

# Escuela Politécnica Nacional

Jonathan Alvarez

Jossue Camacho

Melanny Dávila

## Redes de Comunicaciones Ópticas: Taller #1

### DISEÑO DE UN SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS

## 1 Objetivos:

- Diseñar un sistema de comunicaciones ópticas punto a punto mediante el uso del software OptiSystem.
- Analizar el presupuesto de potencia del sistema.
- Variar los parámetros del sistema afín de obtener el máximo (óptimo) rendimiento del sistema.
- Analizar los resultados obtenidos.

## 2 Desarrollo de la práctica

### 2.1 Diseñe y simule un sistema óptico punto a punto con las siguientes características:

- Capacidad del sistema: 1 Gbps.
- $BER = 10^{-9}$
- $OSNR = 12\text{ dB}$
- Longitud (alcance): 200 Km

A continuación, en la figura 1, se presenta la topología del sistema construido.

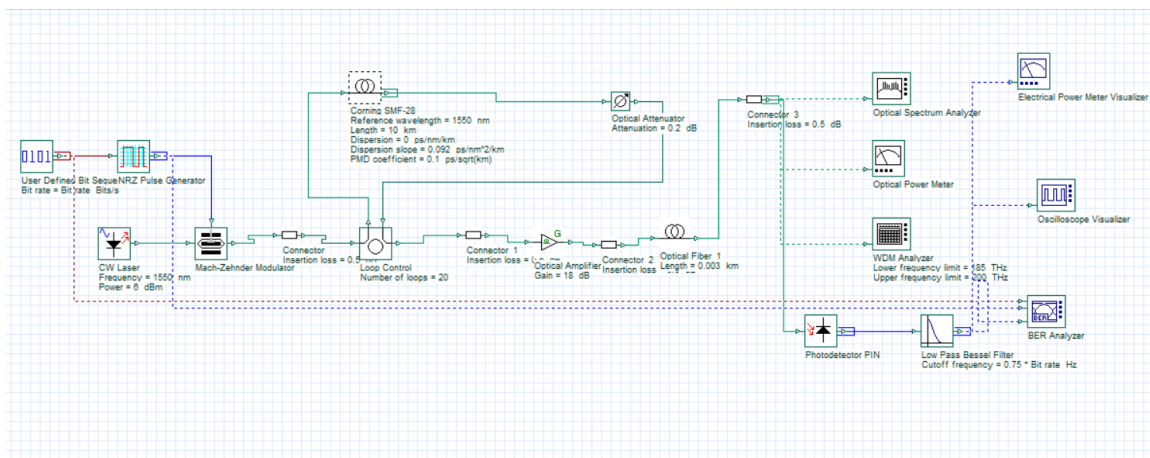


Figura 1: Topología solicitada

## 2.2 Seleccione los componentes (e.g., fibra óptica, fuente del transmisor, detector del receptor, empalmes, etc.) y justifique su utilización. En la Fig. 2. Se muestra un ejemplo de un sistema de comunicaciones punto a punto utilizando el software de simulación

### 2.2.1 Justificación del uso de los componentes

- **Generador de secuencias de bits aleatorias:** Se usa este bloque debido a que se requiere generar información para ser enviada.
- **Generador de pulsos NRZ:** Se usa este bloque ya que se necesitan modular los bits antes de ser enviados como pulsos ópticos.
- **CW Laser:** Se usa un láser que funciona con una longitud de onda 1550 nm y usa una potencia de 6 dBm.
- **Modulador Mach-Zehner:** Se usa este bloque para poder transformar las señales eléctricas a señales ópticas.
- **Conector:** Se usa este bloque para simular a un conector de fibra óptica que estaría conectado a toda la red como tal.
- **Optical Fiber:** Este bloque es usado para simular un tramo de fibra óptica, para este caso se definen la longitud de onda, la longitud de la fibra y la atenuación que tendría. Asimismo, es usado para simular un patchcord que llega a recepción.
- **Fotodetector PIN:** Este bloque simula a un fotodetector PIN, encargado de convertir a las señales ópticas en señales eléctricas y es necesario para poder regenerar la señal recibida.
- **Filtro pasabajas de Bessel:** Se usa este bloque con el fin de filtrar la señal eléctrica obtenida del fotodetector. En este caso se usa una función de Bessel para poder filtrar la señal.
- **Optical Spectrum Analyzer:** Este bloque es usado para poder analizar el espectro óptico que llega a recepción.
- **Optical Power meter:** Este bloque tiene como propósito medir el nivel de potencia de la señal recibida.
- **WDM Analyzer:** Se usa este bloque para poder visualizar la frecuencia, potencia de la señal, figura de ruido del sistema y la OSNR.
- **BER Analyzer:** Bloque usado para poder visualizar la tasa de error de bit y el diagrama del ojo de la señal en recepción.
- **Electrical power meter visualizer:** Este bloque es usado para poder medir la potencia eléctrica de la señal obtenida luego del filtro.
- **Oscilloscope visualizer:** Se usa este bloque con el fin de poder visualizar ya los bits que se logran recibir.
- **Loop Control:** Este bloque se usa para repetir un tramo de fibra por un número dado de vueltas.
- Realice el cálculo del presupuesto del enlace.

- Para calcular el presupuesto de potencia se usa la siguiente fórmula:

$$P_{Tx} - \alpha_{totales} + G = Sensibilidad_{Rx} + margendeseguridad$$

\* Potencia de transmisión = 6dB

\* Ganancia = 8dB

Pérdidas

\* Longitud de la fibra 200 [km] con empalme cada 10 [km] dará un total de 19 empalmes con pérdidas de 0.2 [dB]. Sus pérdidas totales son de 43.8 [dB].

- \* El número de conectores es 4 con pérdidas de 0.5 [dB] cada uno, para dar un total de 2 [dB] en pérdidas.
- \* Pérdidas por patch core de 0.0006 [dB].
- Se calculan las pérdidas totales:

$$\alpha_{\text{totales}} = 2[\text{dB}] + 43.8[\text{dB}] + 0.006[\text{km}] \alpha_{\text{totales}} = 45.8006[\text{dB}]$$

El margen de seguridad será un rango de 10 [dB].

