptica. En PAM-4 se tienen cuatro baudios<sup>6</sup> y cada baudio transporta la información equivalente a 2 bits de datos. OOK puede considerarse como una codificación PAM-2. PAM-4 se puede codificar popularmente con dos técnicas: el código Duobinario y el código Gray. El diagrama del ojo de PAM-4 presenta 12 transiciones posibles (en comparación con las dos transiciones posibles de OOK) y tres ojos por cada tiempo de baudio (en comparación con un ojo por tiempo de bit de OOK) (Arévalo G, 2019).

---

<sup>6</sup> Baudio. - Unidad de medida de la velocidad de transmisión de señales que se expresa en símbolos por segundo.

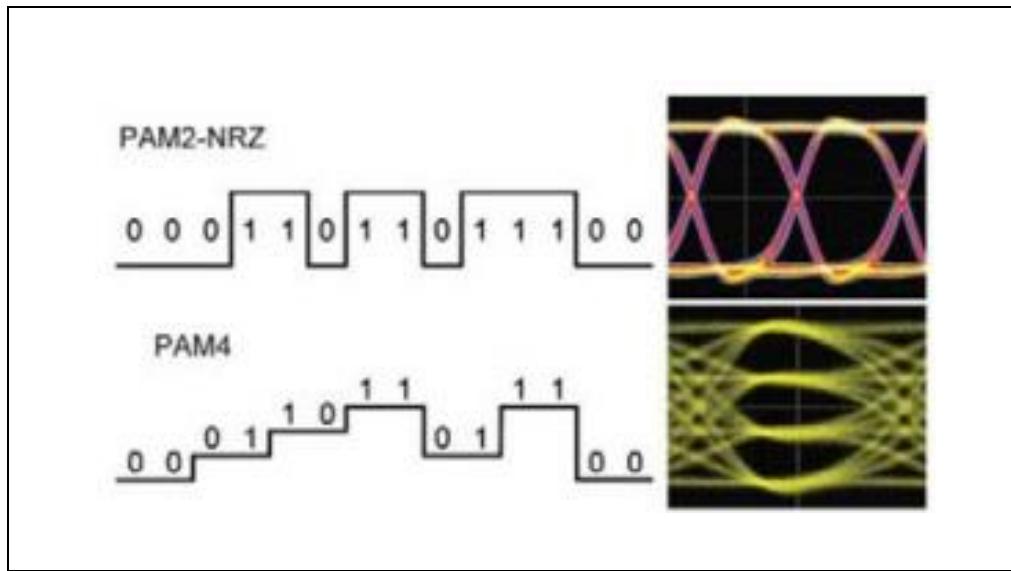


Figura 14. Comparación de una señal PAM2 (OOK) con una PAM-4

Fuente: (Arévalo G, 2019)

### Modulación de fase

En la modulación de fase los 1 y 0 ópticos no se diferencian por su nivel de intensidad sino por su fase. Para modular en fase una señal óptica necesariamente se debe usar un modulador externo del tipo MZ (no se puede modular directamente en fase solo prendiendo y apagando el láser -eso siempre constituye una modulación de intensidad). Si el VBIAS se ajusta a un punto mínimo de la curva de trabajo y el  $V_{RF} = 2 * V_{\pi}$ , el modulador trabaja como modulador de fase, en el cual los 1 y 0 están diferenciados por un cambio de fase de hasta  $180^{\circ}$ . Este tipo de codificación en fase de una señal binaria se denomina como una modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) (Arévalo G, 2019).

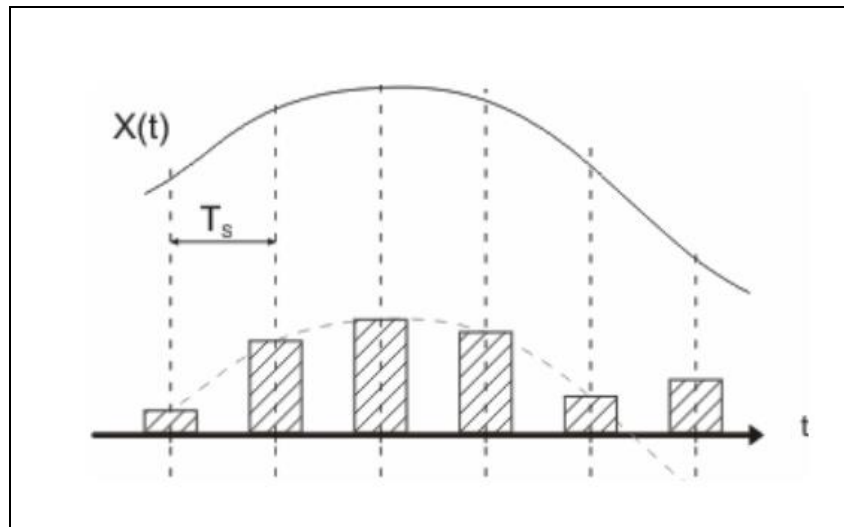


Figura 15. Modulación PAM

Fuente: (Andrade & Cortez, 2012)

## Redes de alta velocidad

Permiten enviar y recibir información a distintas partes del mundo, ofrecen altas velocidades de conexión (típicamente mayores de 100 Gb/s) y transmisión de datos. En un futuro este tipo de conexiones serán un elemento muy necesario para las telecomunicaciones (Ospina, 2013).

## Ethernet

Es una tecnología que brinda transporte de información en todo el mundo, su capacidad de envío aumenta constantemente, su medio de transporte ha ido evolucionando desde el cable coaxial, par trenzado y hoy en día lo más utilizado para redes de transporte Ethernet es la fibra óptica (Alarcon, 2018).

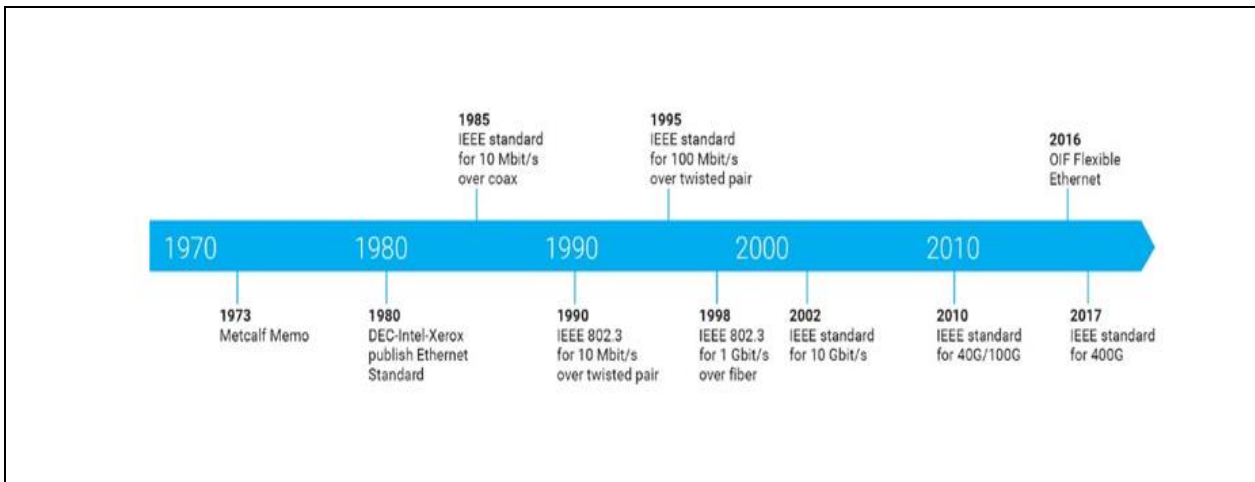


Figura 16. Evolución de Ethernet a lo largo del tiempo

Fuente: (Alarcon, 2018)

**Las interconexiones presentan varios cambios:**

- Ecosistemas tecnológicos
- Nuevas tasas de información
- Diferentes Tecnologías de transporte
- Utilización de la infraestructura existente

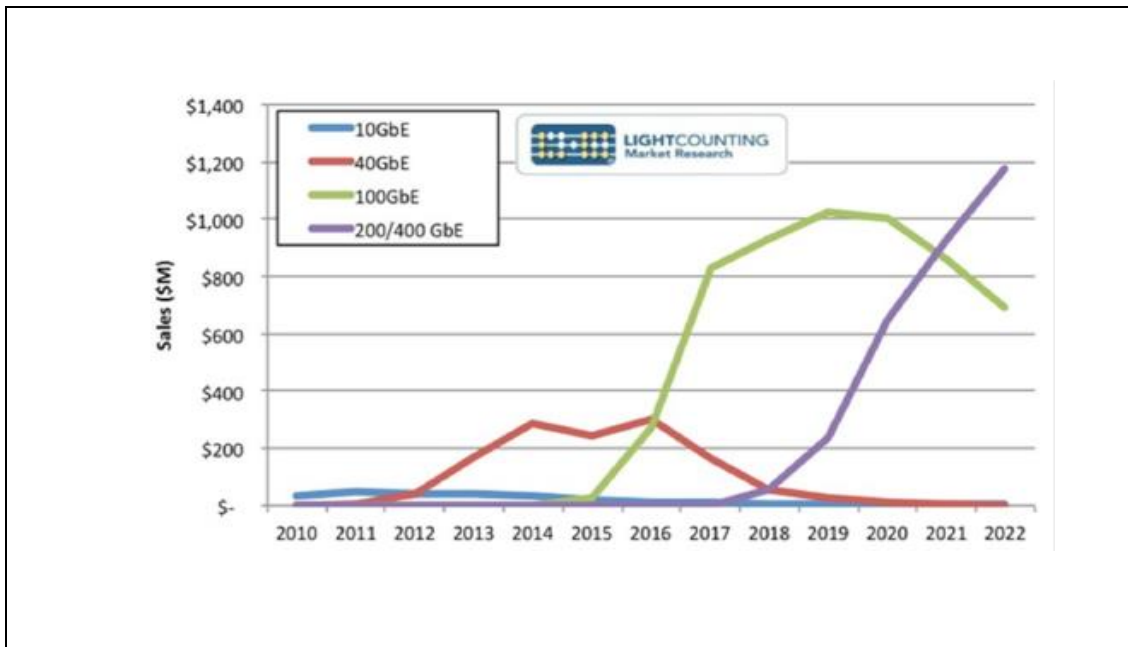


Figura 17. Tasas de información

Fuente: (Alarcon, 2018)

### 400G Ethernet

El estándar 400 Gigabit Ethernet tiene un mejor rango de codificación de datos, cuenta con 4 niveles de modulación de amplitud de pulso (PAM-4) por lo tanto, duplica la cantidad de datos transmitidos en la misma cantidad de tiempo.

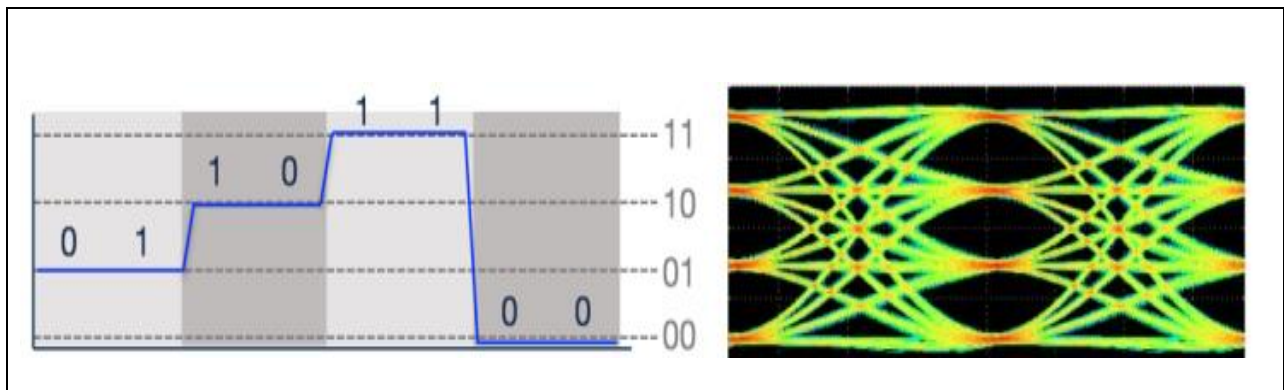


Figura 18. Forma de Onda y diagrama de ojo para PAM-4

Fuente: (Arista, 2020)

Para tener una óptima conexión de datos se debe trabajar con medios de fibra óptica, transceivers<sup>7</sup>, conectores y cables para un buen rendimiento. El transceivers cuádruple de factor de forma pequeño conectable – densidad doble (QSFP-DD) soporta 50 Gb/s de forma agregada y los desafíos del estándar 400 Gigabit Ethernet.

### **Beneficios del estándar 400 Gigabit Ethernet**

Empresas de distribución

Proveedores de telecomunicaciones

Proveedores de Servicios en la Nube

Aplicaciones que necesitan mayor ancho de banda

El estándar 400 G tiene como fin el aumento de sus velocidades de conexión para los centros de datos que necesitan mayor eficiencia para compartir información ya que existe una fuerte demanda de tráfico en los data centers y esto hace recurrir a data centers a híper escala o velocidades mayores.

Muchas plataformas y servicios en la nube se verán beneficiados con este nuevo estándar, brindando una mejor conexión de datos para lugares de diversión, juegos en línea, internet de las cosas, data centers, la tecnología digital, estudios o compras en línea. Hoy en día que se promueven las reuniones mediante plataformas en línea, el cual gozan de una excelente conexión de datos de alta velocidad. Los alcances de conexión que tendrá el estándar 400 GE, van desde los 70 m y 10 km, incluyendo opciones de fibra óptica multimodo y monomodo.

---

<sup>7</sup> Transceivers. - Es un dispositivo que puede transmitir y recibir información a través de un medio de transmisión

El desarrollo de los estándares de Ethernet ha ido evolucionando según el tiempo, en la actualidad se está incursionando en la nueva tecnología de próxima generación que es 400 Gigabit Ethernet, como un estándar que promete mejorar y brindar mayor conexión de datos, así mismo se proyecta que para el futuro la velocidad aumentara en un 50 por ciento hasta llegar a capacidades gigantes (Accton, 2020).

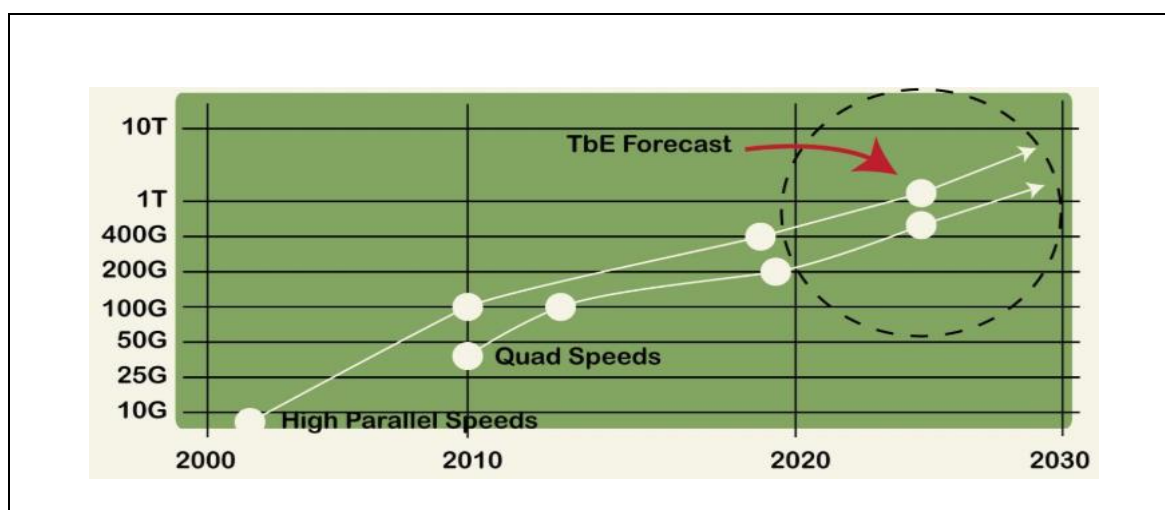


Figura 19. Desarrollo de estándares de Ethernet

Fuente: (Lanner, 2019)

La siguiente tabla muestra las distintas variantes de Ethernet para 400G.

Tabla 2. Variantes de Ethernet para 400G

NOMBRE	MEDIO	FIBRAS TX	CARRILES	ALCANCE	CODIFICACIÓN
400GBASE-SR16	MMF	16	16 x 25 Gb/s	70 m (OM3) 100 m (OM4)	NRZ
400GBASE-DR4	SMF	44	4 x 100 Gb/s	500 m	PAM-4
400GBASE-FR8	SMF	1	8 x 50 Gb/s (WDM)	2 km	PAM-4
400GBASE-LR8	SMF	1	8 x 50 Gb/s (WDM)	10 km	PAM-4

Fuente: (Accton, 2020)

## Velocidades a más de 400G

La evolución de los estándares de Ethernet permite que supere velocidades de 400 Gb/s hasta llegar a velocidades de 800 Gb/s y 1600 Gb/s, para optimizar su conexión y brindar una ultra velocidad de conexión de datos y así satisfacer a todos los usuarios que necesitan de la conexión a internet (Accton, 2020).

## Desarrollo de la Tecnología a 400G

Aumento de la velocidad por longitud de onda

Combinación de una modulación de orden superior.

Alto ancho de banda y bajo rendimiento de voltaje.

Mejoras en la electrónica utilizada para una modulación coherente.

Aumento en el número de bits/símbolo y mayor ganancia de codificación FEC.

