



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA-TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN TRANSMISOR ÓPTICO MODULADO  
DIRECTAMENTE Y UNO MODULADO MEDIANTE AMPLIFICADOR ÓPTICO DE  
SEMICONDUCTOR.

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE :  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
OSVALDO FERNÁNDEZ SEGURA

TUTOR:  
DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN  
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., NOVIEMBRE, 2019



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. GÓMEZ CASTELLANOS JAVIER

Secretario: DR. CEBALLOS HERRERA DANIEL ENRIQUE

Vocal: DR. GUTIÉRREZ CASTREJÓN RAMÓN

1<sup>er</sup>. Suplente: DRA. MOUMTADI FÁTIMA

2<sup>do</sup>. Suplente: DR. KHOTYAINTEV SERGIY

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Instituto de Ingeniería, UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

DR. RAMÓN GUTIÉRREZ CASTREJÓN

---

**FIRMA**

## **Agradecimientos:**

A mi madre, a mi padre y a mi hermana, por todo su amor, porque me han enseñado todo lo que sé y han estado conmigo desde el principio.

A mi familia, por todas las experiencias que hemos compartido y que son tan importantes en mi vida.

A mis amigas y amigos, porque se han convertido en hermanas y hermanos para mí.

A mi tutor, Dr. Ramón Gutiérrez Castrejón por todas sus enseñanzas, su paciencia y por darme la oportunidad de desarrollar este proyecto dentro de su grupo de investigación.

A Pablo, por su amistad y su ayuda a lo largo de esta etapa.

Al Dr. Roberto Gaudino y al grupo de comunicaciones ópticas (OptCom) del Politecnico di Torino, por su guía y apoyo durante mi estancia.

A mis sinodales, por sus aportaciones y consejos para mejorar este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería, al programa de Maestría y Doctorado y a la UNAM por brindarme todos los conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional y por permitirme ser parte de esta gran institución.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Posgrado de la UNAM, por el apoyo económico que recibí a lo largo de la maestría y durante mi estancia en el Politecnico di Torino.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica IN102318: "Aplicación de los amplificadores ópticos de semiconductor en el desarrollo de un transmisor para redes ópticas flexibles".

A todas las personas que han formado parte de mi vida, les agradezco con mucho cariño todos los momentos compartidos, sin ustedes nada sería igual.

# Índice.

|  |           |
|--|-----------|
| Resumen.....   | 1         |
| Abstract.....  | 2         |
| <b>1. Introducción.....</b>                                  | <b>3</b>  |
| 1.1 Transmisores ópticos.....                                | 3         |
| 1.1.1 SOA como modulador óptico.....                         | 4         |
| 1.1.2 Láser modulado directamente (DML).....                 | 6         |
| 1.2 Formatos de Modulación.....                              | 8         |
| 1.2.1 Modulación NRZ.....                                    | 8         |
| 1.2.2 Modulación Duobinaria.....                             | 9         |
| 1.2.3 Modulación por amplitud de pulsos (PAM).....           | 10        |
| 1.3 Redes Ópticas Pasivas (PON).....                         | 11        |
| 1.4 Estado del Arte.....                                     | 12        |
| 1.5 Problemática y justificación.....                        | 19        |
| 1.6 Objetivo del proyecto.....                               | 19        |
| Referencias capítulo 1.....                                  | 21        |
| <b>2. Modelado del sistema de transmisión.....</b>           | <b>24</b> |
| 2.1 Modelo de SOA.....                                       | 24        |
| 2.2 Modelo de DML.....                                       | 28        |
| 2.3 Modelo de Sistema Base-NRZ.....                          | 31        |
| 2.4 Modelo de Sistema Duobinario.....                        | 34        |
| 2.5 Modelo de Sistema PAM-4.....                             | 35        |
| 2.6 Parámetros de desempeño.....                             | 37        |
| Referencias capítulo 2.....                                  | 40        |
| <b>3. Análisis de resultados.....</b>                        | <b>41</b> |
| 3.1 Sistema empleando SOA como modulador óptico.....         | 41        |
| 3.1.1 Non-Return-to-Zero.....                                | 41        |
| 3.1.2 Duobinario.....  | 49        |
| 3.1.3 Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM-4).....         | 53        |
| 3.2 Sistema empleando Láser Modulado Directamente (DML)..... | 54        |
| 3.2.1 Non-Return-to-Zero.....                                | 55        |
| 3.2.2 Duobinario.....  | 55        |
| 3.2.3 Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM-4).....         | 56        |
| 3.3 Comparación de resultados.....                           | 57        |
| Referencias capítulo 3.....                                  | 63        |
| <b>4. Conclusiones.....</b>                                  | <b>64</b> |