- Reemplazando se obtiene:

$$6[\text{dBm}] - 45.8006[\text{dB}] + G = \text{Sensibilidad}_{R_x} + 10[\text{dB}]$$

$$G = \text{Sensibilidad}_{R_x} + 10[\text{dB}] - 6[\text{dBm}] + 45.8006[\text{dB}]$$

Para nuestro caso utilizamos un receptor APD SAR500 que presenta mejores ventajas con respecto al otro fotodetector.

- Realice el análisis del diagrama del ojo, BER y la OSNR para determinar la calidad del enlace.

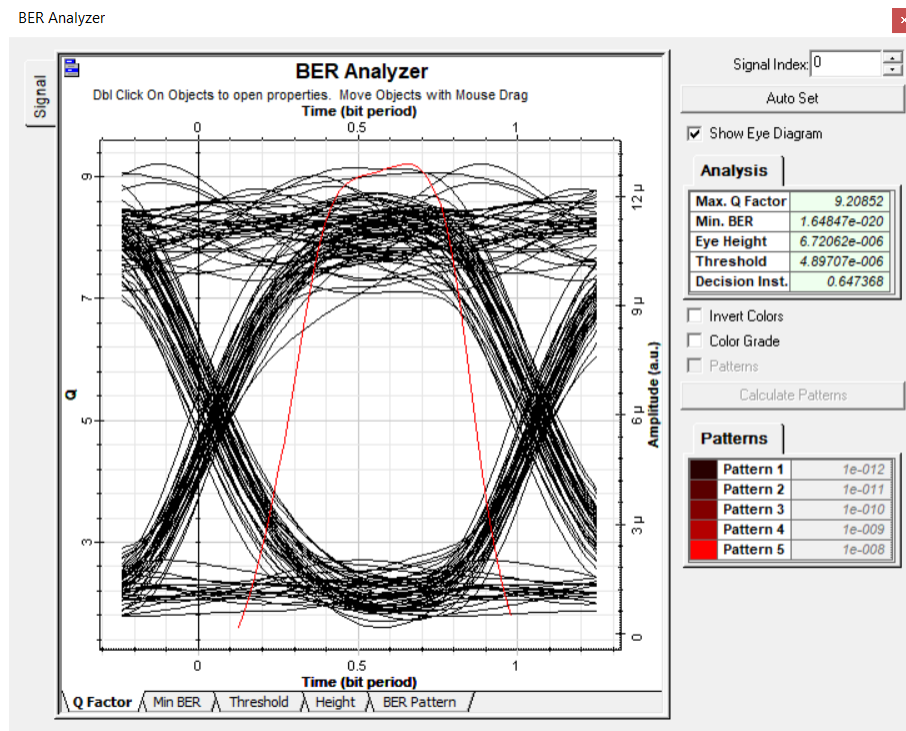


Figura 2: Diagrama del ojo

Como resultado del presupuesto de potencia se puede visualizar que se obtiene un diagrama del ojo aceptable y que muestra que los bits recibidos son bien interpretados y reconstruidos casi en su totalidad. Asimismo, se puede visualizar que el BER mínimo es de  $1.64 \times 10^{-20}$ , que es un valor bastante pequeño.

- Varíe los parámetros (justifique su variación) para obtener un máximo (óptimo) desempeño del sistema.

A continuación, se presenta el diagrama del ojo del esquemático implementado con el uso de un cable de fibra sin especificaciones:

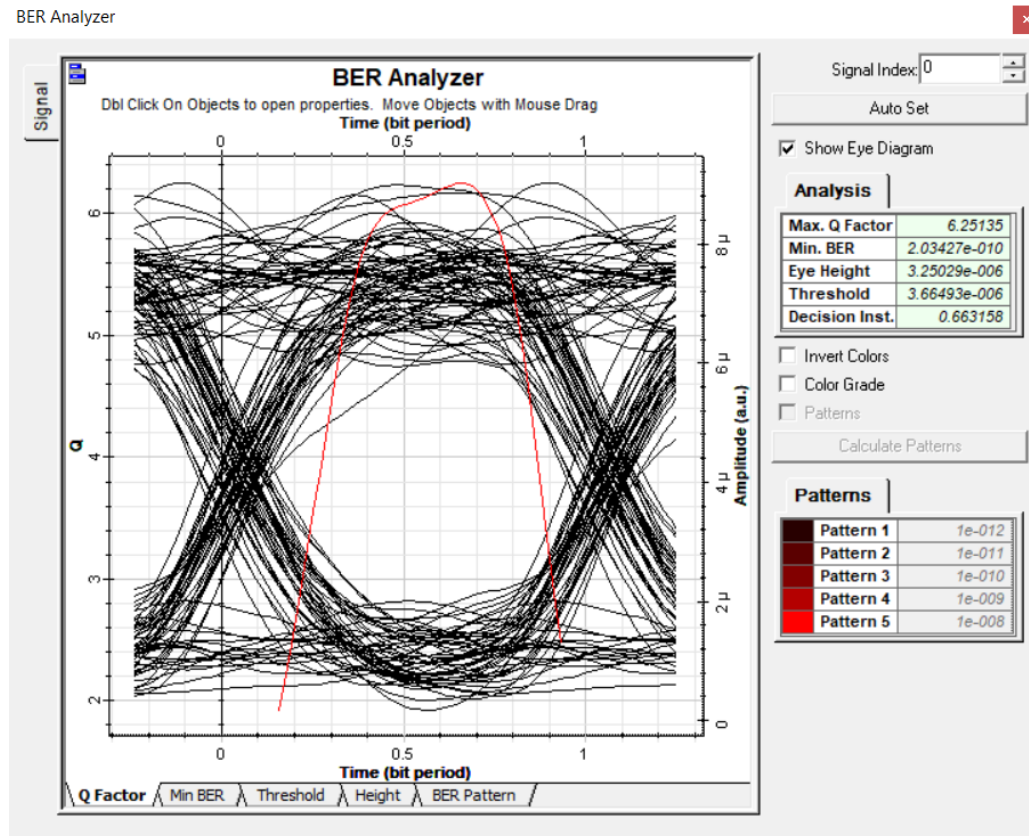


Figura 3: Diagrama del ojo

Con el fin de mejorar el comportamiento del sistema, se implementó la fibra Corning SMF-28, cuyas características [2] se detallan a continuación:

- Dispersión:  $0.088 \left[ \frac{ps}{nm^2} \right]$
- Atenuación:  $\leq 0.18 \text{ [dB/km]}$
- Ventana de trabajo: 1525-1575 [nm]
- Coeficiente de PMD:  $0.1 \left[ \frac{ps}{\sqrt{km}} \right]$
- Área Efectiva:  $55.418 \left[ \mu m^2 \right]$
- Coeficiente de dispersión:  $\leq 18 \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right]$

El resultado obtenido con el cable de fibra óptica se muestra en la figura 4.

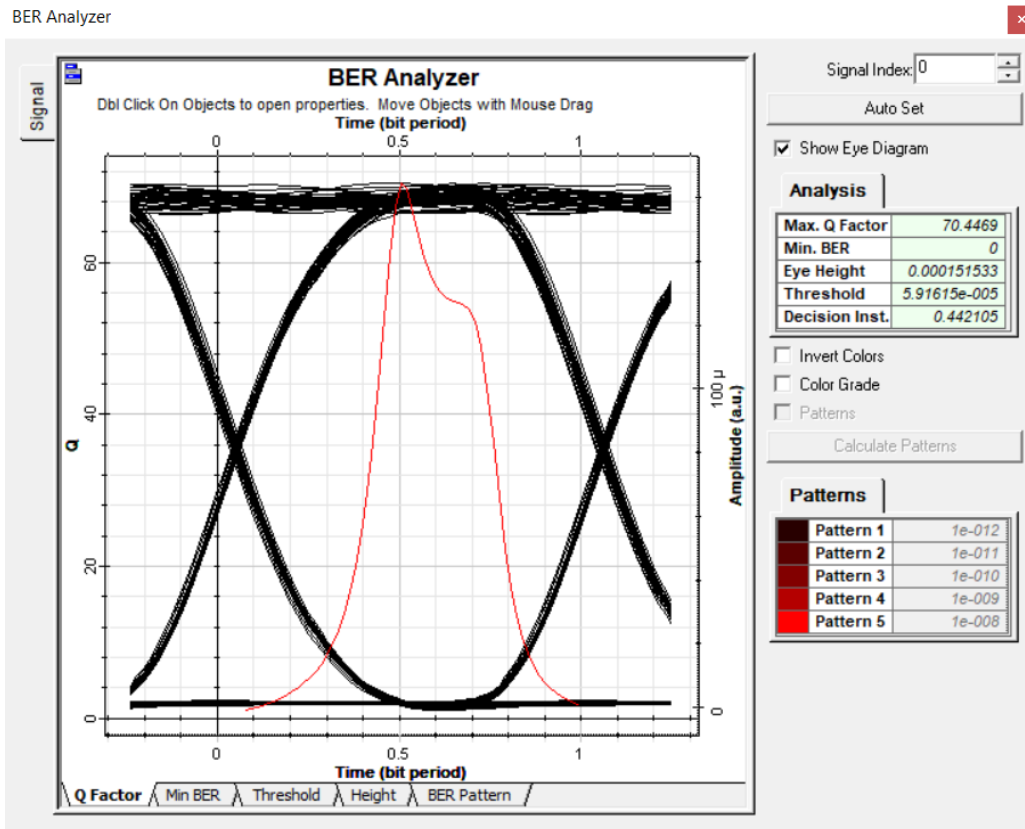


Figura 4: Diagrama del ojo con el uso de la fibra SMF-28

- Varíe las fuentes y receptores y analice los resultados.  
Se realizaron dos variaciones principales:
  - Fuente LED: Para la implementación de este sistema de comunicación se utilizó un generador de bits definido por el usuario, un generador de pulsos NRZ, una fuente LED, un cable de fibra óptica de 200 km de longitud y en los diferentes casos de estudio se hizo uso de un fotodetector PIN y APD para cada caso.
    - \* Fotodetector PIN: Como se muestra en la figura 5, el diagrama del ojo obtenido en recepción es irreconocible dado que la fuente LED no es suficiente para cubrir la distancia que se pide y la velocidad es demasiado alta para el uso de esta fuente.