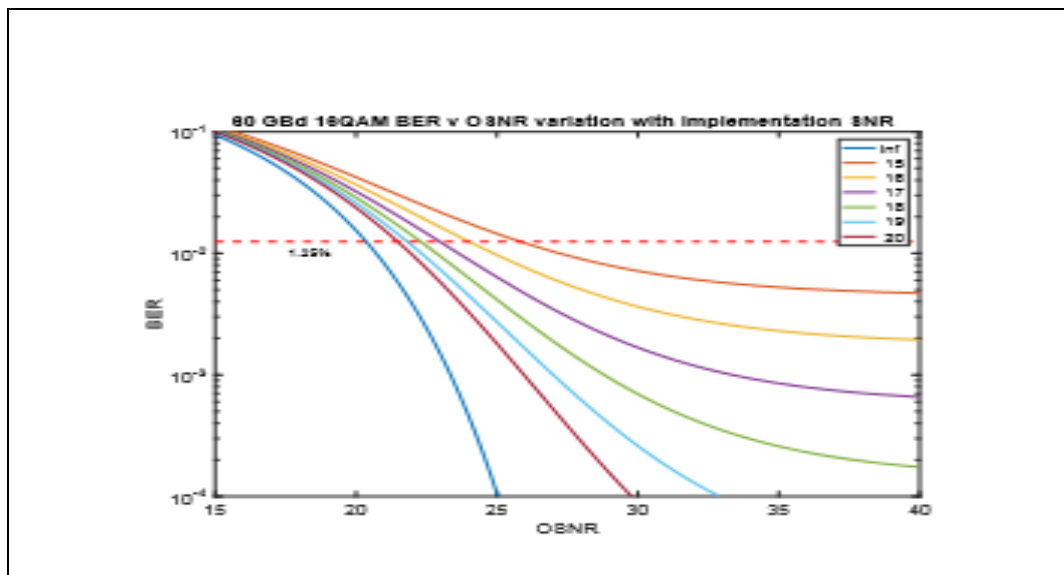


Figura 20. "BER" vs OSNR para 400 Gb/s capacidad de 16 QAM

Fuente: (Maniloff & otros, 2019)

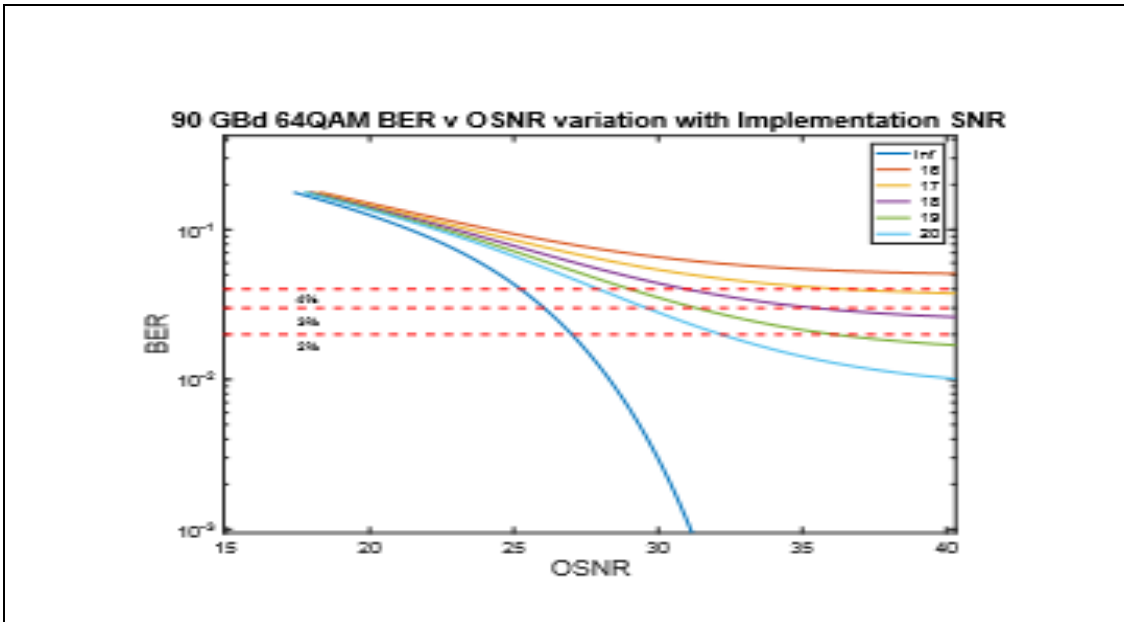


Figura 21. 800 Gb/s capacidad 64QAM para implementación variable

Fuente: (Maniloff & otros, 2019)

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES 400 G**

En el presente capítulo se realiza el estudio del arte del tema cubierto en el presente trabajo de titulación, a través de la descripción breve de los trabajos de investigación reportados por diferentes autores que tenían como finalidad común la búsqueda, investigación y realización de sistemas ópticos de transmisión a 400 Gb/s en distintos escenarios y con distintas técnicas de modulación de las señales.

La primera demostración en tiempo real de 400 Gb/s PAM-4 para la transmisión entre centros de datos en más de 100 km de SSMF a 1550 nm fue presentada por (Eiselt, y otros, 2016). En este trabajo de investigación se demuestra una solución de 400 Gb/s con 8 canales, cada uno a 25.78125 GBd/s con enlaces de fibra óptica monomodo (SSMF) a distancias de 80 km y 100 km ambos pre compensados con una fibra compensadora de dispersión (DFC) y estándar en banda C, que brinda enlaces de conexiones a 400 Gb/s para data centers. A continuación, se presenta la configuración experimental de este sistema.

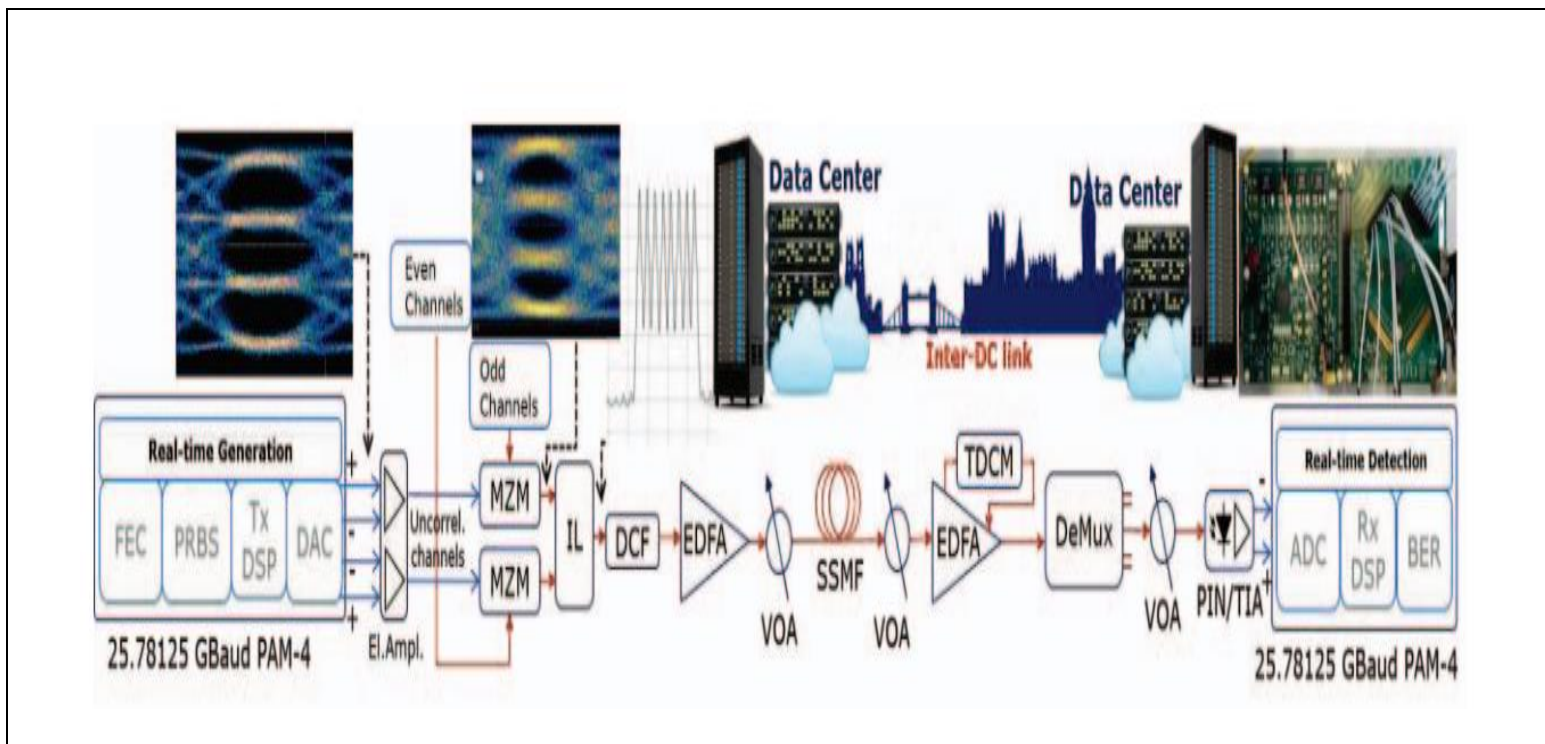


Figura 22. Configuración experimentada en tiempo real de dos señales PAM-4

Fuente: (Eiselt, y otros, 2016)

En el artículo (Khanna, 2016) se reporta la transmisión de prueba de campo de un solo portador de 400 Gb/s con modulación 64QAM y 128QAM empleando polarización dual (DP) y corrección de errores hacia adelante (FEC). A continuación, en la Figura 23, se muestra la optimización de la potencia de lanzamiento para 64QAM y 128QAM, y la medición a largo plazo para el canal DP-128QAM a 400 Gb/s a más de 80km.

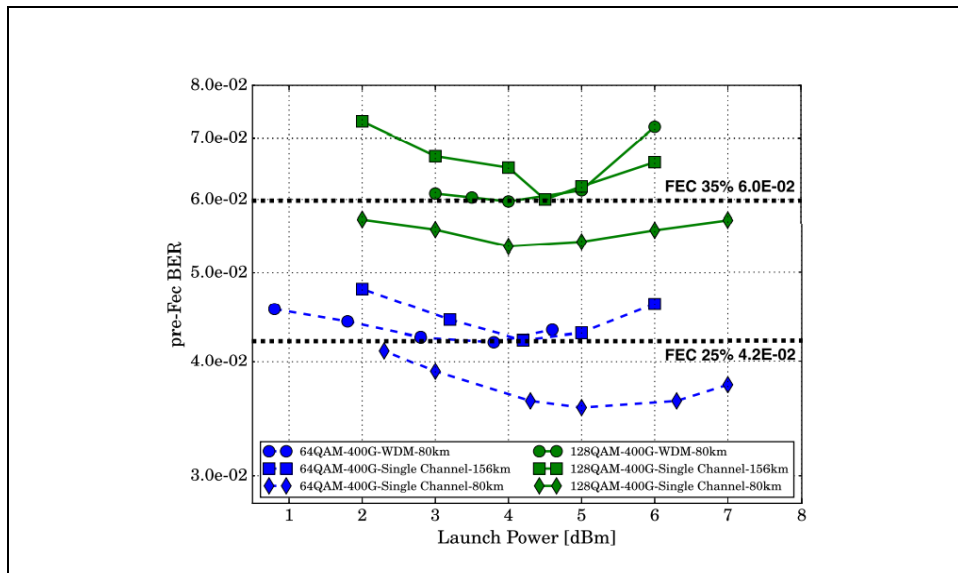


Figura 23. Optimización de Potencia

Fuente: (Khanna, 2016)

En la Figura 24 se muestra un diagrama de medición a lo largo de varias horas de transmisión para el sistema de (Khanna, 2016) donde se observa que se logra siempre un rendimiento cercano al umbral del FEC.

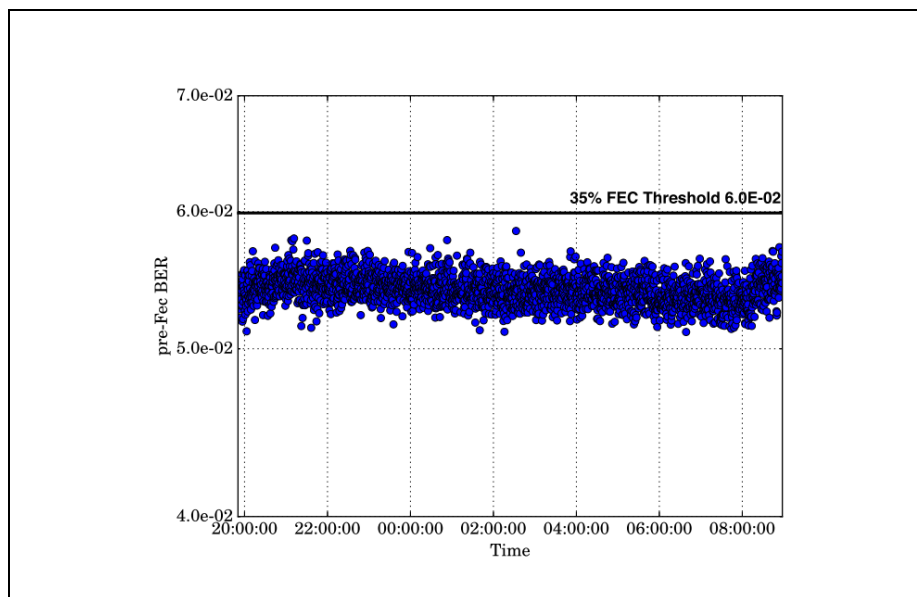


Figura 24. Medición a largo plazo del BER para el canal con FEC

Fuente: (Khanna, 2016)

(Chang & Bhoja, 2017) en su investigación muestran el nuevo cambio de paradigma de señalización PAM-4 a 100 Gb/s y 400 Gb/s para centros de datos en la nube. La transmisión se realiza a través de canales de banda limitada, y el uso de componentes de menor ancho de banda. Este sistema soporta la interconexión con el estándar IEEE 802.3 para velocidades de 200 y 400 Gb/s.

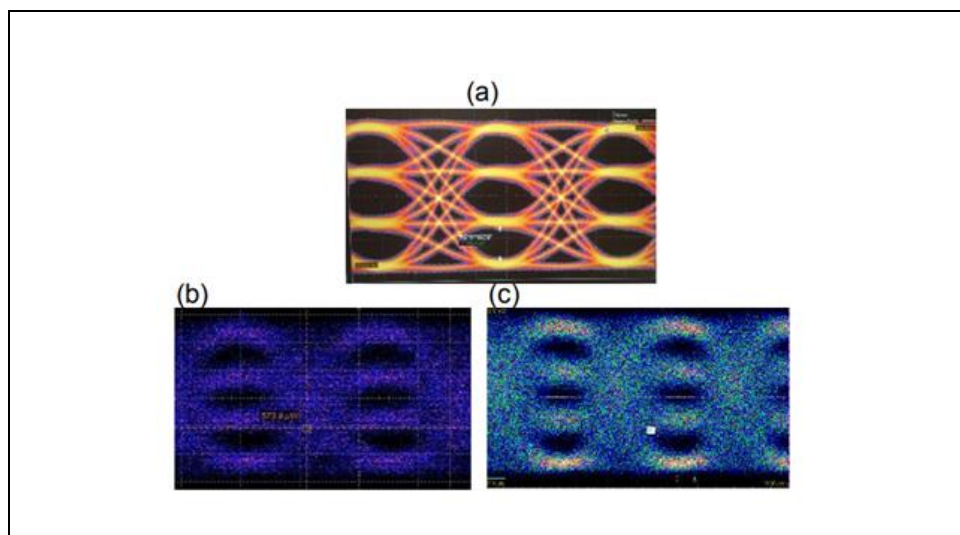


Figura 25. Diagrama de Ojo

Fuente: (Chang & Bhoja, 2017)

(Tuo, y otros, 2018) demuestran la plataforma Silicon Photonics para aplicaciones de centro de datos a 400 Gb/s, que es una solución factible para conexiones de fibra de 500m, 2km y 120km, esta plataforma fotónica de silicio cuenta con soluciones de 100, 200 y 400 Gb/s, para diferentes distancias, cuenta también con componentes ópticos pasivos y activos de banda C y O, que soportan aplicaciones de hasta 400 Gb/s. A continuación, muestra el diagrama de ojo de una señal transmitida a 400 Gb/s con esta tecnología.