## Resumen.

La enorme demanda de servicios de banda ancha por parte de los usuarios de las redes en todo el mundo ha impulsado a la comunidad científica a investigar nuevas técnicas, sistemas y dispositivos que puedan operar a tasas de transmisión cada vez mayores y que al mismo tiempo sean costeables.

En el presente trabajo de investigación se analizan y comparan dos distintos transmisores ópticos: un láser de cavidad vertical y emisión superficial (VCSEL) modulado directamente (DML) y un transmisor basado en un amplificador óptico de semiconductor (SOA) empleado como modulador externo. Ambos transmisores se prueban con tres diferentes formatos de modulación: NRZ (Non-Return-to-Zero), duobinario y PAM-4 (Pulse Amplitude Modulation); con el fin de determinar el transmisor y formato de modulación más convenientes para redes ópticas pasivas de corto alcance (PON).

El análisis se realiza mediante el modelado de los elementos que componen el sistema óptico, tal y como se explica en el capítulo dos. Entre los modelos más importantes destacan los del SOA y el DML. Para simular el comportamiento del primero se usó un modelo matemático que consiste en una ecuación diferencial con la cual se calculan los cambios en la ganancia proporcionada por el dispositivo respecto al tiempo y con base en ello se obtiene la variación del campo óptico como función del tiempo a la salida del dispositivo. En el caso del DML se emplearon dos ecuaciones diferenciales acopladas que modelan las variaciones que hay en la densidad de portadores (electrones) y de fotones en el dispositivo respecto al tiempo, obteniéndose también la variación del campo óptico en función del tiempo. Para resolver los modelos utilizados en ambos casos se utilizó el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden, en el cual se calcula la solución del modelo en un intervalo de tiempo mediante la combinación de cuatro evaluaciones de la función o funciones dentro del mismo intervalo. Todas las simulaciones se realizaron en MATLAB.

Al usar el SOA como modulador externo se eligió una potencia de entrada de 0 [dBm] y una corriente de bombeo de 200 a 400 [mA] debido a que con estos valores se obtuvieron los mejores resultados. En el caso de duobinario, la frecuencia de corte del filtro paso-bajas que obtuvo mejor desempeño fue de 0.2 veces la tasa de transmisión. Se definió un umbral para la relación de bits erróneos (BER) de  $1 \times 10^{-2}$ . Con este formato de modulación y frecuencia de corte se logró una tasa de transmisión de hasta 18 [Gb/s] en un enlace con 20 [Km] de fibra óptica sin sobrepasar el umbral de BER definido, al igual que al emplear modulación NRZ. Con PAM-4 tan solo se alcanzaron 14 [Gb/s] para esa misma distancia de fibra.

Cuando se empleó el DML se eligió una corriente de bombeo de 4 a 8 [mA] debido a que con ésta se obtuvieron los resultados más favorables. Al realizar pruebas con modulación duobinaria, la frecuencia de corte para el filtro paso-bajas que logró mejor desempeño del sistema fue de 0.25 veces la tasa de transmisión. Con estos valores de corriente de bombeo y frecuencia de corte se alcanzó una tasa de transmisión de hasta 21 [Gb/s] al usar modulación duobinaria en un enlace con 10 [Km] de fibra óptica sin sobrepasar el umbral de BER definido, mientras que para NRZ y PAM-4 sólo se alcanzaron 12 y 16 [Gb/s], respectivamente.