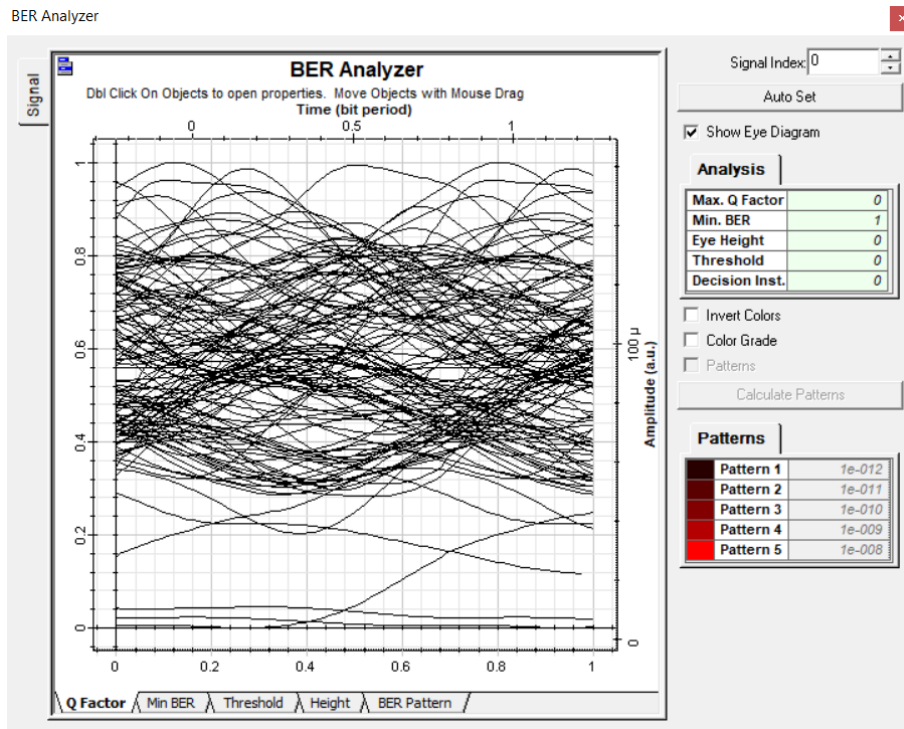


Figura 5: Diagrama del ojo con el uso de fuente LED y fotodetector PIN

- \* Fotodetector APD: Como se muestra en la figura 6, el diagrama del ojo obtenido en recepción, al igual que el anterior, es irreconocible dadas las condiciones anteriores y que el APD, a pesar de su mejor comportamiento, no alcanza a detectar la pobre señal que le llega.

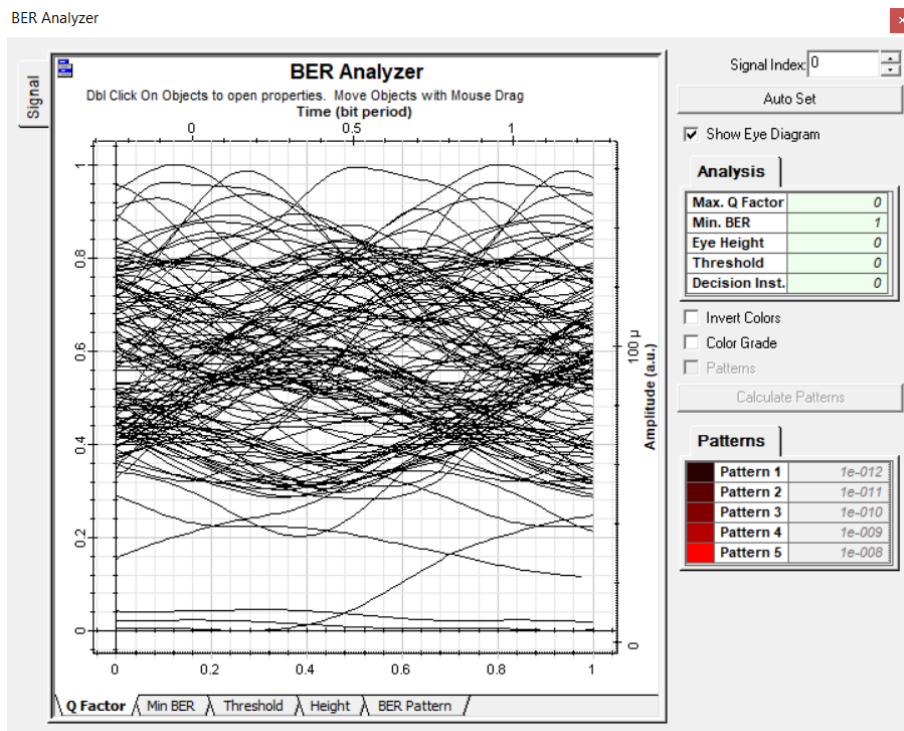


Figura 6: Diagrama del ojo con el uso de fuente LED y fotodetector APD

- Fuente LÁSER: Para la implementación de este sistema de comunicación se utilizó un generador

de bits definido por el usuario, un generador de pulsos NRZ, una fuente LÁSER, un cable de fibra óptica de 200 km de longitud y en los diferentes casos de estudio se hizo uso de un fotodetector PIN y APD para cada caso.

- \* Fotodetector PIN: Los diodos PIN se utilizan particularmente en aplicaciones de RF donde hay bajos niveles de capacitancia. Sus propiedades de conmutación y resistencia variable los hacen muy adecuados en aplicaciones de conmutación y atenuadores variables. Sin embargo, en esta caso sus características no son las adecuadas para las condiciones de trabajo dando como resultado un comportamiento inadecuado.