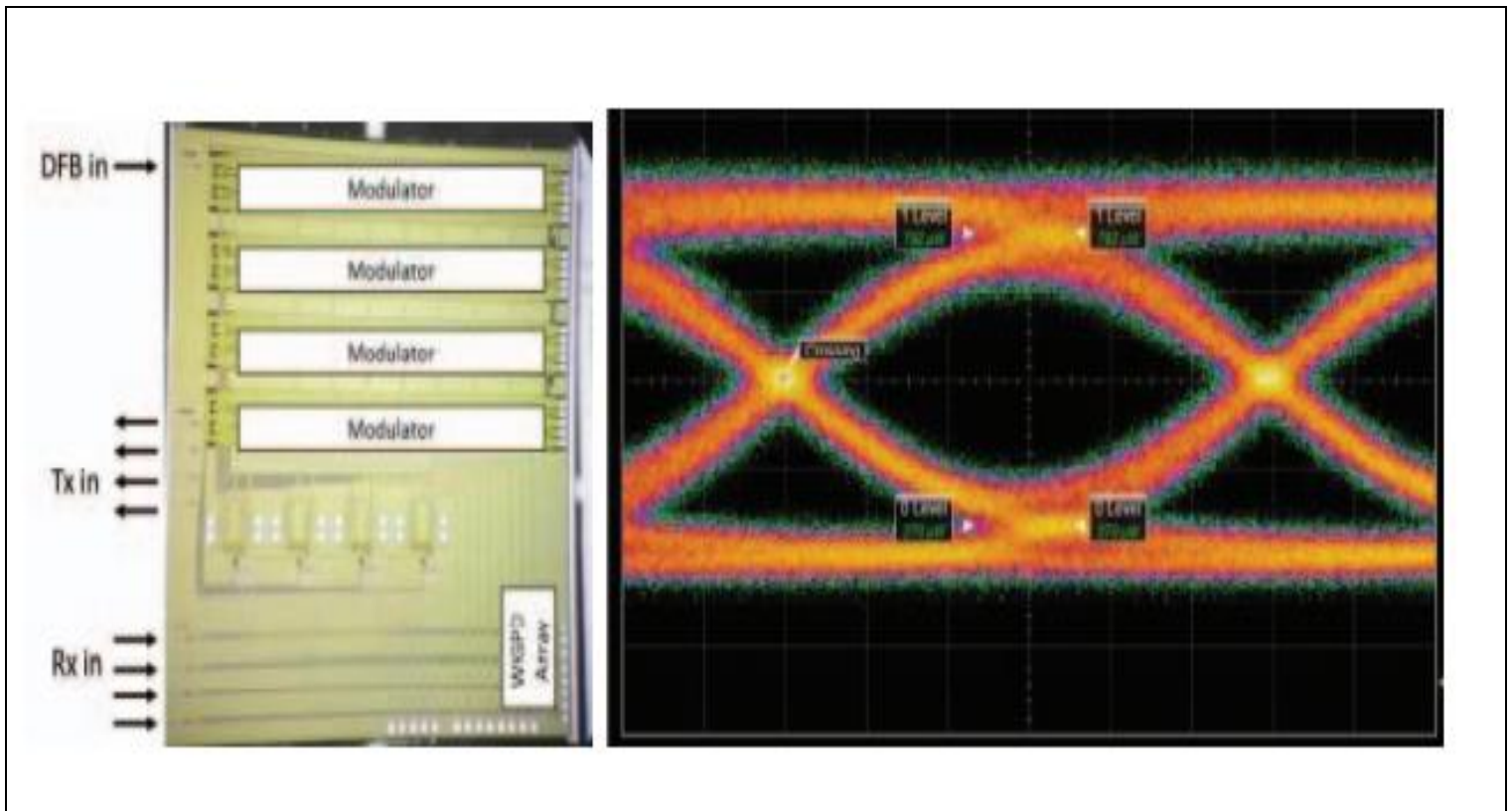


Figura 26. Diagrama de ojo de un dispositivo de una señal a 400 Gb/s

Fuente: (Tuo, y otros, 2018)

(Ghillino, y otros, 2018) en su investigación emplean el entorno del software Optsim de Synopsys para diseñar y simular circuitos integrados fotónicos con el fin de estudiar el desempeño de una transmisión a 400 Gb/s. La fotónica integrada es una tecnología que proporciona conectividad de alta velocidad y circuitos a gran escala. Mediante OptSim se puede realizar circuitos integrados fotónicos (PIC), A continuación, en el literal (a) de la Figura 27 se muestra el diagrama de dispersión, en el literal (b) el espectro de frecuencias y en el literal (c) el BER vs OSNR.

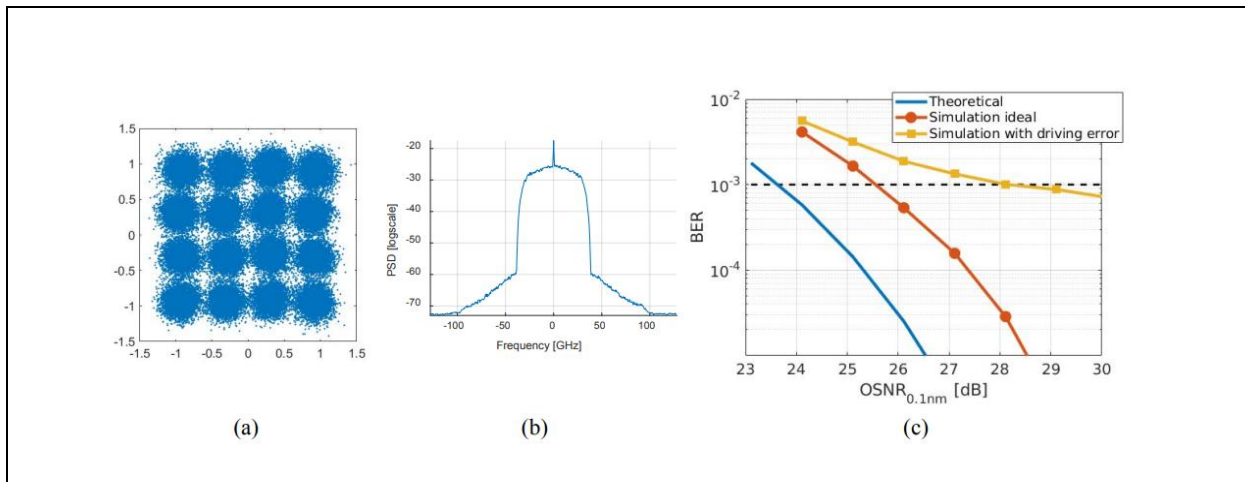


Figura 27. Circuitos integrados Fotónicos

Fuente: (Ghillino, y otros, 2018)

De acuerdo al conocimiento obtenido según (Arévalo G, 2019), se muestran distintas tendencias a futuro de despliegue de redes de transporte hasta el año 2022, tales como: la red SONET/SDH tuvo un enorme auge hasta el año 2011 y era la red que más soportaba el tráfico de grandes volúmenes de datos en el mundo, pero en los últimos años su uso ha ido cayendo de forma exponencial, mientras que las tendencias de redes de larga distancia WDM<sup>8</sup> long haul crecen a un ritmo acelerado, al igual que las redes metropolitanas WDM long haul. Las redes WDM metropolitanas incluso van creciendo mucho más que las redes antes mencionadas como se observa en la Figura 28.

<sup>8</sup> WDM. - Multiplexación por división de longitud de onda. es una técnica de transmisión de fibra óptica que permite el uso de múltiples longitudes de onda de luz (o colores) para enviar datos por el mismo medio.

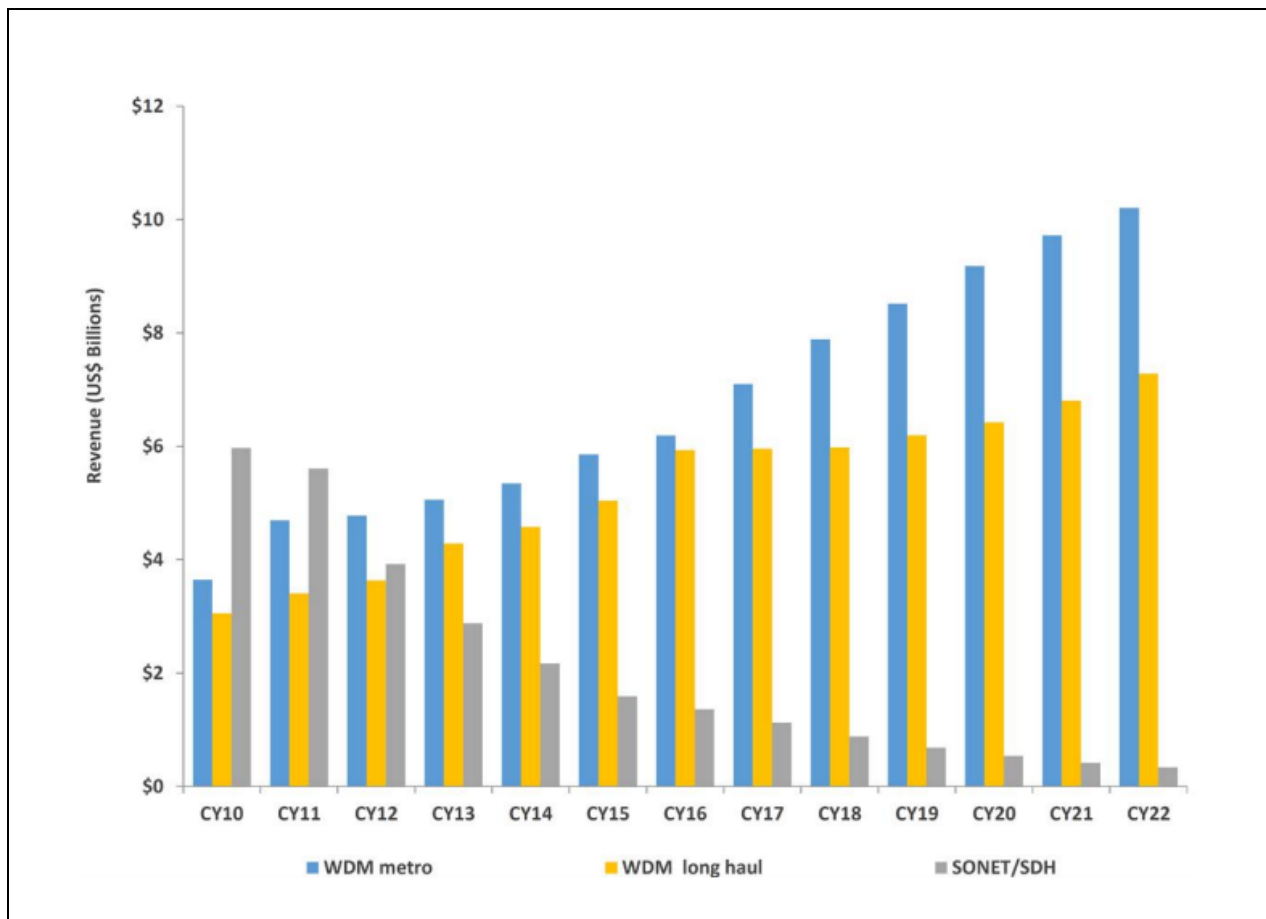


Figura 28. Redes WDM

Fuente: (Doiron, 2018)

Las redes <10G OUT-1/GbE/FC & SONET /SDH entre los años 2010 hasta el 2017 fueron los canales más predominantes en el mundo, pero a partir del año 2018 empezaron a decrecer considerablemente, para el año 2022 se pronostica que ya no existirán estas redes de transporte. Los canales a 10G out-2/OC/-192/10GbE a partir del año 2010 han tenido un buen crecimiento, pero a partir del año 2019 se pronostica que para el 2020 en adelante empezarán a decrecer. Los canales 40G OUT-3/40GbE/OC-768 a diferencia del resto en el año 2010 quisieron nacer, pero con el pasar del tiempo, no lograron su objetivo, por tal hecho empezaron a desaparecer. Los canales 200 Gb/s OUTC2/200GbE empezaron a nacer en el año 2016 y este canal ha ido

creciendo proporcionalmente al igual que las redes de 400 Gb/s OUTC4/400GbE y se pronostica que su tendencia seguirá en crecimiento. Los canales que más sobresalen y se están empezando a implementar son los canales de 100G OUT-4/100GbE, que son los canales en crecimiento, su mayor ventaja es que con esta implementación se tiene un progreso de 10 veces más, es decir se reemplaza el enlace de 10 por uno de 100 y así la relación costo-beneficio se justifica, como se detalla a continuación (Doiron, 2018).

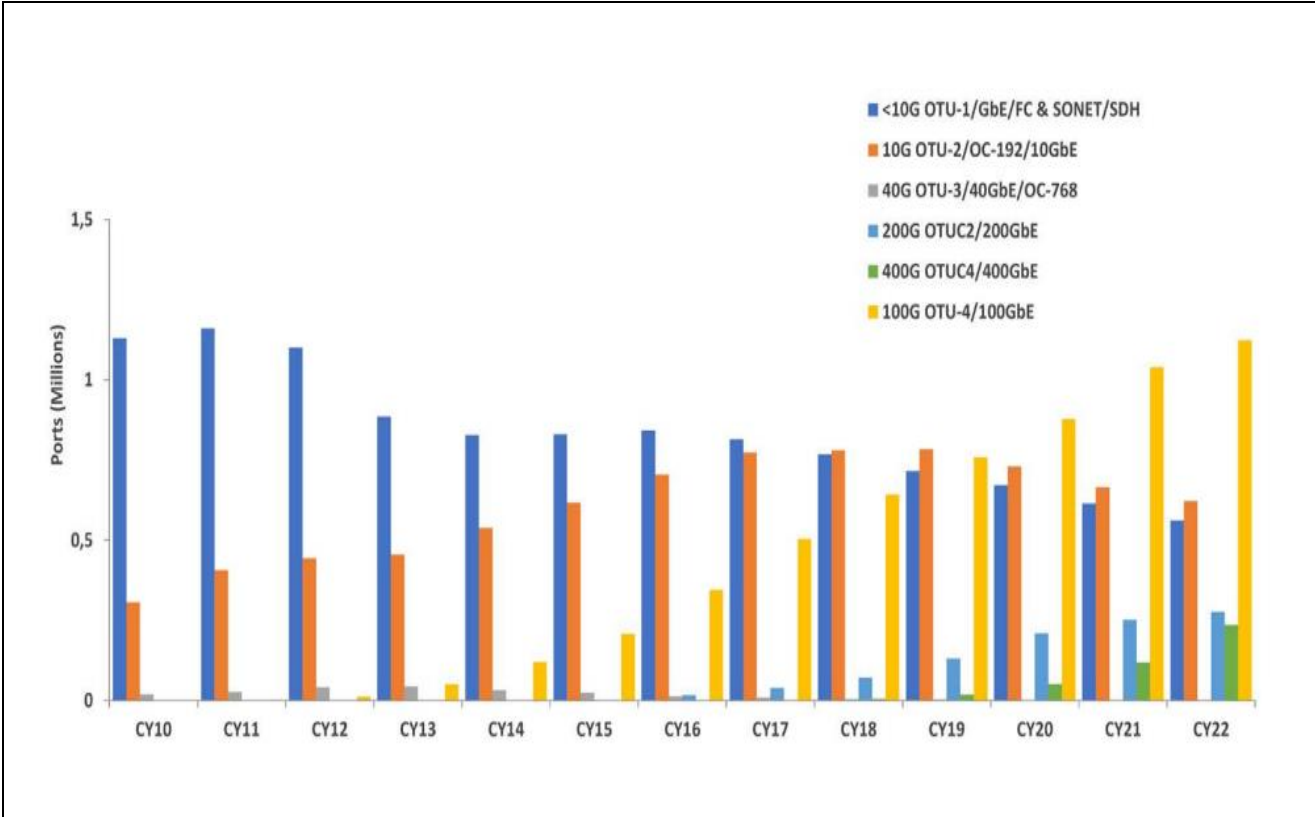


Figura 29. Canales más predominantes en el mundo

Fuente: (Doiron, 2018)

En cuanto a la distancia de los enlaces, se evidenció que en el año 2018 existía una gran demanda de distancia a menos de 100km, mientras que la proyección que se hacía para el año 2021 fue la prevalencia de enlaces de longitud mayor a 100km (Doiron, 2018).

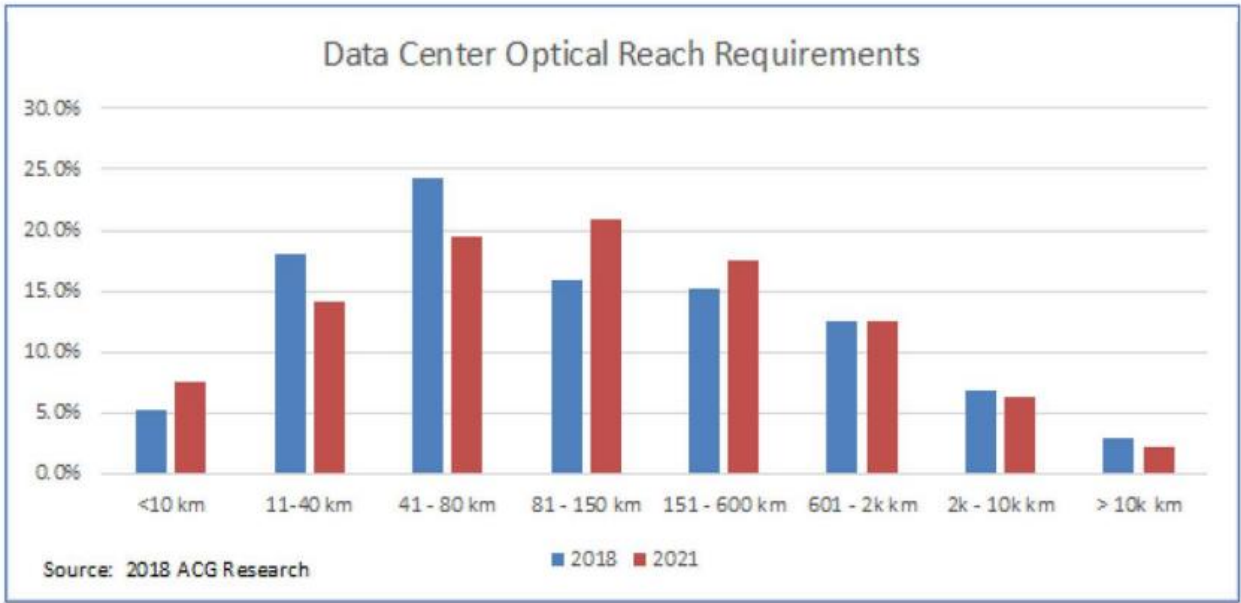


Figura 30. Requerimientos para Data Center

Fuente: (Doiron, 2018)

(Kent, 2020) demostró en su investigación una red a 400 Gb/s, denominada Waveserver 5, de onda única a través de 4.000 km, solucionando aplicaciones de alta capacidad y alto rendimiento como la óptica coherente que soporta capacidades de servicio más allá de los 400 Gb/s, permitiendo una máxima eficiencia espectral para los centros de datos de interconexión (DCI). Waveserver 5 transporta diferentes redes, sobre una sola longitud de onda, cuenta con el 50% más de capacidad por longitud de onda, y un 20% más de eficiencia espectral, como se observa a continuación.

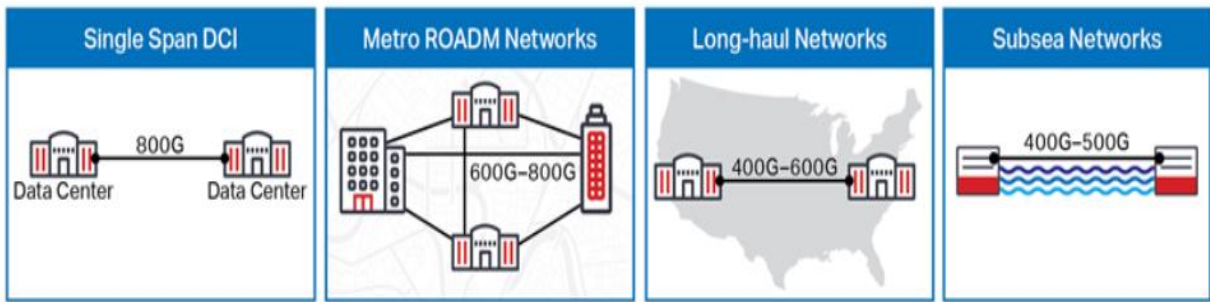


Figura 31. Waveserver 5 es adecuado para todas las aplicaciones

Fuente: (Kent, 2020)

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA A 400G**

En este capítulo se describe el desarrollo de la simulación, empleando Matlab y Optsim, de un sistema de comunicaciones por fibra óptica a 400 Gb/s, para demostrar la factibilidad de la transmisión de datos a altas velocidades, empleando un esquema de modulación de intensidad PAM-4 y detección directa, que son las técnicas más económicas para la transmisión de datos por fibra óptica.