El transmisor que obtuvo los mejores resultados en términos de la tasa de transmisión fue el DML porque logró transmitir hasta 21 [Gb/s] usando modulación duobinaria para 10 [Km] de fibra óptica. Por otro lado, en términos de la longitud del enlace, fue el SOA el que obtuvo resultados más favorables debido a que alcanzó 20 [Km] de fibra óptica con una tasa de transmisión de hasta 18 [Gb/s] empleando modulación NRZ y duobinaria.

## Abstract.

The huge demand for broadband services by network users around the world has driven the scientific community to investigate new techniques, systems and devices that can operate at increasing bit rates and at the same time be affordable.

In this research work, two different optical transmitters are analyzed and compared: a directly modulated (DML) vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) and a transmitter based on a semiconductor optical amplifier (SOA) used as an external modulator. Both transmitters are tested with three different modulation formats: NRZ (Non-Return-to-Zero), duobinary and PAM-4 (Pulse Amplitude Modulation); in order to determine the most convenient transmitter and modulation format for short-range passive optical networks (PON).

The analysis is performed by modeling each of the elements that integrate the optical system, as explained in chapter two. Among the most important models are those of the SOA and the DML. To simulate the behavior of the first, a mathematical model consisting of a differential equation was used. With this equation, the changes in the gain provided by the device as a function of time are calculated and based on this, the variation of the optical field at the output of the device is obtained also as a function of time. In the case of the DML, two coupled differential equations that model the variations in the carrier density (electrons) and the photon density in the device as a function of time were used, also obtaining the variation of the optical field as a function of time. To solve the models used in both cases, a fourth-order Runge-Kutta numerical method was employed, in which the solution of the model in a time interval is calculated by combining four evaluations of the function or functions within the same interval. All the simulations were performed in MATLAB.

When using the SOA as an external modulator, an input power of 0 [dBm] and a pump current of 200 to 400 [mA] were chosen because these values provided the best results. In the case of duobinary, the cut-off frequency for the low-pass filter that resulted in better performance of the system was 0.2 times the bit rate. A threshold for the bit error ratio (BER) of  $1 \times 10^{-2}$  was defined. With this modulation format and cut-off frequency, a bit rate of up to 18 [Gb/s] was achieved on a link 20 [Km] long without exceeding the defined BER threshold, just as when using NRZ modulation. With PAM-4 only 14 [Gb/s] were reached for that same fiber distance.

When the DML was used, a pump current of 4 to 8 [mA] was chosen because these values provided the most favorable results. When performing tests with duobinary modulation, the cut-off frequency for the low-pass filter that achieved better system performance was 0.25 times the transmission rate. With these values of pump current and cut-off frequency, a bit rate of up to 21 [Gb/s] was reached when using duobinary modulation on a link with 10 [Km] of optical fiber without exceeding the defined BER threshold, while for NRZ and PAM-4 only 12 and 16 [Gb/s] were reached, respectively.

The transmitter that obtained the best results in terms of the bit rate was the DML because it managed to transmit up to 21 [Gb/s] using duobinary modulation for 10 [Km] of optical fiber. On the other hand, in terms of the link length, the SOA obtained the most favorable results because it reached 20 [Km] of optical fiber with a bit rate of up to 18 [Gb/s] using NRZ and duobinary modulation.

# 1. Introducción.

En el año 1992 el tráfico transportado en Internet a nivel global era de tan solo 100 [GB] diarios, diez años después, en 2002, se transportaba esa misma cantidad de información cada segundo. Actualmente se transportan más de 20,000 [GB] cada segundo a nivel global [1]. Esto no hubiera sido posible sin la implementación de redes ópticas que soportaran tasas de transmisión cada vez más altas y con enlaces cada vez de mayor longitud. Ya en 2002 se reportaban enlaces ópticos con tasas de transmisión mayores a 10 [Tb/s] y distancias de hasta 300 [Km] en una sola fibra óptica [2], ningún otro sistema de comunicaciones ha logrado alcanzar tasas de transmisión tan altas y sólo los enlaces satelitales de microondas pueden enviar información a distancias superiores a los 100 [Km] sin necesidad de regenerar la señal.