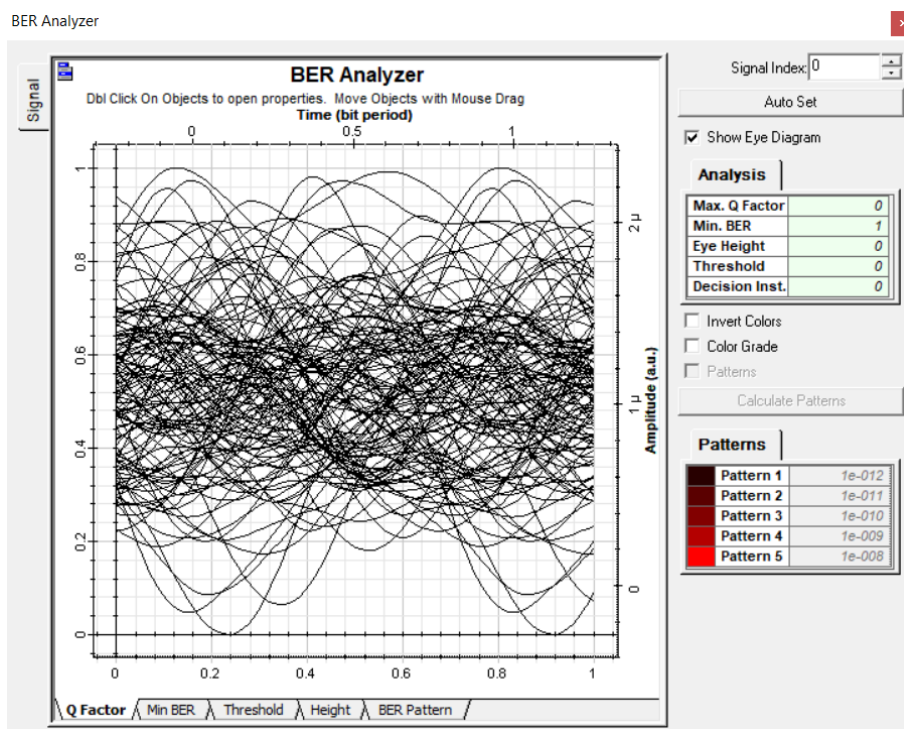


Figura 7: Diagrama del ojo con el uso de fuente LASER y fotodetector PIN

- \* Fotodetector APD: La diferencia con el diodo PIN es que la absorción de un fotón de luz entrante que puede provocar una ruptura de avalancha, esta característica le da al APD una alta sensibilidad en comparación al fotodetector PIN. Permitiendo así que su comportamiento sea mejor, tal como se presenta en el siguiente diagrama del ojo.



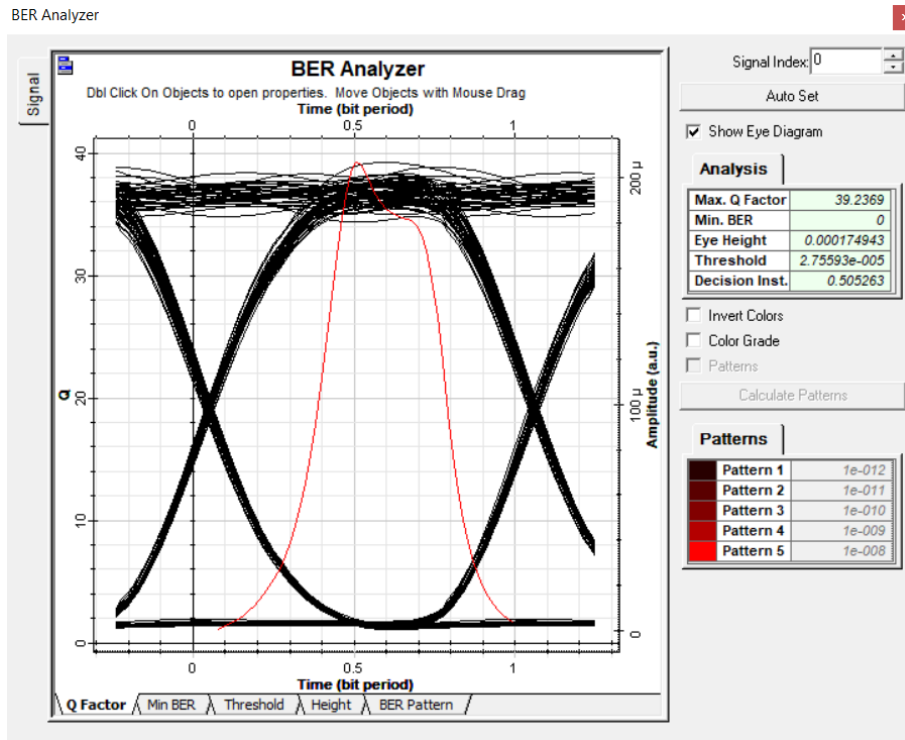


Figura 8: Diagrama del ojo con el uso de fuente LASER y fotodetector APD

- Incluya en el sistema un multiplexor ideal 2 a 1 en el lado de transmisión. Considerando una fuente que simule una transmisión de video con una modulación externa 4-QAM y 16-QAM. En el lado de recepción incluya la etapa demultiplexora y los componentes necesarios que permitan el correcto funcionamiento del sistema.

En las figuras 9 y 10 se tiene el nuevo sistema implementado para la simulación del sistema de transmisión de vídeo.

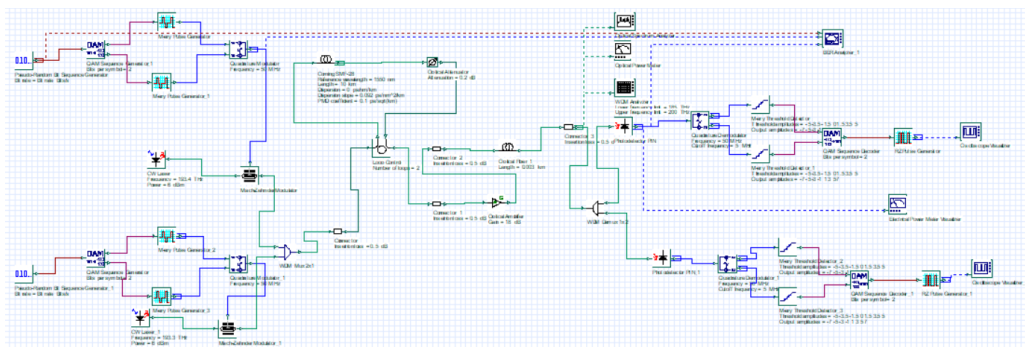


Figura 9: Esquemático usado para simular el sistema pedido.