#### **Introducción a Matlab**

El software Matlab es una herramienta que utiliza un lenguaje de programación sofisticado, donde se realizan cálculos numéricos con vectores y matrices, a su vez permite el manejo de polinomios, funciones, ecuaciones diferenciales ordinarias y gráficos, en el cual se puede trabajar tanto con valores reales como complejos, dando así al usuario una solución a sus problemas matemáticos. Esta herramienta genera bucles, condiciones y bifurcaciones.

**Algunas de las aplicaciones más comunes que se pueden implementar en Matlab son las siguientes:**

- Análisis de la tasa de bit errado (BER)
- Generación de interfaces graficas de usuario
- Generación de scripts en lenguaje de alto nivel
- Generación de diagramas de ojo y constelaciones

Generación de plots en 2D y 3D para análisis gráfico

Análisis de las diferentes técnicas de modulación y demodulación

## Interfaz Gráfica de Matlab

La interfaz gráfica permite al usuario organizarse de una mejor manera para la realización de proyectos. Las principales ventanas de configuración serán mostradas a continuación:

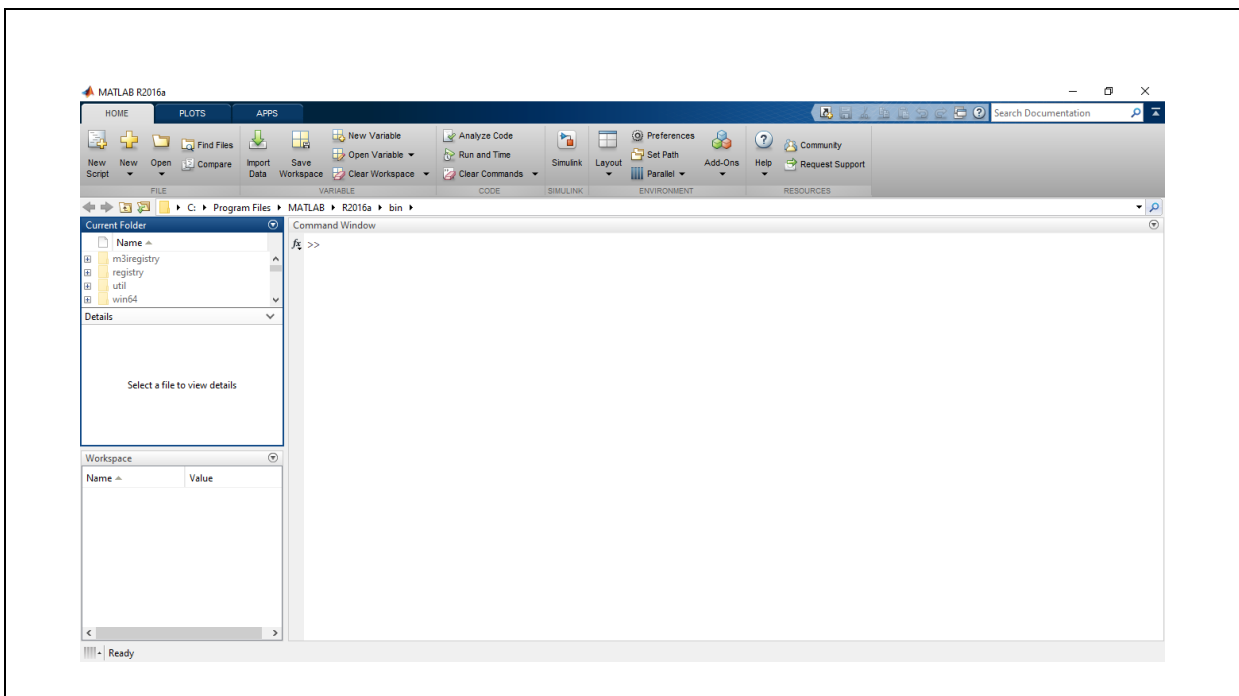


Figura 32. Interfaz Gráfica de Matlab

Elaborado por: El autor

**Ventana de historial:** se guarda toda la lista de comandos que se ha utilizado.

**Ventana de comandos:** ejecuta las órdenes y presenta los resultados, además señala los errores en las líneas de comando que se está ejecutando.

**Ventana de trabajo o workspace:** en esta ventana se procede a trabajar en el modelo matemático a realizar, a la vez almacena las variables definidas.

## Optsim

Esta herramienta permite generar simulaciones con sistemas ópticos<sup>9</sup>, tiene una gran librería, con diferentes elementos interconectados entre sí que permiten realizar el diseño, simulación y análisis de sistemas de comunicación óptica a gran precisión y resultados confiables.

La herramienta Optsim permite, entre otras, la generación de diagramas de forma de onda de la señal, diagramas de ojo, datos y gráficas de BER, estimación de la potencia óptica recibida, generación de mapas y dispersión<sup>10</sup>.

Una de las características principales del software Optsim es la facilidad de poder trabajar en co-simulación con Matlab.

Tabla 3. Características de Optsim

CARACTERÍSTICAS		
LIBRERÍAS	INTERFASES	SISTEMAS ÓPTICOS
Transmisores	MATLAB	Sistema DWDM/CWDM
Receptores	BeamPROP	Sistema FTTx/GPON
Amplificadores	GratingMODE	Redes LAN ÓPTICAS
Moduladores	LaserMOD	
Fibra Óptica		

Elaborado por: El autor

<sup>9</sup> Sistema Óptico. - Consiste de un transmisor que codifica el mensaje dentro de una señal óptica, un canal, que transporta la señal a su destino, y un receptor, que reproduce el mensaje desde la señal óptica recibida.

<sup>10</sup> Dispersión. - Es la propagación de la señal con el paso del tiempo.

El software Optsim permite tener dos técnicas utilizadas para la simulación de enlaces ópticos, de acuerdo a los resultados previstos, estos son:

**Simulación en modo bloque:** simulación en el dominio de la frecuencia.

**Simulación en modo muestra:** simulación en el dominio del tiempo.

A continuación, se observa un diagrama que detalla los modos de simulación disponibles en el software Optsim.

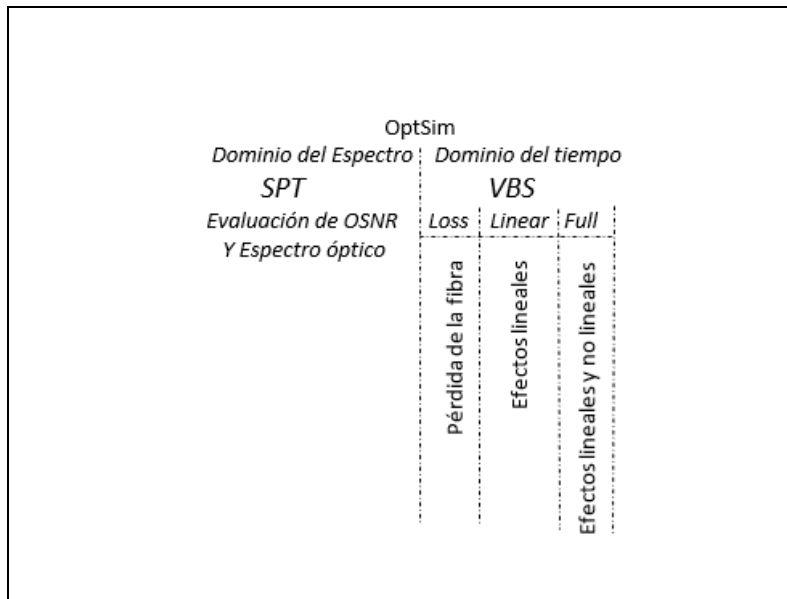


Figura 33. Técnicas de Simulación

Elaborado por: El autor

### Técnica de Propagación Espectral (SPT)

Las señales ópticas se propagan mediante espectros de potencia en el dominio del espectro, donde los componentes tienen la función de transferencia, mediante el cual no toma en cuenta las no linealidades de la fibra.

## Técnica de Ancho de Banda Variable (VBS)

Se utiliza para la simulación de efectos lineales y no lineales, en el dominio del tiempo, para los componentes ópticos y eléctricos.

## Configuración para la creación de la co-simulación en Optisim y Matlab

Para la respectiva configuración de la co-simulación en Optisim y Matlab se utilizó el Modo Muestra, en el cual se observa de mejor manera los efectos temporales en la transmisión.

Para la realización de la co-simulación se ingresó a la carpeta Modo Muestra, en cada carpeta se encontraron varios elementos, se ingresó a la carpeta *Custom Models*, donde consta el primer elemento que es de Matlab para la realización del mismo.

A continuación, se insertó el elemento dentro de la ventana para el inicio de la programación de los puertos y el nombre del elemento

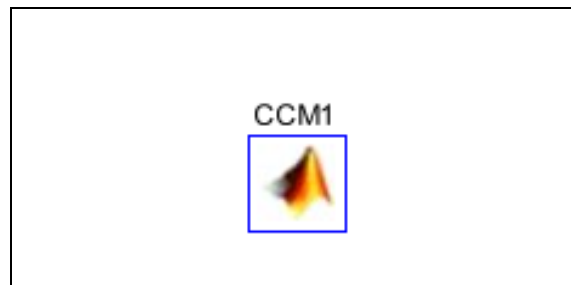


Figura 34. Elemento de Co-simulación Matlab

Elaborado por: El autor

Para dar inicio a la co-simulación se da click en el icono *CCM Wizard*, donde se abre una nueva ventana para la configuración de los componentes.

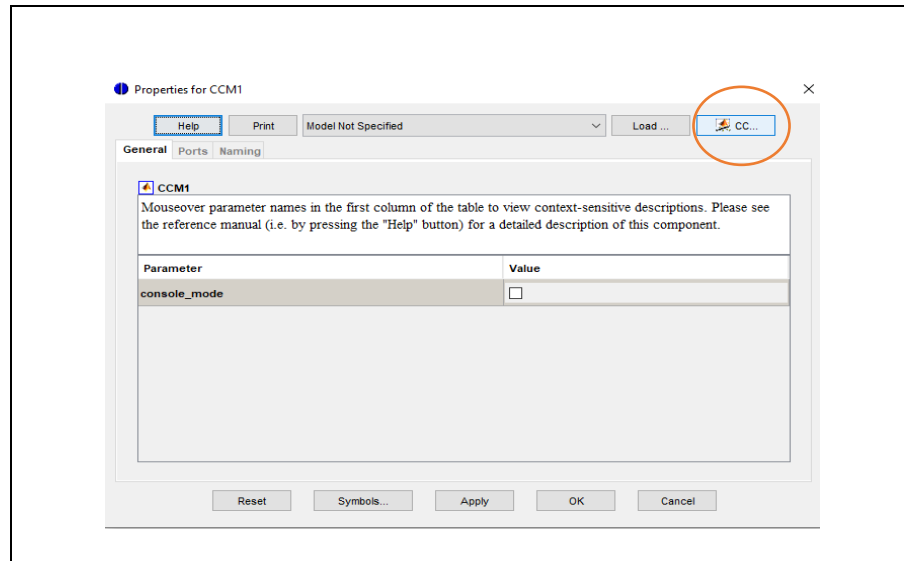


Figura 35. Configuración de Componentes

Elaborado por: El autor

En esta nueva ventana se configuran los atributos de los puertos de entrada y salida tanto del transmisor TX como del receptor RX.

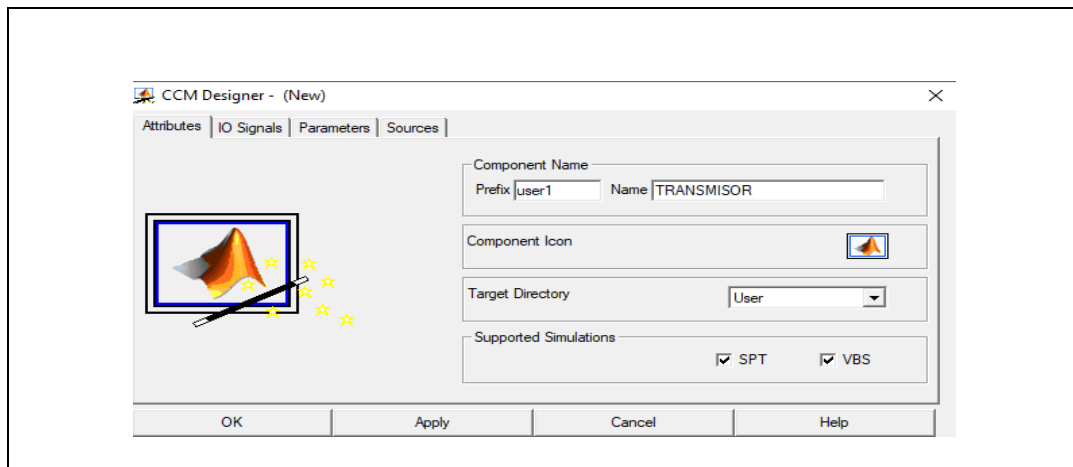


Figura 36. Configuración de Parámetros

Elaborado por: El autor

La co-simulación de Matlab se enlaza con la simulación de Optsim a través de la declaración de puertos. En el caso del TX se usa un puerto eléctrico de salida:

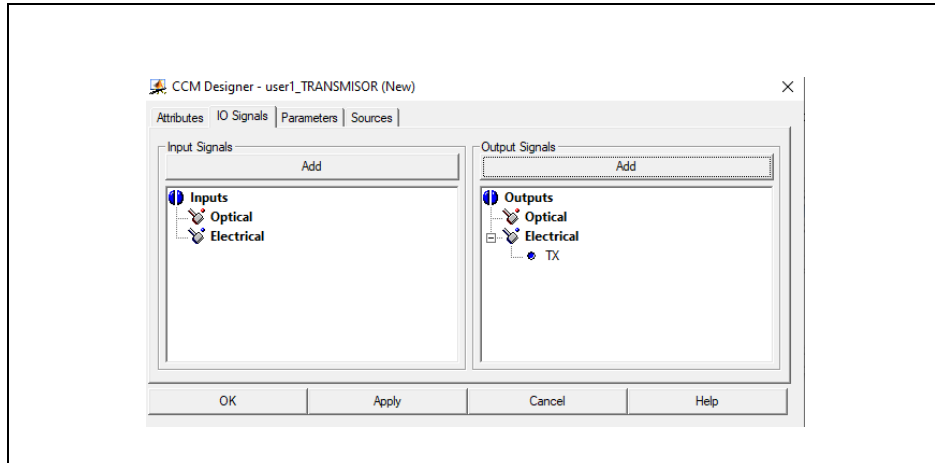


Figura 37. Creación de Puerto TX

Elaborado por: El autor

En la pestaña *Sources* se generan los archivos para la co-simulación. Haciendo clic en *apply/edit* donde se crea una nueva ventana, una ruta donde automáticamente se ejecutan y guardan los directorios de la co-simulación.

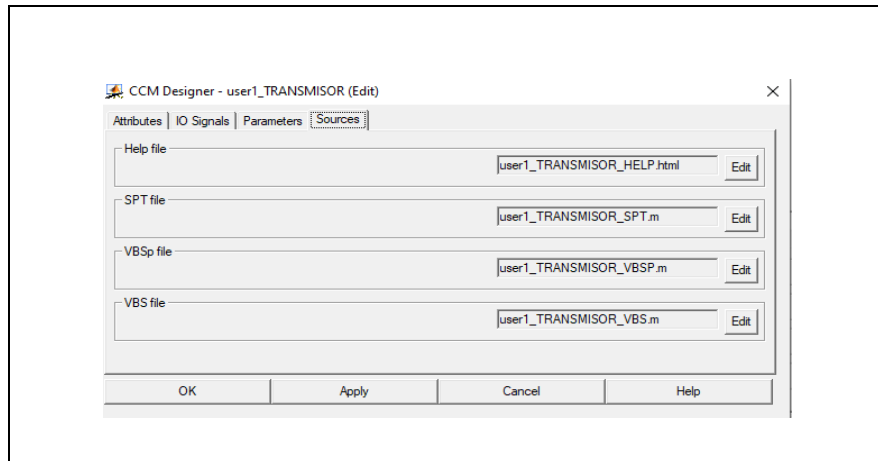


Figura 38. Ventana de acceso a los archivos fuente de la co-simulación con Matlab

Elaborado por: El autor

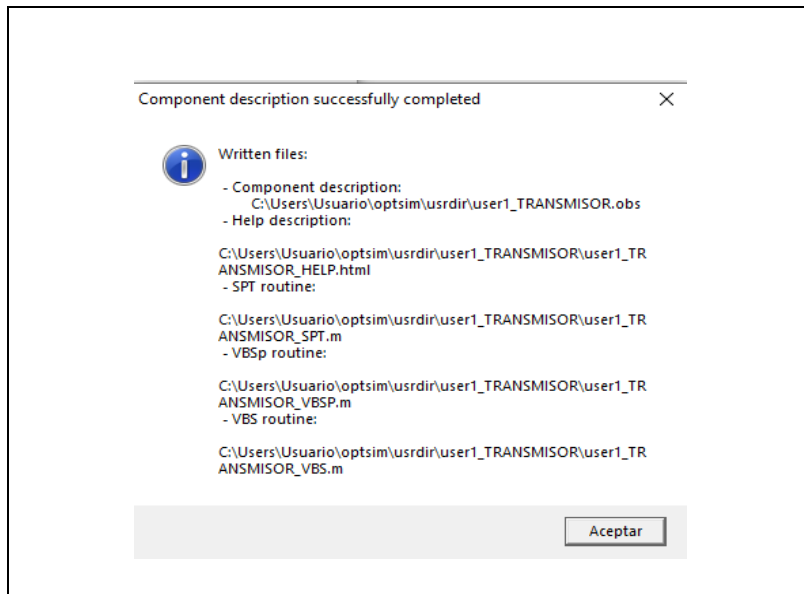


Figura 39. Generación de archivos y su correspondiente ruta

Elaborado por: El autor

Cuando se guarda la configuración se refleja en el ícono del elemento de co-simulación la presencia del puerto configurado.