Para realizar un enlace óptico se requieren por lo menos tres elementos: un transmisor óptico que convierte una señal eléctrica en óptica, la fibra óptica por la cual se transmite esta señal y el receptor óptico, que convierte la señal óptica a eléctrica; además de la información o mensaje que se desea enviar. En el capítulo 2 del presente trabajo se explica el sistema óptico completo que se desarrolló basado en el software de simulación MATLAB, mientras que en el presente capítulo se explican brevemente los objetos de estudio principales del proyecto, que son: los transmisores ópticos elegidos y los formatos de modulación que se decidieron emplear. También se da una breve descripción de lo que son las redes ópticas pasivas para después mostrar el estado del arte de los transmisores estudiados y, por último, justificar y presentar el objetivo del proyecto de investigación que se llevó a cabo a lo largo de la maestría.

## 1.1 Transmisores ópticos.

Las características principales de una fuente óptica son: la longitud de onda a la que trabaja, la potencia con que emite radiación, la forma de onda de salida y el ancho espectral. Este último se refiere al intervalo de frecuencias o longitudes de onda en el que emite radiación dicha fuente óptica.

Las fuentes ópticas más utilizadas en la actualidad para sistemas de comunicaciones son las de semiconductor y existen de dos tipos: los Diodos Emisores de Luz (LED) y los Diodos Láser (LD) [3]. Las fuentes ópticas tipo LED emplean el proceso de emisión espontánea por lo que los fotones generados tienen características distintas unos respecto de otros y se tiene un ancho espectral mayor que el de una fuente óptica de tipo LD. Una fuente LED trabaja con tasas de modulación y potencias menores que con las que trabaja un dispositivo LD. A diferencia de los dispositivos LED, las fuentes ópticas de tipo LD utilizan la emisión estimulada para generar fotones con características iguales, lo que resulta en un ancho espectral mucho menor gracias a la coherencia con que se emiten las ondas. Las fuentes LD son más eficientes que una fuente tipo LED y pueden ser moduladas a tasas más altas, además de que son más sencillas de acoplar con la fibra óptica, por lo que son las fuentes ópticas más utilizadas en los sistemas de telecomunicaciones a grandes distancias y altas tasas de transmisión [4], como las que trata este trabajo.

Existen dos formas en que se puede modular una señal óptica: la modulación directa y la modulación externa.

La modulación directa sucede cuando se aplica una señal eléctrica con información a la fuente óptica para que ésta produzca una señal de salida que contenga la misma información que se desea enviar. Este tipo



de modulación es la más sencilla y barata debido a que no se necesita otro componente además de la fuente de luz [4]. La principal desventaja en este tipo de modulación es que la frecuencia y fase de la señal óptica varía con el tiempo. Esto produce un ensanchamiento del espectro transmitido y al mismo tiempo mayor dispersión en la señal de salida. A este fenómeno se le conoce como chirrido espectral, o 'chirp' [5].

El segundo tipo de modulación es llamado modulación externa y consiste en colocar un dispositivo que module la señal óptica a la salida de una fuente continua. Esto se realiza generalmente mediante dispositivos que aprovechan los fenómenos de interferometría o electro-absorción y se encargan de imprimir la información en la señal óptica de salida dejando pasar u obstruyendo el haz de luz de la fuente, dependiendo del valor de la señal eléctrica de entrada. La implementación de este tipo de modulación reduce el chirp en la señal y generalmente consigue una mayor velocidad de transmisión.