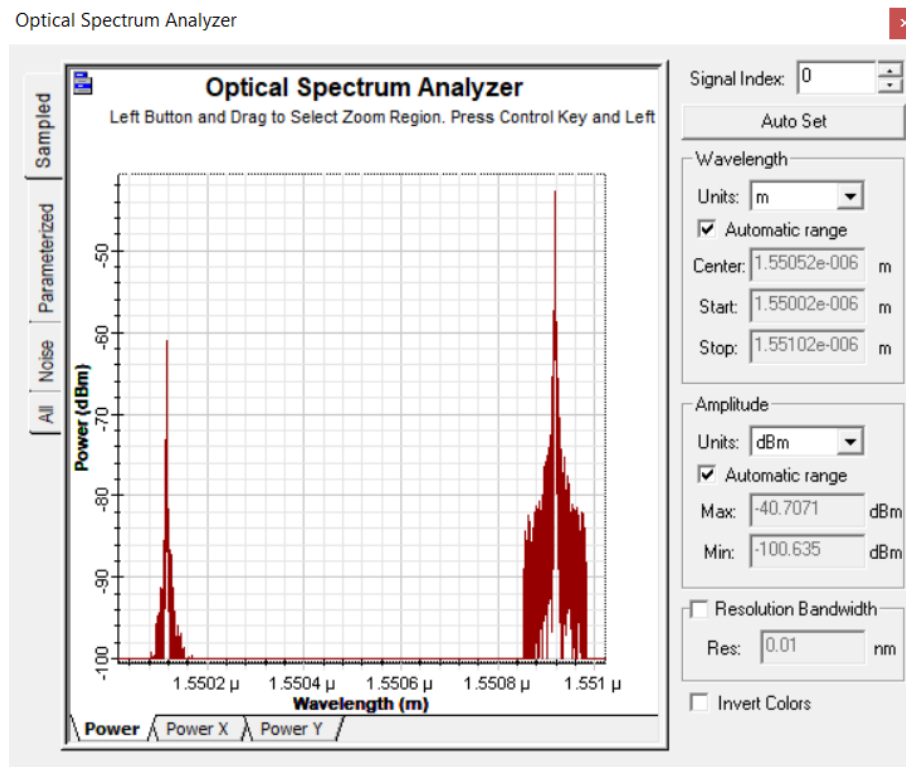


Figura 10: Espectro óptico en recepción

### 3 CUESTIONARIO

#### 3.1 Indique los tiempos de respuesta de transmisores, receptores (especificaciones técnicas) y fibra óptica (dispersión total).

En las tablas 1, 3 y 2 se encuentran las especificaciones técnicas de los transmisores, receptores y de la fibra óptica.

Tabla 1: Especificaciones técnicas de transmisores

Características de las fuentes ópticas	Diodos LASER	Diodos LED
Potencia de salida [mW]	1-10	1-10
Potencia acoplada a la fibra [mW]	0.5-5	0.03-0.3
Ancho espectral [nm]	0.1-5	15-60
Tiempo de conmutación [ns]	<1	2-20
Voltaje [V]	1.5-2	1.5-2
Corriente directa [mA]	10-300	50-300
Corriente umbral [mA]	5-250	N/A
Emisión	Estimulada	Espontánea

Tabla 2: Especificaciones técnicas de receptores

Detector	Fotodiodo PIN	Fotodiodo avalancha
Responsividad [A/W]	0.6-0.8	74-100 [6]
NEP [W/Hz]	$10^{-13} - 10^{-14}$	$10^{-14}$
Tiempo de respuesta [ns]	1-5 [7]	0.5-2
Corriente de oscuridad	3-300	1

Tabla 3: Comparación de características de distintas fibras ópticas monomodo

Parámetro	Fibra SMF-28 Corning	Fibra OM-2 Corning	Fibra G652D Ubiquiti
Longitud de onda [nm]	1550	1550	1550
Atenuación [dB/km]	$\leq 0.18$ [2]	0.18	$\leq 0.204$
Coefficiente PMD [ $ps/\sqrt{km}$ ]	0.04	0.04 [8]	0.092
Diámetro del núcleo [ $\mu m$ ]	8.2	8.2	6.4 [9]
Temperatura de trabajo [°C]	-60 a +85 [2]	-60 a +85	-60 a +85

### 3.2 Indique los rangos de operación (potencia) del transmisor.

- **Láser:**

- Anchura espectral entre 1 y 5 nm, es decir la anchura espectral del pico de emisión es pequeña, todo esto con el fin de limitar la dispersión cromática.
- Potencia óptica emitida mayor a los mW.
- Con el fin de alcanzar el efecto laser, el dispositivo debe manejar baja corriente umbral.
- Para que la luz que emite este dispositivo sea correctamente enfocada, su coherencia espacial debe ser lo bastante alta.
- Emisión de luz estimulada, mediante el uso de una cavidad Fabry Perot.
- Longitudes de onda entre: 1300 nm y 1500nm.

- **Láser DFB:** Láser de realimentación distribuida.

- La red de difracción se encuentra ubicada por debajo de la zona activa del dispositivo.
- Anchura espectral menor a 0.1nm.
- Con el fin de garantizar su correcto funcionamiento, se debe controlar la variación de temperatura que afecta al dispositivo.

- **Láser DBR:** Láser de reflexión Bragg distribuida.

- Posee una red de difracción que sustituye a los espejos que pertenecen a la cavidad Fabry Perot tradicional.
- La red de difracción se ubica a uno de los extremos o en ambos extremos de la región activada.
- Su anchura espectral puede ser menor a 0.1nm.
- Requieren mayor corriente umbral y presentan mayor sensibilidad a las variaciones de temperatura, en comparación a los lasers DFB.

### 3.3 Indique los rangos de operación (potencia) del receptor.

Para los rangos se tiene diferente para cada detector, por ejemplo, para el detector APD se tiene una responsividad de 25-100 [A/W] y para el detector PIN 0.5-1 [A/W].

El detector PIN presenta una alta responsividad, pero, un bajo tiempo de respuesta. Es usado para las siguientes aplicaciones: [3]

- Atenuador: Se utiliza como una resistencia de puente.
- Conmutador RF: Se utiliza para poder seleccionar las señales que influyen en el sistema de comunicación.
- Detector: Este diodo puede ser usado como detector porque es capaz de detectar rayos X y gamma.

El detector APD amplifica la corriente a la salida debido a que su funcionamiento se basa en avalancha. Las aplicaciones donde pueden ser estos detectores son: [4]

- Sensor de proximidad
- En imágenes médicas (PET y CT)
- LiDAR que es un flip chip usado para montajes en superficie.
- Usado en aplicaciones automotriz si se cumple la normam AEC-Q100.

En el Anexo 1, se presenta una tabla comparativa entre los principales foto-detectores.