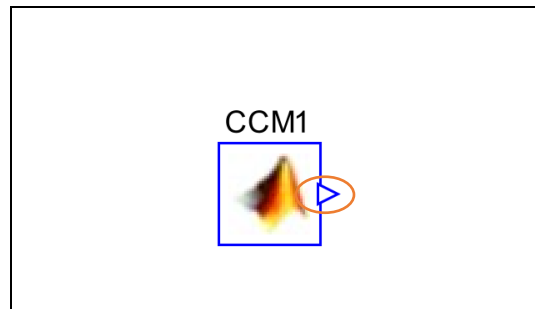


Figura 40. Creación de puerto TX

Elaborado por: El autor

Para la creación del Receptor RX se siguieron los mismos pasos, con la diferencia que en el receptor se colocó un puerto eléctrico de entrada.

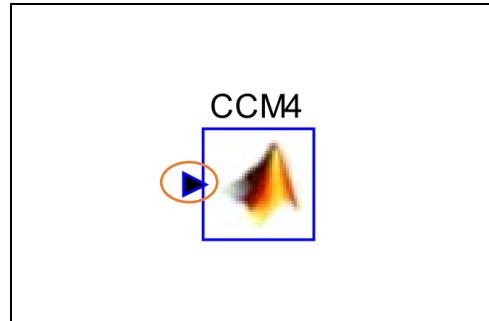


Figura 41. Creación del puerto RX

Elaborado por: El autor

Una vez que se crearon y configuraron los puertos de los elementos tanto del transmisor TX como del receptor RX, se realizó la conexión de los dos puertos y como resultado se obtuvo una comunicación back-to back (BB), que se emplea como referente para la observación de resultados en condiciones ideales.

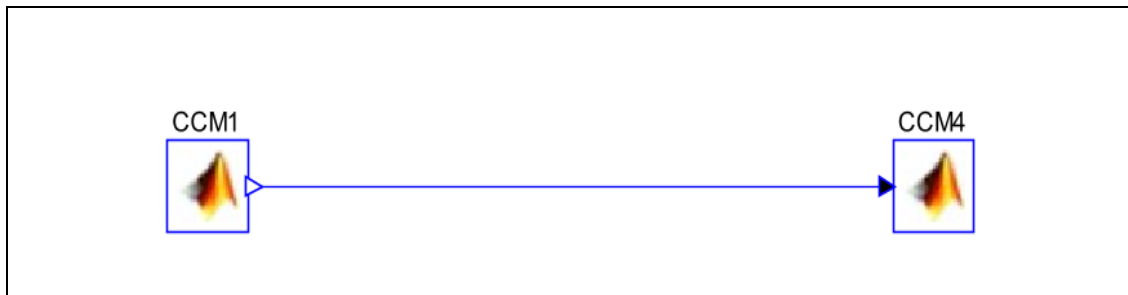


Figura 42. Comunicación TX y RX

Elaborado por: El autor

Para la simulación basta la ejecución de una corrida simple (*single run*):

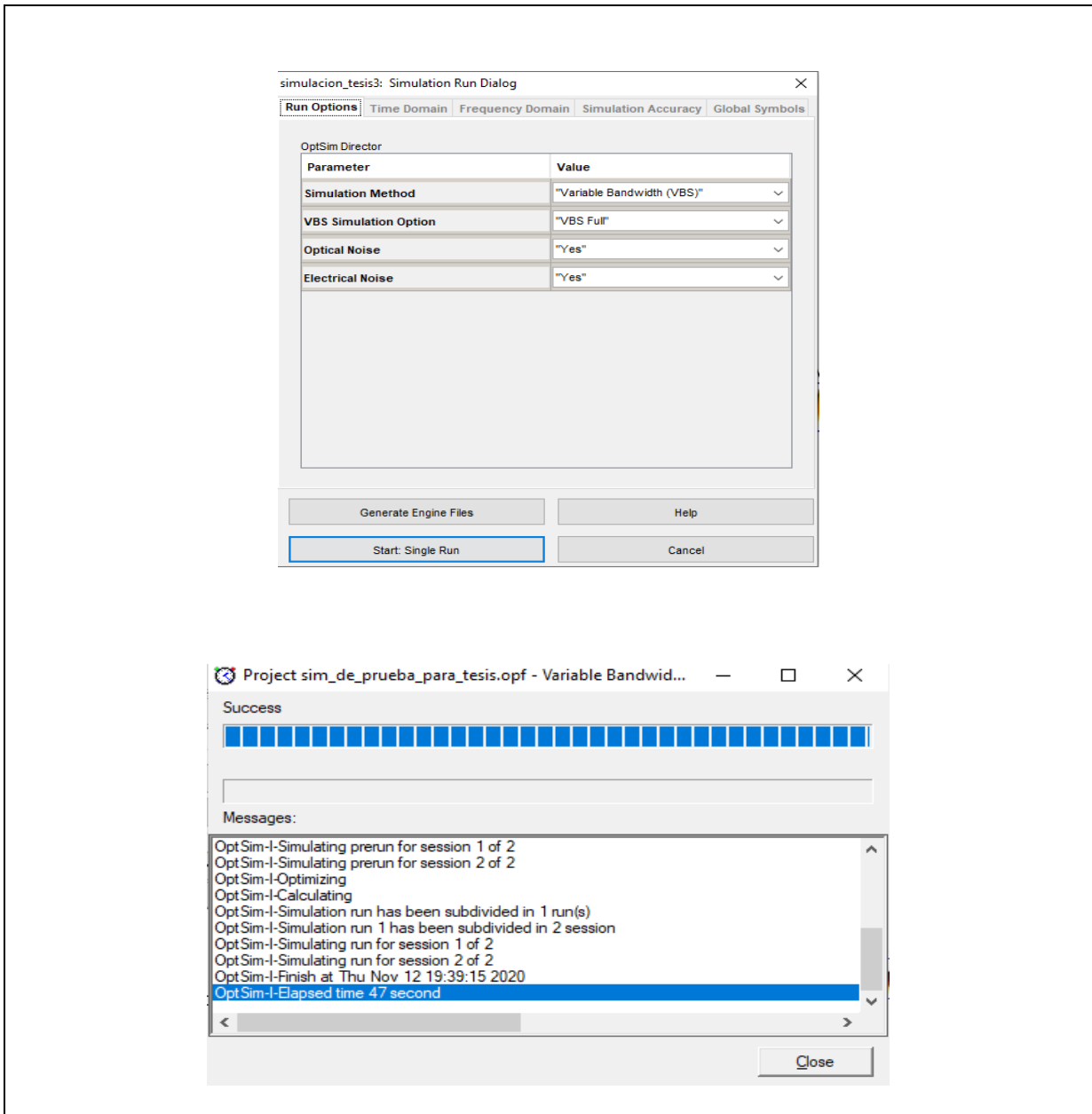


Figura 43. Corrida de prueba para la Co-simulación

Elaborado por: El autor

Si el proceso de comunicación entre Optsim y Matlab es exitoso, se abre una ventana de comandos de Matlab.

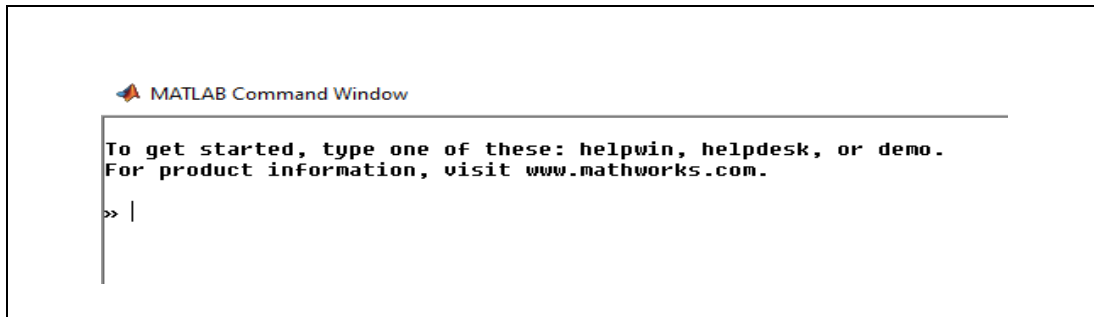


Figura 44. Resultados de comunicación exitosa entre Matlab y Optsim

Elaborado por: El autor

Posteriormente a la ejecución de una prueba BB exitosa, se procede a la implementación del sistema óptico de transmisión de datos, mismo que está compuesto por un transmisor basado en un láser de onda continua, cuya portadora óptica es modulada externamente por un modulador de intensidad tipo Mach Zehnder al cual ingresan los datos eléctricos generados por el módulo de co-simulación con Matlab donde salen los bits/baudios transformados a una señal óptica. El sistema usa además un canal óptico de fibra G652.D compensado en atenuación<sup>11</sup> y dispersión, un atenuador óptico variable que permite simular la existencia de pérdidas adicionales en el canal y un fotoreceptor PIN para transformar la señal óptica en una señal eléctrica.

A continuación, se presenta en la Figura 45 el esquema de red implementada en Optsim, incluyendo los respectivos módulos de integración con Matlab para la simulación de los sistemas de transmisión a 100, 200 y 400 Gb/s.

---

<sup>11</sup> Atenuación.- sea esta acústica, eléctrica u óptica, a la pérdida de potencia sufrida por la misma al transitar por cualquier medio de transmisión

## Simulación y configuración de los parámetros

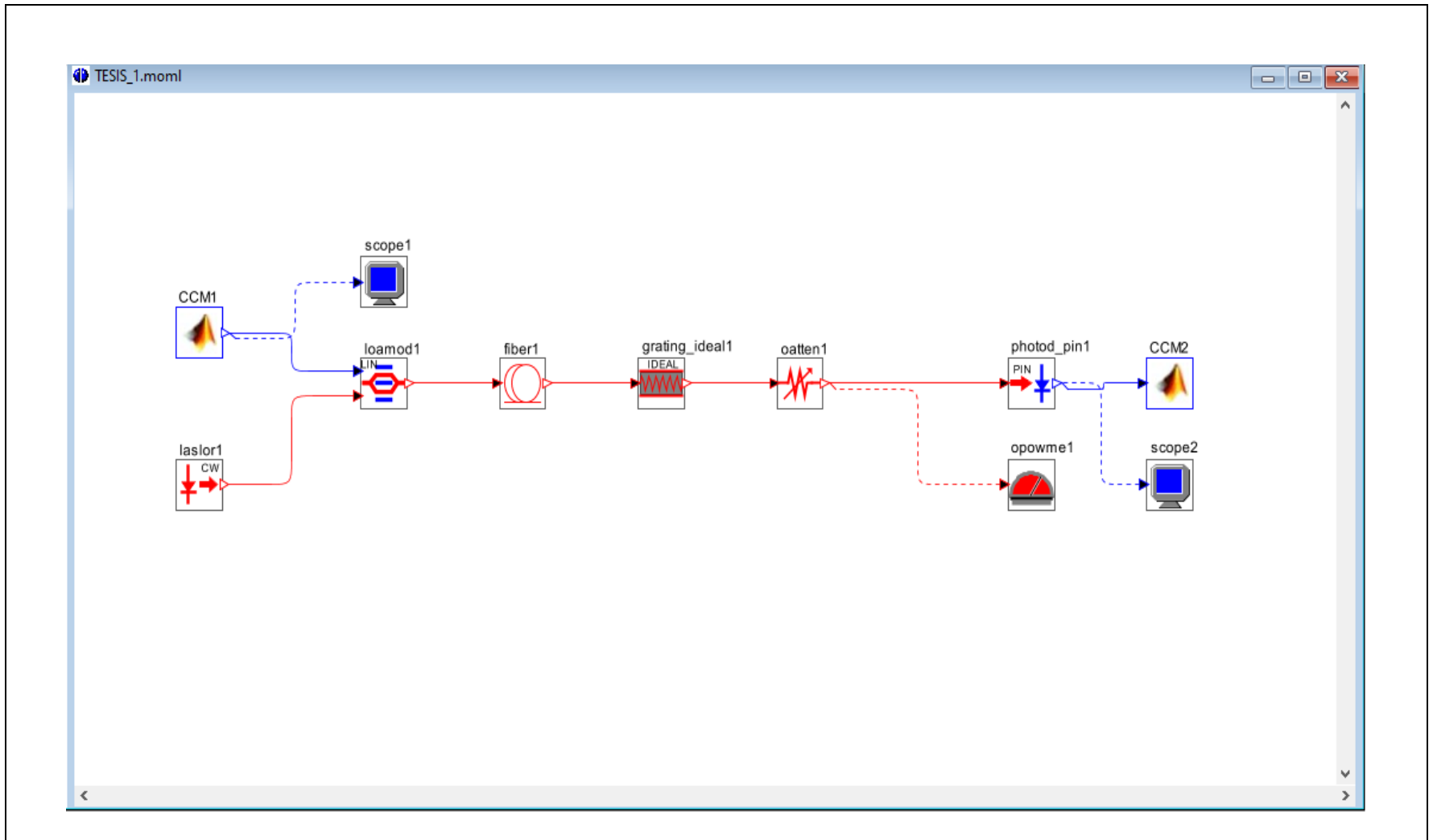


Figura 45. Esquema de la simulación del sistema de transmisión a 100, 200 y 400 Gb/s

Elaborado por: El autor

## Elementos para la simulación del Sistema

A continuación, se describe los elementos del software Optsim, con que se trabajó a una distancia de transmisión de 20 km a 400 Gb/s.

### Láser CW lorentzian

Este elemento implementa un láser de onda continua <sup>12</sup>(CW) de tipo lorentziano. Existen dos opciones de configuración para el ancho de banda de ruido de fase del láser que son: ideal o realista, llamados también ancho de banda infinito y ancho de banda limitado:

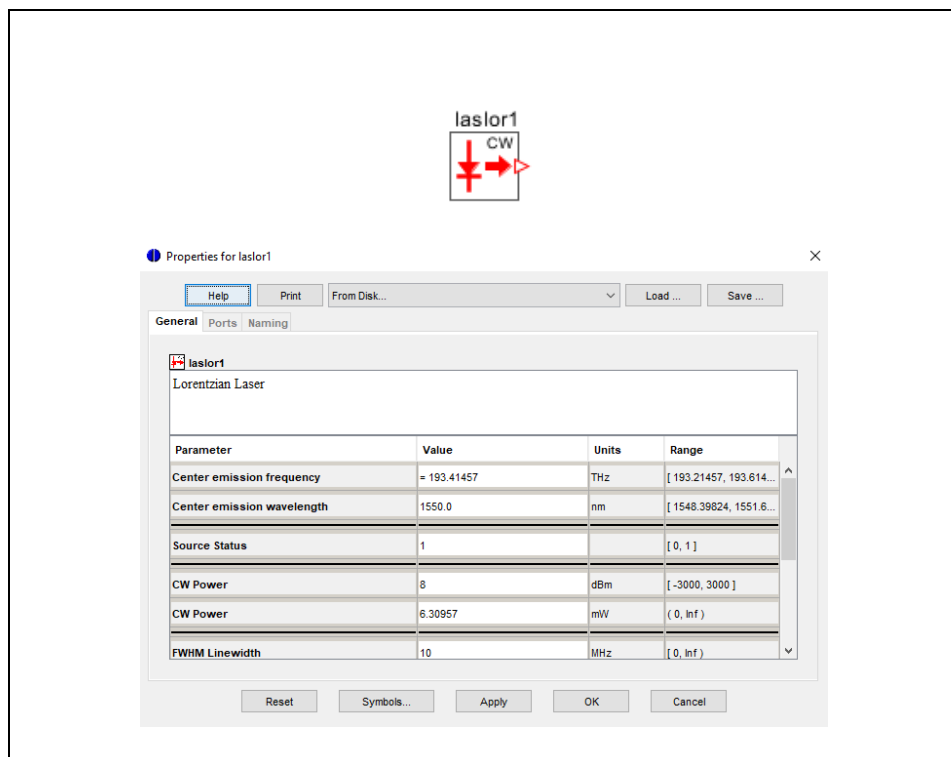


Figura 46. Configuración del láser CW lorentziano

Elaborado por: El autor

<sup>12</sup> Onda Continua. - Es una onda electromagnética de constante amplitud y frecuencia, y en el análisis matemático, de duración infinita

## Modulador óptico de amplitud

Este modelo simula un modulador de amplitud de características electro-ópticas lineales en términos de potencia óptica de salida frente a un voltaje aplicado:

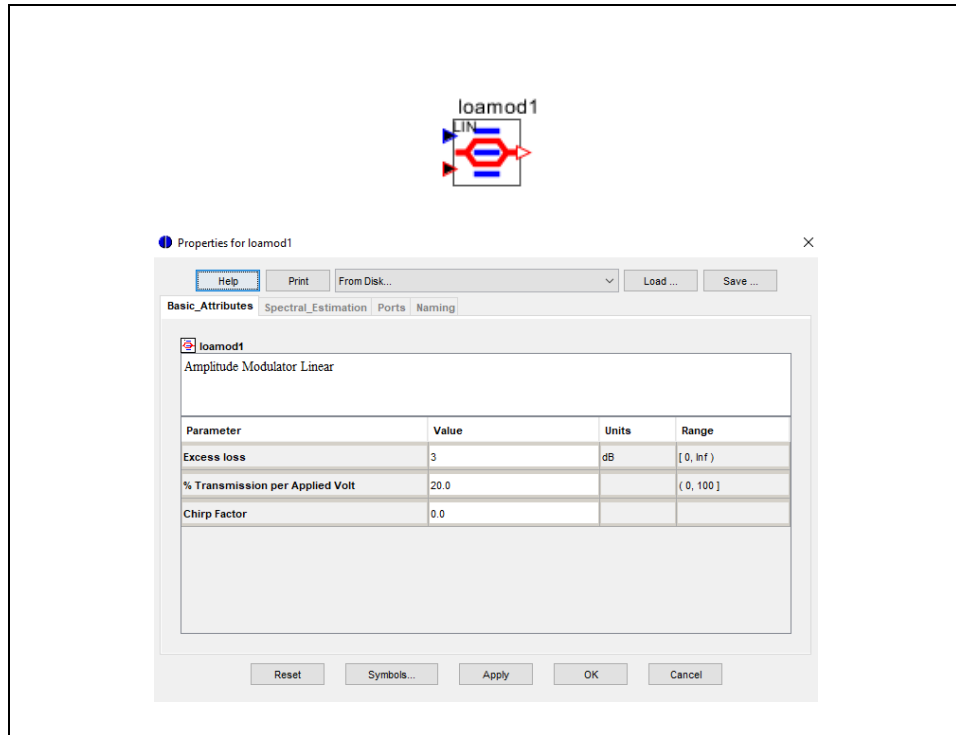


Figura 47. Modulador de amplitud lineal

Elaborado por: El autor

## Enlace de fibra óptica

Este enlace simula la propagación de la señal <sup>13</sup> óptica a través de un tramo de fibra. El modelo de fibra tiene en cuenta los fenómenos lineales y no lineales. Se usaron valores de parámetros correspondientes a una fibra óptica monomodo estándar G652.D, por ser el tipo de fibra óptica monomodo más implementada en el mundo. Específicamente se configuró un valor

---

<sup>13</sup> Propagación de la señal. - es la forma en que se comporta cada una de ellas en el viaje que realizan desde el emisor hasta el receptor.

de atenuación de 0.2 dB/km y una dispersión cromática de 16 ps/nm/km. A continuación, se ilustra su ícono y la ventana de configuración de parámetros de simulación:

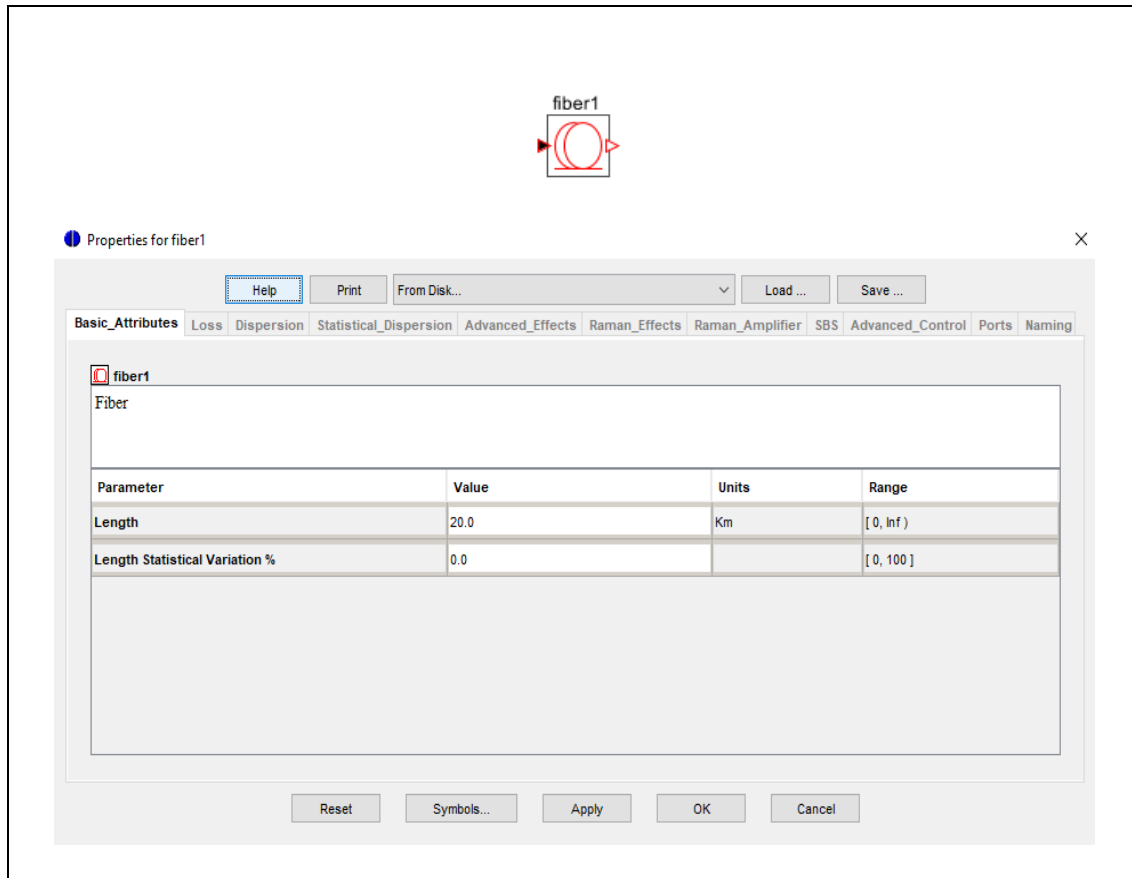


Figura 48. Ícono y ventana de configuración del módulo de simulación de la fibra óptica en Optisim

Elaborado por: El autor

## Rejilla de fibra

Este componente implementa una rejilla de fibra ideal, es decir, un dispositivo de frecuencia de módulo plano y un retardo de grupo constante que genera un valor de dispersión específico. Este elemento sirve para compensar la dispersión cromática acumulada en una determinada longitud de fibra óptica:

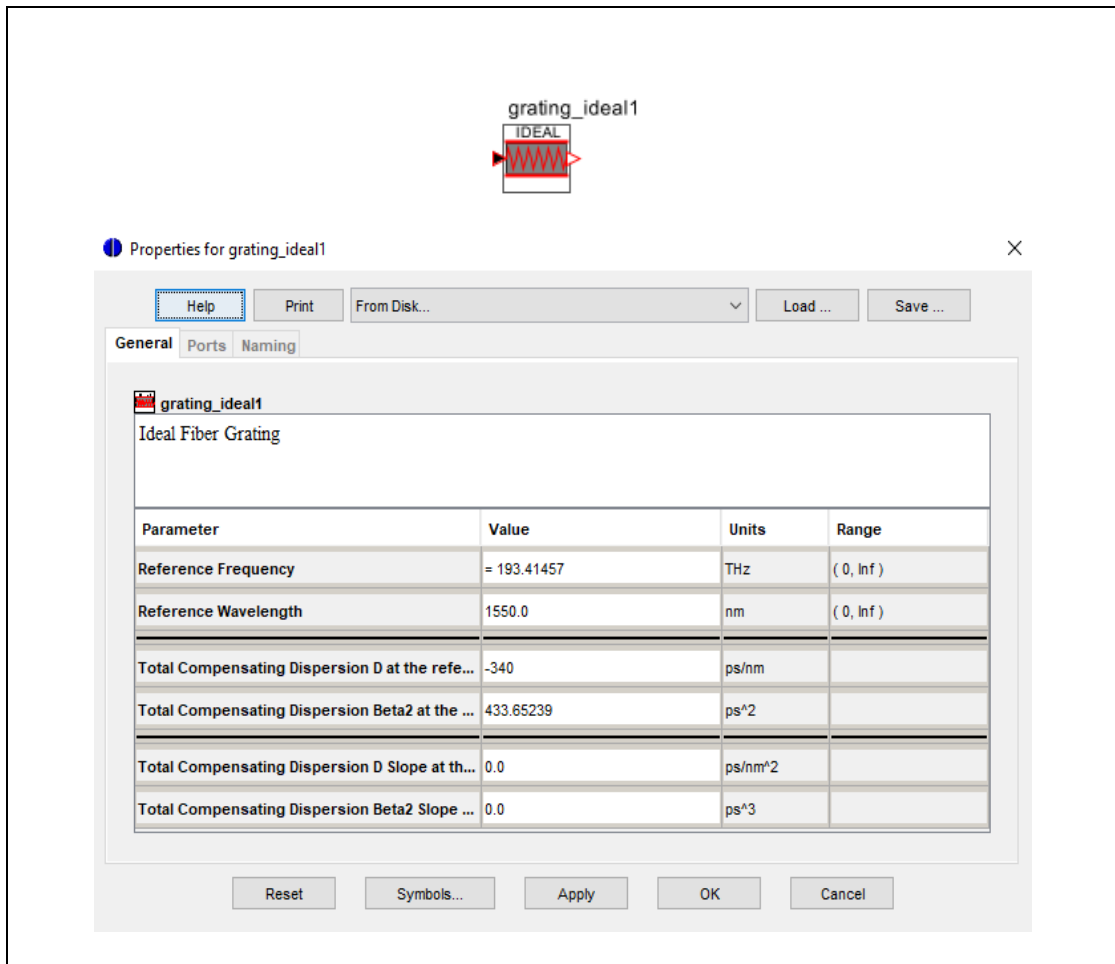


Figura 49. Rejilla de fibra

Elaborado por: El autor

## Atenuador óptico

Este componente simula un atenuador óptico variable, es un dispositivo pasivo que sirve para aumentar o reducir el nivel de potencia de una señal, siendo un elemento complementario para las diferentes atenuaciones con las que se trabaja a N bits tanto para 100, 200 y 400 Gb/s. El atenuador óptico logra la atenuación deseada en enlaces de fibra óptica de acuerdo al parámetro configurado de pérdida:

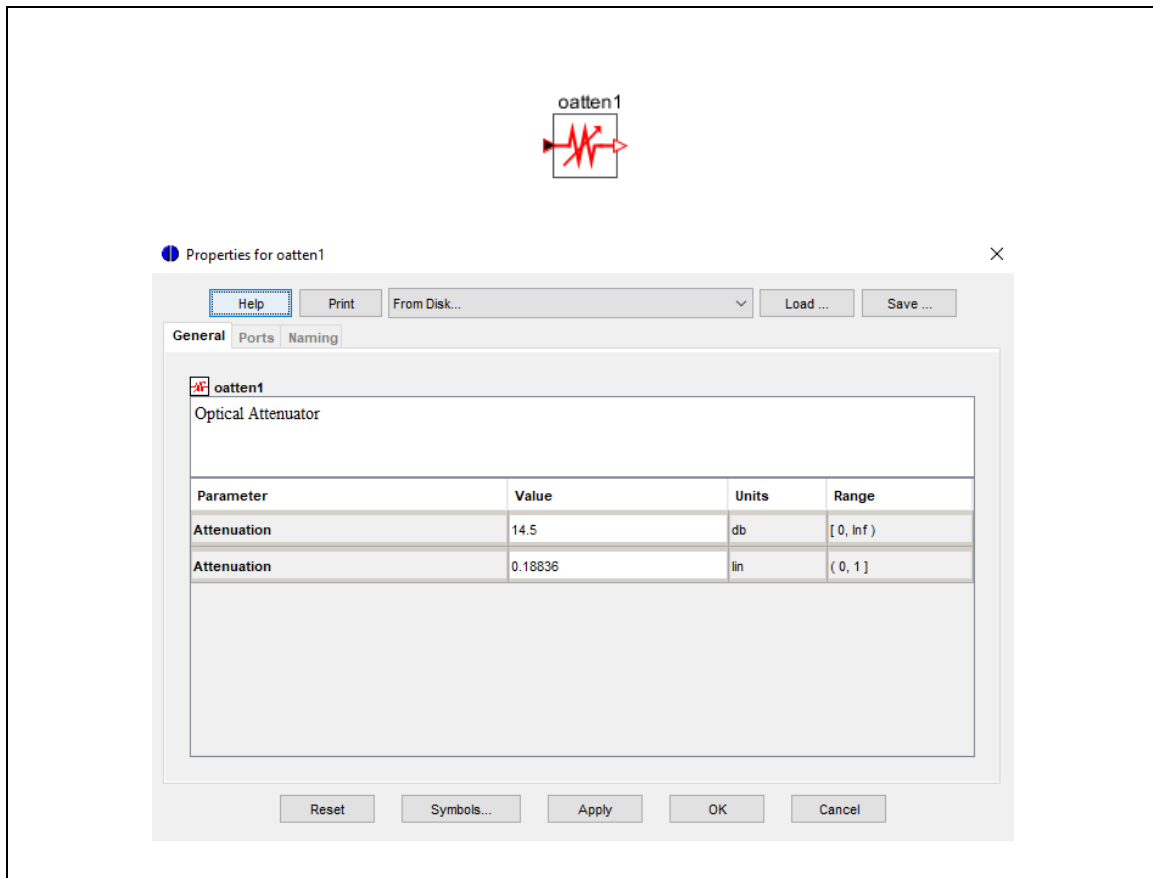


Figura 50. Atenuador óptico

Elaborado por: El autor

## Fotodiodo PIN

Es un tipo de fotodetector mediante el cual se puede convertir señales ópticas en señales eléctricas, este componente funciona con una tensión de polarización inversa aplicada. Con el fin de simular un fotodiodo de buen desempeño (necesario para los sistemas de transmisión de alta velocidad). Hemos tomado la responsividad de un fotodiodo real de laboratorio de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana lugar donde a futuro se pretende hacer la experimentación real con una responsividad de 0.8751 A/W (por ser la responsividad real de un

fotoreceptor comercial disponible en el laboratorio de investigación del Dr. Germán Arévalo) y un ancho de banda de 100 GHz.

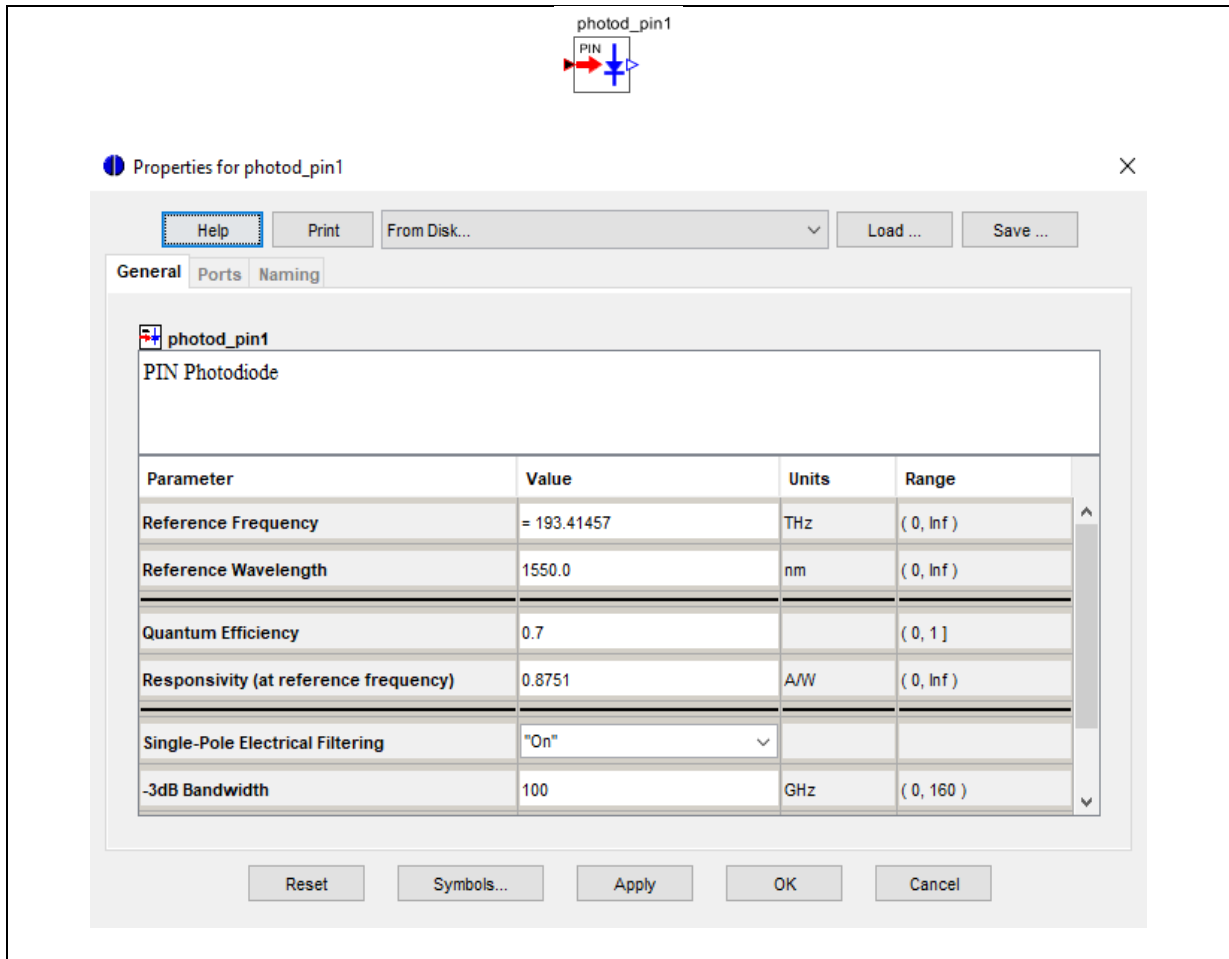


Figura 51. Símbolo y ventana de configuración de parámetros de un fotodiodo PIN

Elaborado por: El autor

## Sonda eléctrica

Este componente simula un analizador de señales eléctricas, lo cual recopila datos para distintos diagramas como:

Amplitud de la señal eléctrica en el dominio del tiempo

Diagrama del ojo

Histograma en el instante de muestre óptimo

Espectro de potencia de la señal eléctrica

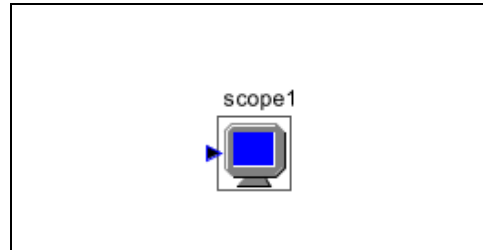


Figura 52. Sonda eléctrica

Elaborado por: El autor

### **Medidor de potencia óptica**

Este elemento mide la potencia óptica en cualquier punto de la red. La potencia medida por este instrumento corresponde a el valor cuadrático medio de la intensidad de la señal óptica. Esta evaluación se puede realizar en el dominio del tiempo o en un sub-rango seleccionado de frecuencias. Es decir, se trata de un medidor de potencia óptica de ancho de banda limitado.