En el presente proyecto de investigación se realiza una comparación entre dos transmisores ópticos de distintos tipos. El primero es un láser modulado externamente por un amplificador óptico de semiconductor (SOA). El principio de funcionamiento al usar un amplificador óptico como modulador es que los distintos niveles de la señal eléctrica que se desea transmitir corresponden a ciertos niveles de ganancia del SOA, por lo que, al bombearlo con dicha señal eléctrica, éste amplificará la señal óptica continua de entrada proporcionada en mayor medida cuando se tengan niveles más altos de la señal de bombeo y en menor medida cuando haya niveles más bajos. Esto idealmente resulta en una señal óptica de salida con la misma información que la señal eléctrica de bombeo, con la ventaja de que el SOA proporciona cierta ganancia a la señal óptica a la salida del transmisor.

El segundo transmisor óptico que se eligió para su estudio es un láser modulado directamente (DML) basado en un láser de emisión superficial y cavidad vertical (VCSEL) que básicamente se bombea con la señal eléctrica que contiene la información que se desea transmitir y éste la transforma en una señal óptica con la misma información a la salida.

### **1.1.1 SOA como modulador óptico.**

Los SOA's se componen de materiales semiconductores, existen dos tipos de estos materiales. Los semiconductores intrínsecos son formados por elementos en estado puro con estructuras homogéneas de arreglos cristalinos. Los semiconductores extrínsecos son a los que se ha agregado algún tipo de impureza para modificar su estructura y pueden presentar mayor número de cargas positivas (tipo P) o mayor número de cargas negativas (tipo N).

Los electrones que forman los enlaces entre los átomos del material semiconductor se dice que se encuentran en la banda de valencia, cuando el material recibe energía, estos electrones pueden abandonar su enlace y pasar a un estado energético mayor, dejando huecos en la banda de valencia y pasando a la banda de conducción. Cuando esto sucede, el material comienza a comportarse como un conductor.

Un electrón libre puede fluir por el material semiconductor hasta quedar atrapado en un hueco, lo que se conoce como proceso de recombinación. Otra forma de interpretarlo es que el electrón cayó de la banda de conducción a la de valencia liberando energía en forma de calor, emitiendo un fonón, o en forma de radiación, emitiendo un fotón. A la diferencia de energía que hay entre la banda de conducción y la de

valencia se le llama banda prohibida y representa la energía necesaria para romper el enlace entre dos electrones del material [6].

La recombinación de un electrón y un hueco puede dar lugar a la emisión de un fotón, a esto se le llama recombinación radiativa y puede resultar en un proceso de emisión espontánea o estimulada. Cuando un electrón en la banda de conducción cae espontáneamente a la banda de valencia, libera la diferencia de energía en forma de fotón, lo que se conoce como emisión espontánea. Cuando un electrón en la banda de conducción cae a la banda de valencia debido a la estimulación de un fotón exterior con energía igual a la banda prohibida del material, se genera un nuevo fotón con la misma frecuencia, polarización y fase del fotón original, a esto se le conoce como emisión estimulada [7].

También puede suceder que un fotón externo sea absorbido por el material, provocando que un electrón en la banda de valencia suba a la banda de conducción. A esto se le conoce como absorción.

Los amplificadores ópticos de semiconductor hacen uso de la emisión estimulada para generar ganancia óptica y están formados por la unión de tres distintos semiconductores: un semiconductor tipo P, un semiconductor intrínseco conocido como medio activo y un semiconductor tipo N, en ese orden. A esta unión se le conoce como doble hetero-estructura y se muestra en la figura 1.1 [8].