### 3.4 Calcule la OSNR.

Se tiene que:  $P_{tx}$ : 11.34 [dBm]

$N$ : -36.98 [dBm]

Por lo que la OSNR es igual a:

$$OSNR = \frac{P_{tx}}{N} = 48.32[dB] \quad (1)$$

### 3.5 Calcule las pérdidas totales en el sistema.

En base a la topología implementada, se tiene las siguientes características:

- Longitud de la fibra 200 [km], con atenuación de 0.18 [dB/km] y un empalme cada 10[km] dando un total de 19 empalmes con pérdidas de 0.2[dB]
- El número de conectores es 4 con perdidas de 0.5 [dB] cada uno para dar un total de 2[dB] en perdidas.
- Pérdidas por patch core de 0.0006[dB]

Se calculan las pérdidas totales:

$$\alpha_{totales} = 0.5[dB] * 4 + 0.18[dB/km] * 200[km] + 19 * 0.2[dB] + 0.0006[dB]$$

$$\alpha_{totales} = 41.806[dB]$$

### 3.6 Presupuesto de implementación

#### 3.6.1 Transmisor

WSEE CATV 25KM optical transmitter

- Precio: \$.360.00
- Wavelength: 1550nm $\pm$ 15
- Brand name: WSEE

- Bandwidth: 47 1000MHz
- AGC function: AGC/MGC
- Power supply: 110v, 220v, 48v
- Output power: 3dbm 10dbm
- Transmission distance: 25km
- Input level: 75 90dBuV
- Model Number: WS-LT3000
- Connector Type: SC/APC

### **3.6.2 Conectores SC**

- Precio: \$.0.80
- Model Number: Fast Connector
- Place of Origin: Anhui, China, Anhui, China (Mainland)
- Brand Name: XinCchengOEM, xingcheng
- Model Numbe: SC /PC/UPC
- Name: Fiber Optic Fast Connector
- Connector Type: SC
- Insertion loss: <0.3dB
- length: 60mm
- Diameters: 0.9mm, 2.0mm, 3.0mm

### **3.6.3 Amplificador óptico**

DBC WDM PON EDFA / Optical Amplifier

- Precio: \$.2.646.00
- Model Number: OHPA-1550 EYDFA
- Type: EYDFA
- Place of Origin: Zhejiang, China
- Brand Name: TUOLIMA
- Use: FTTH FTTB FTTx, FTTH/FTTB/FTTX
- Warranty Time: 1 YEAR
- Product name: Optical EYDFA
- Model: OHPA-1550 EYDFA
- Size: 483\*280\*1U
- Optical Wavelength: 1540 1563nm
- RF output port: RJ45 port / RS232
- Optical Port: 8/16/32

- Power Supply: 90V 265VAC or -48V DC for the user's choice
- LOGO Service: LOGO Printing Service
- With/without WDM: According to the customer
- No. of Fiber: 1
- Application: FTTH

### 3.6.4 Cable de fibra óptica

Corning SMF-28e+ 9/125/250µm OS2 Single Mode Fiber With NexCor Technology (G.652)

- Precio: \$.0.18 Por metro
- Entrega capacidad optimizada
- flexibilidad de diseño de red
- confianza en el rendimiento a largo plazo
- La fibra de espectro completo más demandada del mundo

### 3.6.5 Receptor óptico

Fullwell factory price FTTH CATV + Satellite TV Optical Receiver/Optical Node mini node

- Precio: \$.13.00
- Model Number: FWR-2600(2RF)
- Type: FTTx Solutions
- Place of Origin: Zhejiang, China
- Brand Name: FULLWELL
- Use: FTTH
- Warranty Time: 3 years
- Name: FTTHSAT-IF WDM Optical Receiver
- CATV Wavelength: 1260 1600nm
- Bandwidth/Flatness: 45-2150MHz
- Output Level: 80dBV
- Input Optical Power Range: -15 +2dBm
- CNR/CSO/CTB: 50dB/60dB/65dB
- MER/BER: 32(64QAM)/1X10-4
- Application: FTTX
- AGC Stability:  $\pm 1$ dB(-8 0dBm)
- Certification: CE RoHS FCC
- No. of Fiber: 1
- Power Input: -15 to 2 dBm

Precio Final del Sistema Óptico: \$.3063.00

### 3.7 Escriba al menos dos conclusiones y dos recomendaciones de esta práctica.

#### Conclusiones

- El uso de diferentes tipos de cables de fibra óptica combinado con dispositivos de amplificación es importante al momento de disminuir fenómenos como atenuación y jitter presentes en el sistema.
- La presencia de elementos de amplificación con filtros permite que se mejore la recepción de los datos. El uso de fibra óptica es importante al momento de disminuir la atenuación presente en el sistema con el fin de disminuir la tasa de bit errado a un valor esperado que sería de  $10^{-9}$  o valores aún más cercanos a cero.
- Entre los principales beneficios acerca del uso de un detector APD se encuentra su gran responsividad lo que se traduce en una alta eficiencia cuántica y la correcta regeneración de señales. Es por esto que es muy recomendado el uso de estos dispositivos en sistemas de comunicación de mayor desempeño.
- Mediante el uso de multiplexación por longitud de onda se puede enviar diferentes señales de datos por un único medio compartido, que en este caso es la fibra óptica. Sin embargo, es importante que se garantice la existencia de bandas de guarda con el propósito de evitar solapamiento entre los pulsos ópticos de información.

#### Recomendaciones

- Es importante garantizar que los parámetros principales del cable de fibra óptica a utilizar sean los correctos para poder simular entornos más realistas.
- Configurar apropiadamente la fibra óptica para que el sistema tenga mejor desempeño consultando los datasheets correspondientes.
- Considerar la distancia que la red desea cubrir para de esta manera seleccionar los dispositivos que se utilizarán. Además, alcanzar un punto de equilibrio entre la calidad que se desea dar y el costo que se puede asumir al adquirir e implementar los equipos.