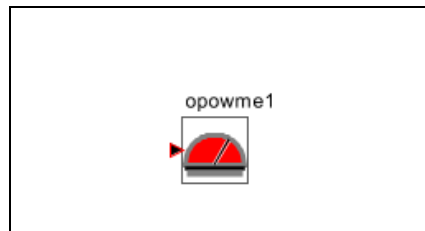


Figura 53. Medidor de Potencia Óptica

Elaborado por: El autor

# CAPÍTULO IV

## ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se puede observar a continuación se generaron y recibieron las señales de intensidad, de cuatro niveles a través del Transmisor “TX” y Receptor “RX”, implementados en Matlab. En primer lugar, se verificó que exista una comunicación” back to back” efectiva, de 212992 bits randómicos codificados, mediante el código Gray<sup>14</sup>, como una señal PAM de 4 niveles, como se ilustra a continuación.

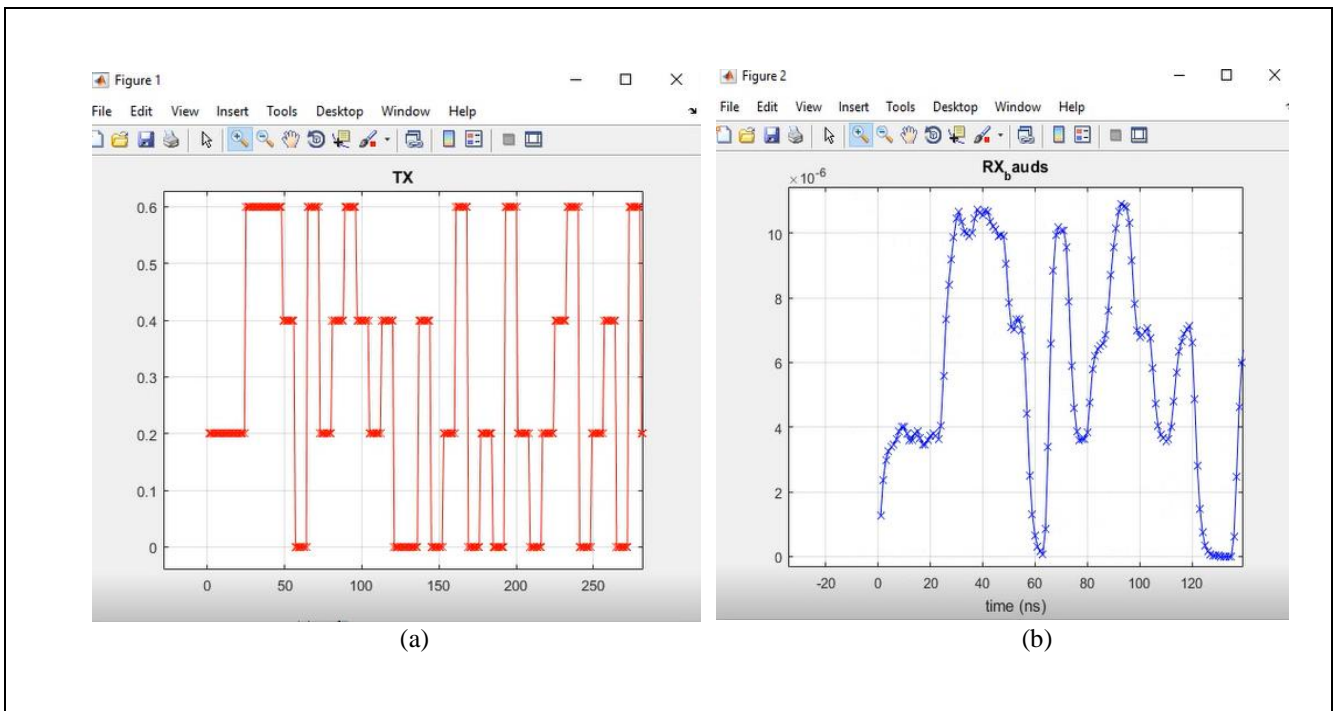


Figura 54. Señales PAM-4 empleadas en la simulación: a) señal transmitida, b) señal recibida

Elaborado por: El autor

<sup>14</sup> Código de Gray. - es un sistema de numeración binario en el que dos números consecutivos difieren solamente en uno de sus dígitos.

Para el correcto cálculo del BER es fundamental obtener los valores de cada uno de los tres niveles de umbral que permiten recibir la señal PAM-4. Para el efecto se traza una recta en el punto de mayor apertura de cada ojo de la señal PAM-4 recibida, con el fin de tener el valor óptimo de cada umbral para su respectivo nivel. En el ejemplo mostrado en la Figura 55 el valor óptimo de umbral superior es 0.0331, el nivel óptimo de umbral intermedio es 0.0205 y el nivel óptimo de umbral inferior es 0.00769.

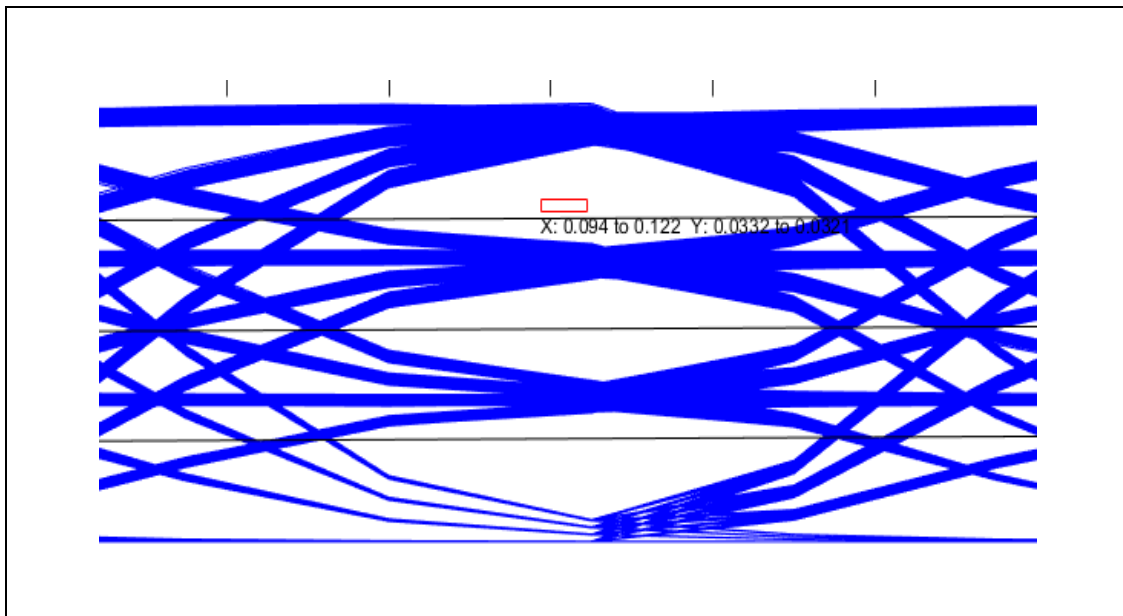


Figura 55. Diagrama de ojo de la señal PAM-4 con comunicación Back to back en perfectas condiciones

Elaborado por: El autor

En las figuras 56, 57 y 58 se presentan los diferentes diagramas del ojo para las señales de 100, 200 y 400 Gb/s respectivamente, a una distancia de 20 km con diferentes potencias recibidas para cada velocidad de transmisión.

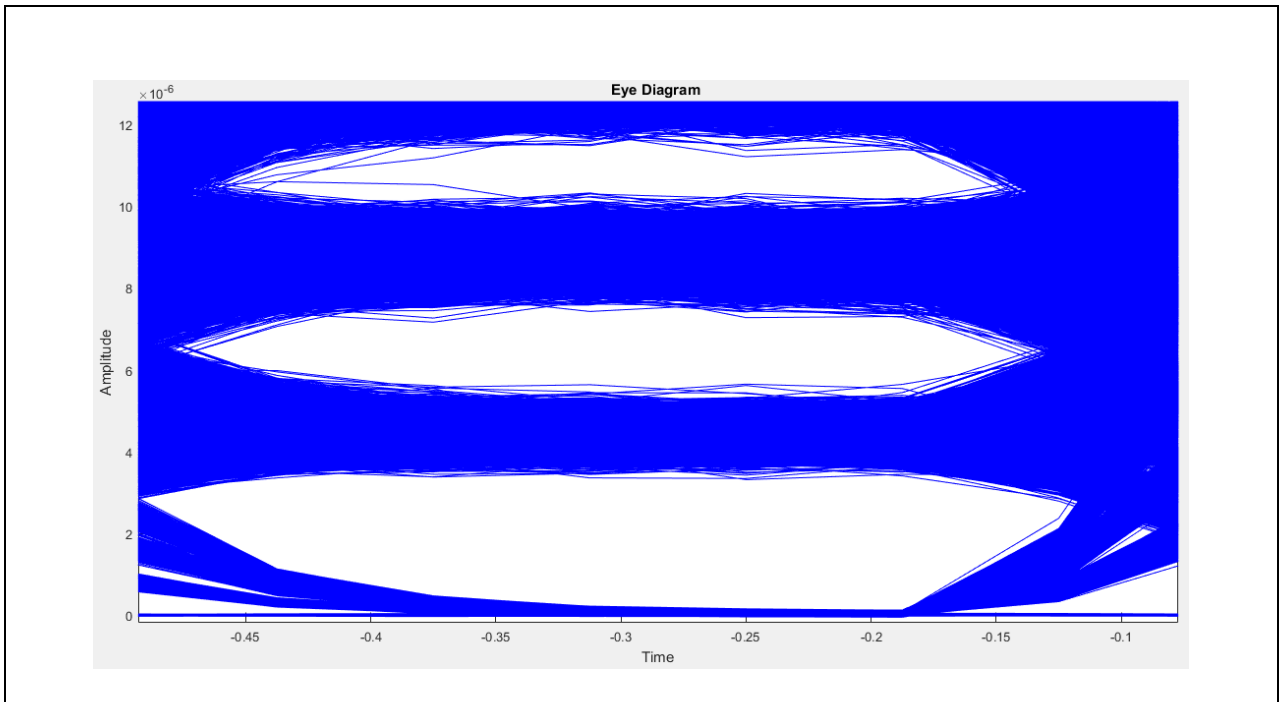


Figura 56. Diagrama de Ojo para una velocidad de 100 Gb/s con una potencia recibida de -21.2 dBm

Elaborado por: El autor

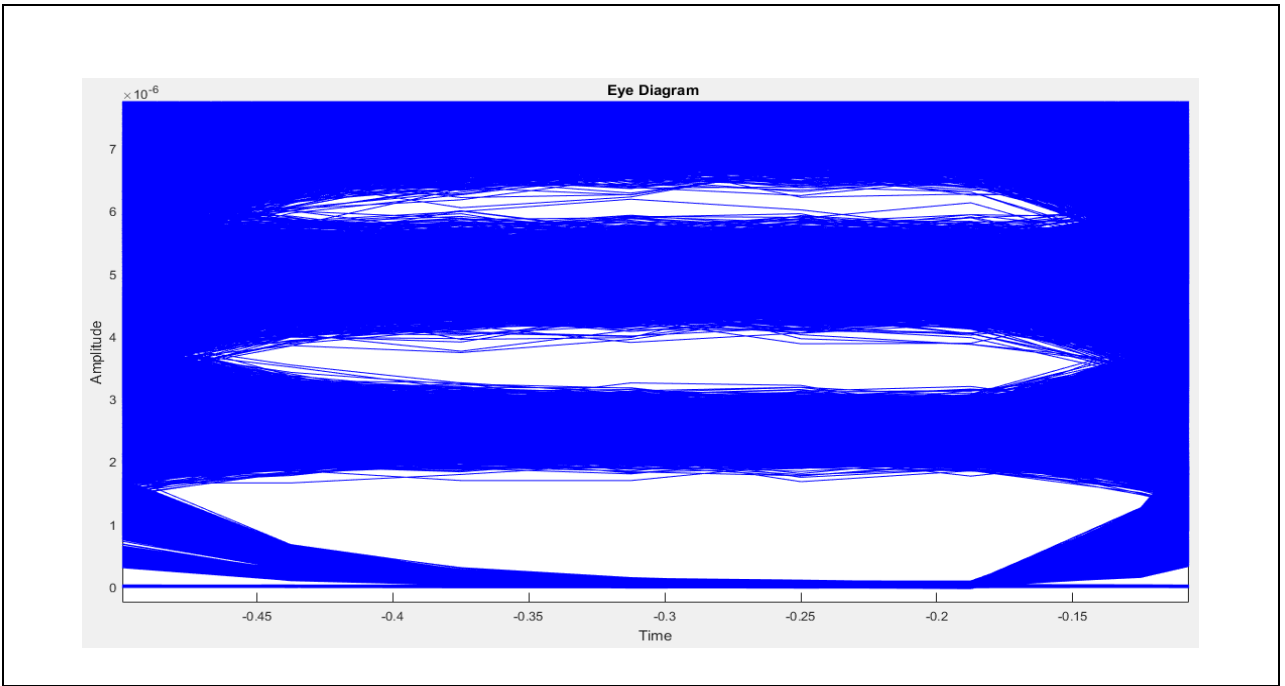


Figura 57. Diagrama de Ojo para una velocidad de 200 Gb/s con una potencia recibida de -23.72 dBm

Elaborado por: El autor

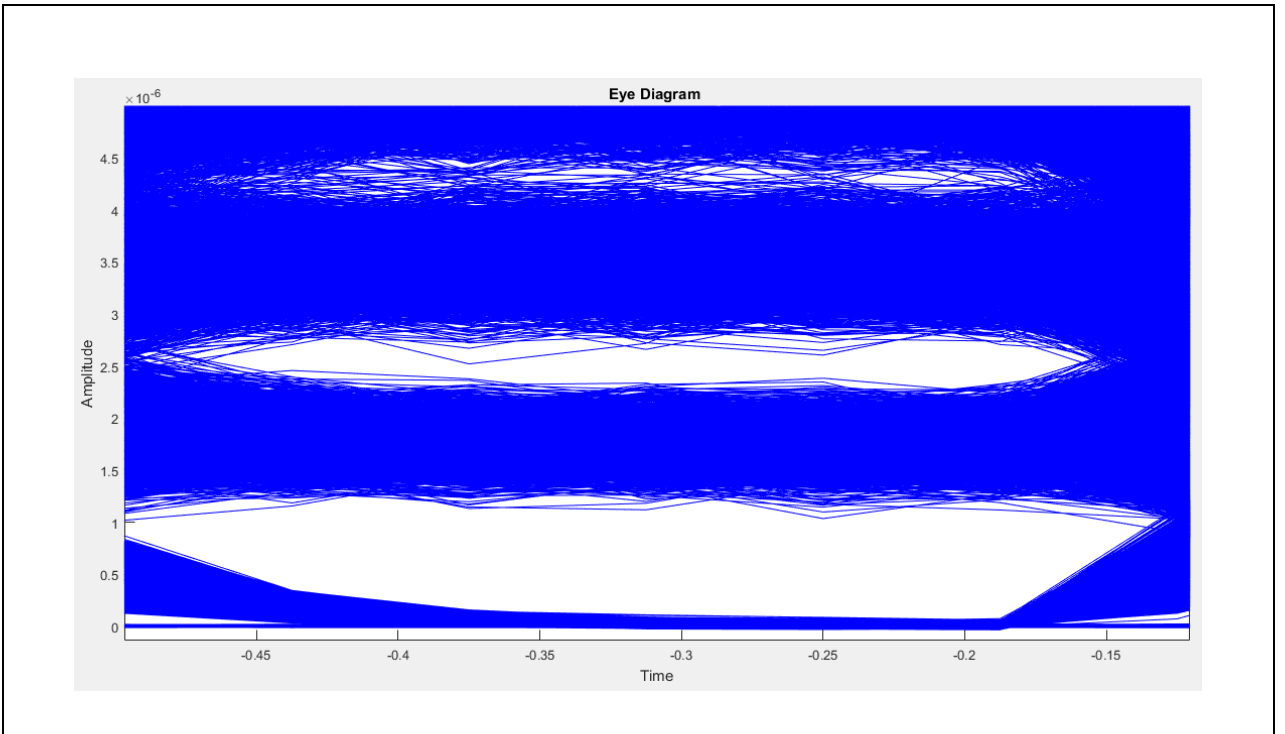


Figura 58. Diagrama de Ojo para una velocidad de 400 Gb/s con una potencia recibida de -25.19 dBm

Elaborado por: El autor

En la tabla 4 se detalla los parámetros generales de simulación que permiten que el sistema descrito anteriormente se comporte como un sistema de transmisión de datos a 100 Gb/s, de 200 Gb/s o de 400 Gb/s, todos ellos con un enlace óptico de 20 km. El tiempo de simulación (time span) fue configurado acorde al baudrate/bitrate usado, de forma que dicho tiempo cubra la transmisión de los más de 200 mil bits que fueron transmitidos. El ancho de banda (BW) del fotodiodo tuvo que ser configurado con un valor no inferior al ancho de banda de la señal. La velocidad de transmisión de bits (el “bitrate”) en una señal modulada con PAM-4 es el doble de la velocidad de baudios empleada (el “baudrate”), dado que cada baudio transporta dos bits de información.