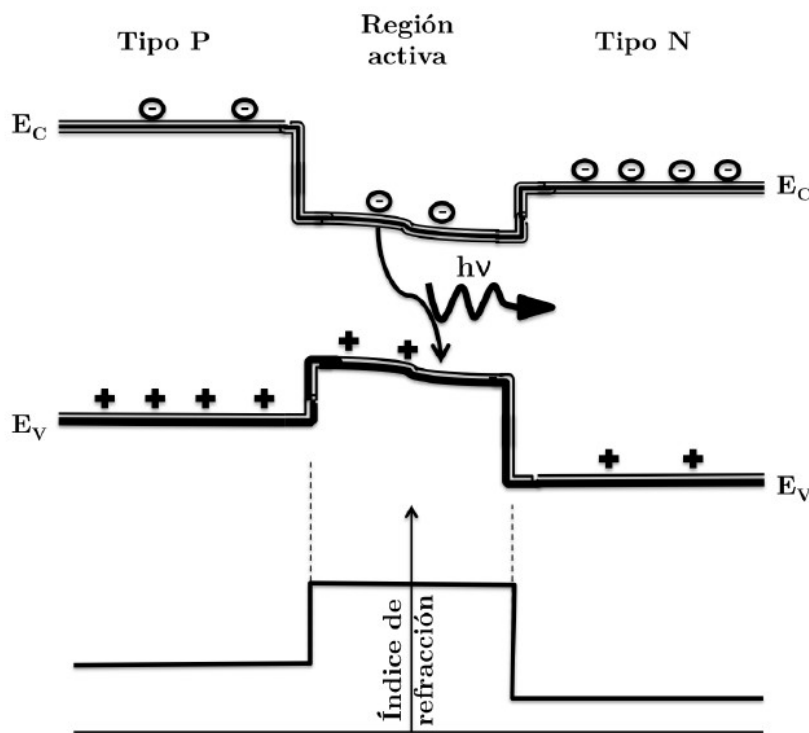


Figura 1.1 Diagrama de bandas energéticas y perfil de índice de refracción de un SOA [8].

En la figura se muestra el diagrama de bandas de la unión de los materiales semiconductores que conforman el SOA, la banda de valencia en la parte inferior ( $E_V$ ) y la banda de conducción en la parte superior ( $E_C$ ). Se puede observar que la banda prohibida en la región activa es mucho menor que en las otras dos regiones y tiene mayor índice de refracción, esto para confinar el flujo de fotones a esta región,

similar a como sucede en una fibra óptica. También debido a la menor banda prohibida se acumulan los electrones y huecos en la región activa, donde se desea que suceda la emisión estimulada.

Para que exista amplificación, se debe bombear el SOA con una corriente que produce que haya mayor concentración de electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia hasta el punto en el que hay más electrones que huecos, a esto se le conoce como inversión de población y provoca que sea mucho más probable la emisión estimulada de fotones en la región activa y que los fotones incidentes no sean absorbidos por el material.

Además del bombeo se debe inyectar la señal óptica que se desea amplificar en la región activa, esta última actúa como guía de onda para los fotones de la señal y al pasar por ella estimulan la recombinación de electrones y huecos, produciendo así la emisión estimulada que proporcionará ganancia a la señal óptica inyectada [9].

Al usar un SOA como modulador, la potencia óptica de entrada debe ser constante, es decir, sin información. Esta potencia óptica será amplificada de acuerdo a la señal eléctrica de bombeo, lo que significa que ésta debe contener la información que se desea transmitir. La ganancia del SOA depende directamente de la señal eléctrica de bombeo, que se traduce en electrones que se inyectan en la banda de conducción del dispositivo, por lo que al aumentar o disminuir la corriente de bombeo se aumentará o disminuirá la ganancia del SOA proporcionalmente, con lo que la potencia óptica constante de entrada se convertirá en una señal óptica de salida amplificada y con información.

Los SOA's son dispositivos muy similares a los diodos láser. La principal diferencia entre ambos es que los SOA's carecen de una cavidad resonante, contando solamente con una región de ganancia que amplifica la radiación electromagnética incidente también conocida como potencia óptica de entrada. Una de las ventajas principales que tienen los amplificadores ópticos de semiconductor es que, debido a estar fabricados con materiales semiconductores, es mucho más sencillo integrarlos con otros dispositivos ópticos que estén fabricados con el mismo tipo de materiales como los láseres o los fotodiodos, lo que significa un ahorro de potencia y simplifica el sistema [10]. Además, los SOA's pueden operar en la ventana de los 1550 [nm] y no requieren tanta potencia para trabajar como un amplificador tipo Raman. Su principal desventaja es su comportamiento altamente no lineal para potencias cercanas o mayores a su potencia de saturación.