### Referencias

- [1] J. E. Sharping, M. Fiorentino, A. Coker, P. Kumar, y R. S. Windeler, "Four-wave mixing in microstructure fiber", Optics Letters, vol. 26, n.º 14, pp. 1048-1050, jul. 2001, doi: 10.1364/OL.26.001048.
- [2] "SMF-28 Ultra Optical Fibers | Single Mode Optical Fiber | Corning". <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber/optical-fiber-products/smf-28-ultra.html> (accedido jun. 09, 2021).
- [3] "LED vs Laser diode | Difference between LED and Laser diode". <https://www.rfwireless-world.com/Terminology/LED-vs-Laser.html> (accedido jun. 07, 2021).
- [4] Diferentes tipos de diodos y sus aplicaciones, Electronica Lugo, jun. 02, 2018. <https://electronicalugo.com/diferentes-tipos-de-diodos-y-sus-aplicaciones/> (accedido jun. 07, 2021).
- [5] G. Alsina, Dispositivos APD y SPAD para escenarios con poca luz, diarioelectronicohoy.com, jun. 21, 2019. <https://www.diarioelectronicohoy.com/dispositivos-apd-y-spad-para-escenarios-con-poca-luz/> (accedido jun. 07, 2021).
- [6] "PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication", Fosco Connect. <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/pin-photodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication/> (accedido jun. 08, 2021).
- [7] "Avalanche photodiodes (APDs)". Disponible en: <https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/apd/index.html> (accedido jun. 08, 2021).
- [8] "SMF-28 Ultra Optical Fibers | Single Mode Optical Fiber | Corning". <https://www.corning.com/optical-communications/worldwide/en/home/products/fiber/optical-fiber-products/smf-28-ultra.html> (accedido jun. 09, 2021).

- [9] “G.652D-Low water peak non-dispersion shift single-mode fiber”. [https://www.jdocable.com/product-detail/G-652D-Low-water-peak-non\\_pid-18f057e0c21d4403955f4b337e145490.html?gclid=Cj0KCQjwk4yGBhDQARIsACGfAeub\\_iiXcn3s53E32iCKVLLJeGtY6oes-FNjU1yDEd7ibI38uq0WxLcaAhB6EALw\\_wcB](https://www.jdocable.com/product-detail/G-652D-Low-water-peak-non_pid-18f057e0c21d4403955f4b337e145490.html?gclid=Cj0KCQjwk4yGBhDQARIsACGfAeub_iiXcn3s53E32iCKVLLJeGtY6oes-FNjU1yDEd7ibI38uq0WxLcaAhB6EALw_wcB) (accedido jun. 10, 2021).
- [10] The Most Cost-effective CATV Equipment from China: 1550nm Direct Modulated Optical Transmitter. [https://www.wseelaser.com/direct-modulation-transmitter%20/1550nm-direct-modulated-optical-transmitter.html?gclid=Cj0KCQjwk4yGBhDQARIsACGfAevVWU-ChmaI52vEZ3C58M2ZteVOuoADlf6DtmDu66Tt6\\_NWUsPbt4aAgx9EALw\\_wcB](https://www.wseelaser.com/direct-modulation-transmitter%20/1550nm-direct-modulated-optical-transmitter.html?gclid=Cj0KCQjwk4yGBhDQARIsACGfAevVWU-ChmaI52vEZ3C58M2ZteVOuoADlf6DtmDu66Tt6_NWUsPbt4aAgx9EALw_wcB) (accedido jun. 10, 2021).
- [11] Corning SMF-28e+ 9/125/250µm OS2 Single Mode Fiber with NexCor Technology (G.652)», Fosco Connect. <https://www.fiberoptics4sale.com/products/smf-28e> (accedido jun. 11, 2021).
- [12] Fullwell Factory Price Ftth Catv + Satellite Tv Optical Receiver/optical Node Mini Node - Buy Mini Node,Satellite Receiver,Optical Receiver Catv Product on Alibaba.com. [https://www.alibaba.com/product-detail/Price-Optical-Optical-Receiver-Optical-Node\\_1600100106244.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_title.7b722f39XdJxbNs=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Price-Optical-Optical-Receiver-Optical-Node_1600100106244.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.7b722f39XdJxbNs=p) (accedido jun. 11, 2021).
- [13] 250.0US \$ |WSEE CATV 25KM optical transmitter 1550nm single power supply 3dbm 10dbm LT3000|Fiber Optic Equipments| - AliExpress», aliexpress.com. [https://www.aliexpress.com/item/1005001481600951.html?src=ibdm\\_d03p0558e02r02sk=aff\\_platform=aff\\_trace\\_key=af=cv=cn=dp=](https://www.aliexpress.com/item/1005001481600951.html?src=ibdm_d03p0558e02r02sk=aff_platform=aff_trace_key=af=cv=cn=dp=) (accedido jun. 11, 2021).



## ANEXO 1

Tabla 4: Parámetros principales de los foto-detectores según su materia de fabricación

Parámetro	Unidad	Detector PIN			Detector APD		
		Si	Ge	InGaAs	Si	Ge	InGaSa
Longitud de onda (rango)	nm	400-1100	800-1650	1100-1700	400-1100	800-1650	1100-1700
Pico	nm	900 [4]	1550	1300 ó 1500	830	1300	1300 ó 1550
Eficiencia cuántica	%	75-90	50-55	60-70	77 [5]	55-75	60-70
Corriente de oscuridad	nA	1-10	50-500	60-70	0.1-1	50-500	10-50
Tiempo de subida	ns	0.5-1	0.1-0.5	0.02-0.5	0.1-2	0.5-0.8	0.1-0.5
Voltaje de polarización	V	5	5-10	5 [6]	150-400	20-40 [7]	20-30
Capacitancia	pF	1.2-3	2-5	0.5-2	1.3-2	2-5	0.5 [7]
Responsividad	A/W	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.9	80-130	3-30	5-20
Ganancia	-	1	1	1	150-250	5-40	10-30
Voltaje bias	V	50-100	6-10	5-6	200-250	20-40	20-30
Ancho de banda	GHZ	0.3-0.6	0.5-3	1-10 [6]	0.2-1	0.4-0.7	1-10 [7]