Tabla 4. Parámetros generales de la simulación a 100, 200 y 400 Gb/s

<b>PARÁMETROS GENERALES DE SIMULACIÓN</b>		
<b>VELOCIDAD</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
<b>100 Gb/s</b>	Número de bits	212992
	Time span	1772 ns
	BW del Fotodiodo	50 GHz
	Baudrate	50 GBd/s
	Bitrate	100 Gb/s
<b>200 Gb/s</b>	Número de bits	212992
	Time span	886 ns
	BW del Fotodiodo	75 GHz
	Baudrate	100 GBd/s
	Bitrate	200 Gb/s
<b>400 Gb/s</b>	Número de bits	212992
	Time span	443 ns
	BW del Fotodiodo	150 GHz
	Baudrate	200 GBd/s
	Bitrate	400 Gb/s

Elaborado por: El autor

Los principales resultados obtenidos a través de este trabajo de investigación se muestran en la Figura 59, misma que presenta las curvas de la tasa de bits errados, versus la potencia óptica recibida para los sistemas de transmisión por fibra óptica operan a 100, 200 y 400 Gb/s, para una distancia de enlace óptico de 20 km. Se puede observar que para un BER objetivo de  $10^{-3}$  caso no existe gran diferencia en el desempeño de los tres sistemas, pues se requiere apenas 0.5 dB adicionales de potencia recibida en el sistema de 400 Gb/s (-26 dBm) con respecto al sistema operante a 100 Gb/s (el cual exige -26.5 dBm). Para mayores valores de BER, se observa un ligero incremento en la penalidad, pero la tendencia demuestra que para valores de BER iguales o mejores que  $10^{-3}$  se espera una penalidad de alrededor (o incluso menor a) 2dB para transmitir a 400 Gb/s en relación a la potencia de recepción exigida por un sistema a 100 Gb/s.

Se evidencia con estos resultados la factibilidad de implementar sistemas a 400 Gb/s de forma efectiva y eficiente, sin necesidad de emplear técnicas de procesamiento digital de señales ni esquemas de modulación avanzados, sino empleando dispositivos poco complejos, como un modulador de intensidad y un fotoreceptor PIN, que permita usar la técnica de modulación de intensidad y detección directa, de bajo costo en comparación al valor que tienen los sistemas de transmisión coherente.

Para distancias mayores a 20 km los resultados obtenidos de BER fueron siempre menores a  $10^{-3}$  lo que significa que no se lograría una transmisión efectiva de bits con este sistema a esas distancias. Como se detalla en el estudio del estado del arte presentado en capítulos precedentes, para distancias mayores a 20 km se requiere el uso de técnicas más robustas de modulación y el uso de procesamiento digital de señales en recepción para recuperar la señal.

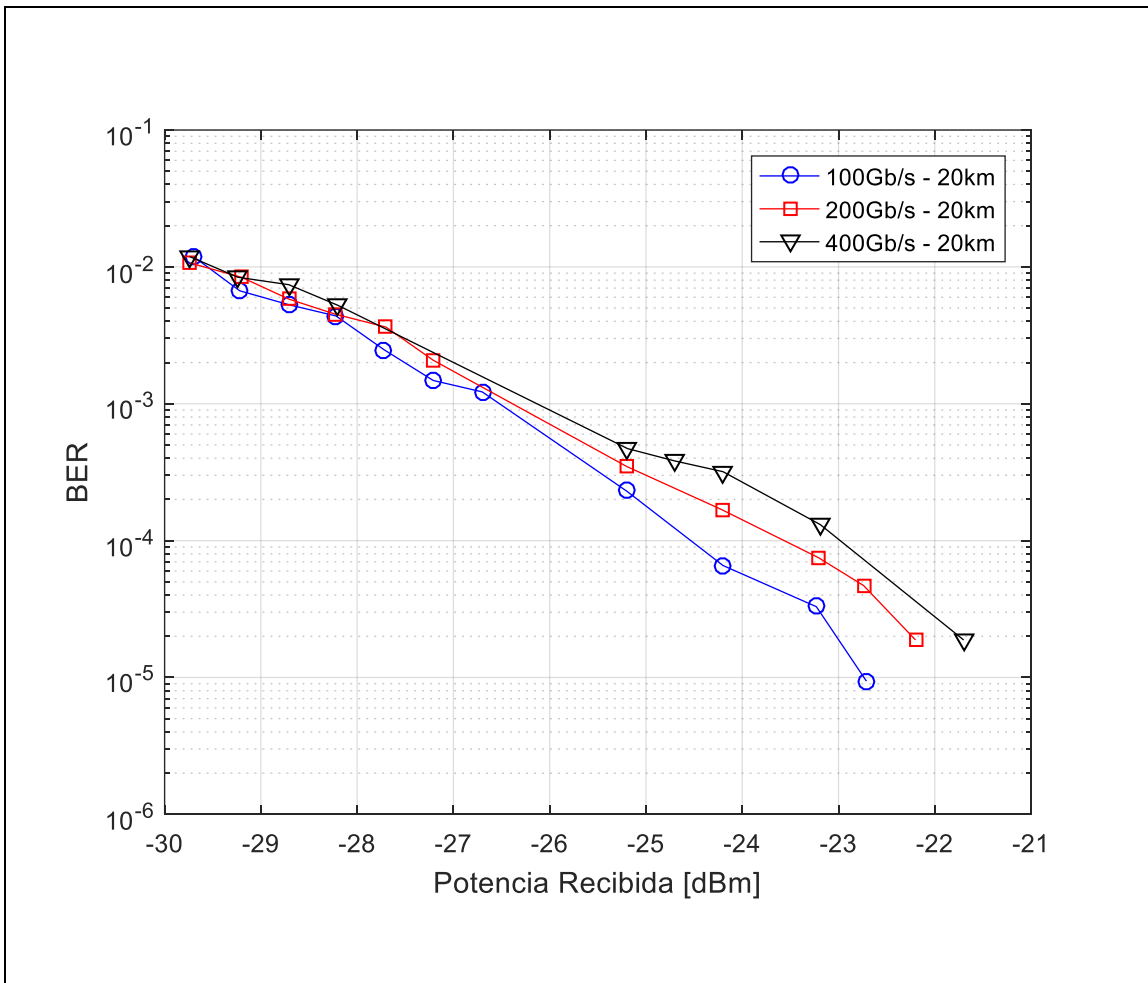


Figura 59. BER vs potencia recibida para los sistemas a 100, 200 y 400 Gb/s para un enlace óptico de 20 km

Elaborado por: El autor

## CONCLUSIONES

- Se ha demostrado la factibilidad de emplear sistemas de transmisión de datos operantes a 400 Gb/s empleando un esquema de modulación PAM-4 poco complejo, que efectivice la interconexión a híper escala de centro de datos que demanden altas tasas de bits.
- Se evidenció que el empleo de un modulador de intensidad y un fotodiodo PIN del ancho de banda al menos igual o cercano al ancho de banda de la señal transmitida, evita la necesidad de uso de técnicas complejas de procesamiento digital de señales para recuperar la señal recibida.
- Se demostró empleando software de simulación, que la penalidad en el presupuesto de potencias exigido por un sistema a 400 Gb/s con señales moduladas con PAM-4, es de apenas 0.5 dB para un BER objetivo de  $10^{-3}$  y de alrededor de 2 dB para BER cercanos a  $10^{-6}$ .
- La limitante del sistema simulado es que la alta tasa de bits empleada, el uso de la técnica de modulación de intensidad de cuatro niveles, que es más propensa a la dispersión, el ruido, y la ausencia de técnicas de procesamiento digital de señales, hace que la distancia de transmisión sea prácticamente inviable para distancias mayores a 20 km.

## RECOMENDACIONES

- Se debe considerar que los valores deben estar correctamente definidos para los cuatro niveles (1,0), (1,1), (0,1) y (0,0), estos valores se los toma ocupando una herramienta propia de Matlab, para tener el valor exacto de cada umbral de los ojos de la señal PAM-4, esto sirve para realizar los cálculos del BER y obtener un óptimo resultado.
- Cuando se realiza la comunicación back to – back, ésta debe estar en las configuraciones propias de los elementos y propias de Optsim tanto para la transmisión “TX” como recepción “RX”, donde todos los valores de los componentes se utilizarán los mismos parámetros de simulación para el programa.
- Cuando se presentan errores al momento de cargar el código en Matlab, se sugiere observar la ventana “Command Window” donde se mostrará el error identificado y en qué línea de código se presenta problemas en la programación.

## REFERENCIAS

- Accton. (2020). *Elnuevo mundo de 400 Gbps Ethernet*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.accton.com/Technology-Brief/the-new-world-of-400-gbps-ethernet/>
- Alarcon, A. (2018). Flex Ethernet: breaking the chains oh physical bandwidth. Recuperado el Marzo de 2020
- Andrade, M., & Cortez, /. A. (2012). UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL. *Aplicación de software MATLAB/SIMULINK en la asignatura de fundamentos de comunicación de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones*. Guayaquil, Ecuador. Recuperado el Marzo de 2020, de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/230>
- Anónimo. (2010). *YOUTUBE*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.youtube.com/watch?v=goXg7lxIprw>
- Anónimo. (2020). *OFC*. Recuperado el Mayo de 2020, de [https://www.ofcconference.org/en-us/home/about/ofc-blog/2018/march-2018/optical-data-center-interconnect-more-capacity,/](https://www.ofcconference.org/en-us/home/about/ofc-blog/2018/march-2018/optical-data-center-interconnect-more-capacity/)
- Arévalo G. (2019). *Curso de Sistemas de Comunicaciones Ópticas - Material de estudio del Tema 6. Maestría de Investigación*. Quito.
- Arevalo, G. (2019). *Simulacion y análisis de una señal óptica PAM4 con FlexDCA*. Quito.
- Arevalo, G. (2019). *Simulacion y análisis de una señal óptica PAM4 con FlexDCA* . Quito.
- Arévalo, G. (2021). *Curso de Sistemas de Comunicaciones Ópticas*. Quito.
- Arista. (2020). *Arista.com*. Recuperado el Marzo de 2020, de [https://www.arista.com/assets/data/pdf/Datasheets/Arista-400G\\_Optics\\_FAQ.pdf](https://www.arista.com/assets/data/pdf/Datasheets/Arista-400G_Optics_FAQ.pdf)

- Auben. (2020). *auben.net*. Obtenido de <http://www.auben.net/index.php/tecnologias/transporte/sdh>
- Chang, F., & Bhoja, & S. (2017). *Ieeexplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8346164/authors#authors>
- Ciena. (2020). *ciena.com*. Recuperado el Marzo de 2020, de [https://www.ciena.com.mx/insights/what-is/What-Is-Coherent-Optics\\_es\\_LA.html](https://www.ciena.com.mx/insights/what-is/What-Is-Coherent-Optics_es_LA.html)
- Cisco, I. S. (2016). Índice global de la nube de Cisco: Pronóstico y metodología, 2015–2020". *Libro blanco de Cisco*.
- Dergurahian, J. (2020). *TechTarget*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://searchdatacenter.techtarget.com/es/definicion/Interconexion-de-centros-de-datos-DCI>
- Doiron, T. (2018). *The Optical Networking and Communication Conference & Exhibition*. Obtenido de <https://www.ofcconference.org/en-us/home/about/ofc-blog/2018/march-2018/optical-data-center-interconnect-more-capacity/>
- EDN. ((s.f.)). *PAM2-NRZ and PAM4 baseband signaling and eye diagrams show two and four amplitudes, respectively*. Obtenido de <https://www.edn.com/tdecq-measurements-replace-mask-testing-in-pam4-optical-signals/>
- Eiselt, & otros, y. (2018). *ieeexplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8730011>
- Eiselt, N., Wei, J., Griesser, H., Dochhan, A., Elbers, M. E.-P., & al, e. (2016). *Ieeexplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7537677/authors#authors>

- Electrical4U. (2020). *Electrical 4 U*. Recuperado el Julio de 2020, de  
<https://www.electrical4u.com/p-i-n-photodiode-avalanche-photo-diode/>
- Furukawa. (2020). Data Center ITMAX. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<https://www.furukawatam.com/es/conexion-furukawa-detalles/guia-de-aplicacao-data-center-itmax>
- Garzón, D. P. (2015). MAESTRÍA EN REDES DE COMUNICACIONES. *Análisis y simulación de capacidad de escalabilidad de una red nacional DWDM para que opere a 128 lambdas*. Quito, Pichincha, Ecuador. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/9324>
- Ghillino, E., Virgillito, E., Mena, P., Scarmozzino, R., Stoffer, R., Richards, D., . . . al, e. (2018). *Ieeexplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8473946/authors#authors>
- Gonzalez, Y. (2016). *Slidershare*. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<https://es.slideshare.net/YanilethGonzalez/fast-ethernet-68031559>
- Horner, R. (2020). *Synopsys*. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<https://www.synopsys.com/designware-ip/technical-bulletin/data-centers-driving-ethernet-interconnects-dwtb-q418.html>
- Imbachi, A. V. (2019). Universidad del CAUCA. *Diseño de un módulo de dispersión cromática en un entorno de co-simulación MATLAB/OPTSIM para una red DWDM a 10 Gbps*. Popayán. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<http://repositorio.unicauca.edu.co:8080/handle/123456789/1642>
- Ingenieros.es. (2014). En desarrollo la nueva Ethernet a 400 Gb/s. Recuperado el 2021, de  
<https://www.ingenieros.es/noticias/ver/en-desarrollo-la-nueva-ethernet-a-400-gbs/4515>

- Instituto Tecnológico de Aguas Calientes. (2020). *Telecomunicaciones TICS*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://telecomunicaciones2.webnode.mx/unidad-6/a6-3-fibras-opticas-/>
- Kent. (2020). *Ciena*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://www.ciena.com/insights/articles/single-wave-400G-across-4000km-yes-with-cienas-new-waveserver-5.html>
- Kent, J. (2019). *Data Centers Service*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.datacenterdynamics.com/es/opinion/5-innovaciones-de-interconexi%C3%B3n-en-los-data-centers-latinoamericanos/>
- Kesh, E. (2019). *Interface master technology*. Recuperado el 05 de 2020, de <https://interfacemasters.com/company/blog/the-migration-to-400-gigabit-ethernet-400gbe/>
- Khanna, G. (2016). *Ieeexplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7756309/authors#authors>
- Kim Roberts, Q. Z. (2017). Capacidad, flexibilidad y optimización de red, más allá de 100 GB/s. *Journal of Optical Communications and Networking*.
- Lanner. (2019). *lanner-america.com*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.lanner-america.com/es/blog-es/terabit-ethernet-la-nueva-tendencia-de-los-centros-de-datos/>
- Le, S. T., Schuh, K., romano, D., Buchali, F., & Schmalen, L. (2019). Más allá de la detección directa de 400 Gb / s Más de 80 km para aplicaciones de interconexión de centros de datos. *Journal Of Lightwave technology*.
- Le, Son T. (2019). Transmisión WDM de detección directa de polarización única de 5x510G BPS sobre 80 KM de SSMF. *Journal Of Lightwave Technology*.

- Maniloff, & otros, y. (2019). 400G y mas alla: Evolucion coherente a enlaces entre centro de datos de alta capacidad. *IEEE Xplore*, 2. Obtenido de <https://ieeexplore.ieee.org/document/8696815/authors#authors>
- Medium. (2018). *Medium*. Obtenido de <https://medium.com/@xxxamin1314/cu%C3%A1l-es-la-mejor-opci%C3%B3n-entre-la-fibra-multimodo-om3-y-la-om4-72b350f0fc71>
- Moreta, G. S. (2016). *Escuela Politecnica Nacional*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15323>
- Navas, M. Á. (2018). *Profesional review*. Recuperado el Marzo de 2020, de <https://www.profesionalreview.com/2018/08/27/conexion-gigabit/>
- Ogiso et al, Y. (2018). Modulador InP IQ de ancho de banda ultra alto ensamblado conjuntamente con Driver IC para Beyond 100-GBd CDM".
- Ospina, D. E. (2013). Recuperado el Marzo de 2020, de <https://es.slideshare.net/danielanko/redes-de-alta-velocidad-ensayo>
- PBworks. (s.f.). *PBworks.com*. Obtenido de <http://posgrado.pbworks.com/f/Redes+de+alta+Veclocidad.pdf>
- Shehabi A., S. S. (2016). "Informe de uso de energía del centro de datos de los Estados Unidos". *Área de Tecnologías Energéticas Lawrence Berkeley Nat.*
- Son Thai Le, K. S. (2019). Más allá de la detección directa de 400 GB/s más de 80 Km para aplicaciones de interconexión de centro de datos. *Journal of Lightwave Technology*.
- Syscom. (2020). *SYSCOM*. Obtenido de <http://soporte.syscom.mx/es/articles/3760050-fibra-monomodo-vs-fibra-multimodo>
- Tecnologías de redes. (2015). *Planet Netstechnology*. Obtenido de <http://www.angelfire.com/planet/netstechnology/fddi.htm>

- Tuo, S., Tzung-I, S., Ning, Z., Ching-yin, H., Dong, P., & al, e. (2018). *IEEE Xplore*.  
Recuperado el 19 de Junio de 2020, de  
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8385797&tag=1>
- Xenos. (2018). *Ciena*. Obtenido de <https://www.ciena.com/insights/articles/Why-the-Secret-Behind-Strong-Early-Adoption-of-400G-Technology-is--200G.html>
- Xenos, H. (2018). Obtenido de <https://www.ciena.com/insights/articles/Why-the-Secret-Behind-Strong-Early-Adoption-of-400G-Technology-is--200G.html>
- Xenos, H. (2018). *CIENA*. Recuperado el Marzo de 2020, de  
<https://www.ciena.com/insights/articles/Why-the-Secret-Behind-Strong-Early-Adoption-of-400G-Technology-is--200G.html>
- Yann, L., Erwan, P., Serge, G., Yang, C., Wushuang, Y., Yang, H., . . . al, e. (2018).  
*IEEE Xplore*. Recuperado el Mayo de 2020, de  
<https://bibliotecas.ups.edu.ec:2095/document/8481517>
- Yupa, H. T. (2016). ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN  
TELECOMUNICACIONES Y REDES. *DISEÑO DE UNA RED DE ACCESOS  
GPON EN LA ESPOCH*. Riobamba, Chimborazo, Ecuador. Recuperado el Marzo de  
2020, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6429>