### **1.1.2 Láser modulado directamente (DML).**

Como ya ha sido mencionado, un diodo láser es un dispositivo muy similar a un amplificador óptico de semiconductor. Para que un láser pueda funcionar se requiere una fuente de energía que genere una diferencia de potencial que a su vez produzca la corriente de bombeo que se aplica al dispositivo. También se necesita de un medio activo, que es donde sucede la emisión estimulada y se puede obtener usando la misma estructura que tiene un SOA, pero con distintas configuraciones. Por último, es necesario que exista una cavidad resonante para que los fotones generados en la estructura recorran varias veces el medio activo y tengan cierta ganancia antes de salir del dispositivo. Un resonador consiste básicamente en dos espejos orientados de forma paralela, el primero con un coeficiente de reflexión del 100 % y el segundo con un coeficiente ligeramente menor al 100 % para que permita salir la radiación. El resonador determina las características espectrales del láser y la dirección de radiación.

La corriente de bombeo que se aplica al láser debe superar cierto umbral para que se tenga mayor ganancia óptica que pérdidas en la cavidad resonante y, de esta forma, el dispositivo comience a emitir una potencia óptica de salida. Al aplicar la corriente de bombeo, se generan fotones al interior de la estructura mediante emisión espontánea, pero gracias a la cavidad resonante sólo se conservan los fotones que tengan ciertas longitudes de onda determinadas por la ecuación 1.1. Estos últimos, al viajar por el medio activo provocan la emisión de otros fotones con las mismas características, dando lugar a la emisión estimulada, que es el fenómeno requerido y mediante el cual se produce la ganancia necesaria para que exista radiación óptica [11].

$$\lambda_m = \frac{2L}{m} \quad (1.1)$$

Donde  $\lambda_m$  es la longitud de onda del modo  $m$  dentro de la cavidad resonante del láser,  $L$  es la longitud de la cavidad resonante y  $m$  es el número de modo.

Al aumentar la corriente de bombeo aplicada al dispositivo, se genera un mayor número de pares electrón-hueco, con lo que se emiten más fotones y por lo tanto se tiene una mayor potencia óptica de salida. De esta forma, al variar la corriente de bombeo se modula la señal óptica de salida, quedando esta última con la información contenida la primera.

Como se mencionó anteriormente, para este proyecto se decidió emplear un láser de emisión superficial y cavidad vertical (VCSEL) debido a que tiene varias características atractivas como un bajo costo y consumo de potencia, alta velocidad de transmisión y un haz de luz circular a la salida. Por lo anterior, los VCSEL's son ampliamente usados en las redes ópticas de comunicación, especialmente en las de corto alcance.

Los VCSEL's están formados por una cavidad resonante perpendicular al plano de la región activa. Esta cavidad se construye con dos reflectores distribuidos de Bragg (DBR) que están formados, a su vez, por múltiples capas alternadas de semiconductores con diferentes índices de refracción, lo que produce la reflexión de las ondas ópticas que poseen la longitud de onda deseada. Los DBR's se ubican encima y debajo de la región activa, con lo que se logra la emisión superficial; esto permite un haz de emisión circular que puede ser acoplado muy eficientemente con una fibra óptica. Al tener una región activa con un volumen pequeño, los VCSEL's se pueden operar con corrientes bajas a tasas de transmisión altas. Además, su tamaño tan pequeño permite que se fabriquen hasta 100,000 elementos en una sola oblea de 3 pulgadas. Lo anterior combinado con la posibilidad de probar los VCSEL's desde que están en la oblea resulta en costos de fabricación muy bajos comparados con otros tipos de láseres [12]. En la figura 1.2 se muestra un diagrama de la estructura de un VCSEL.

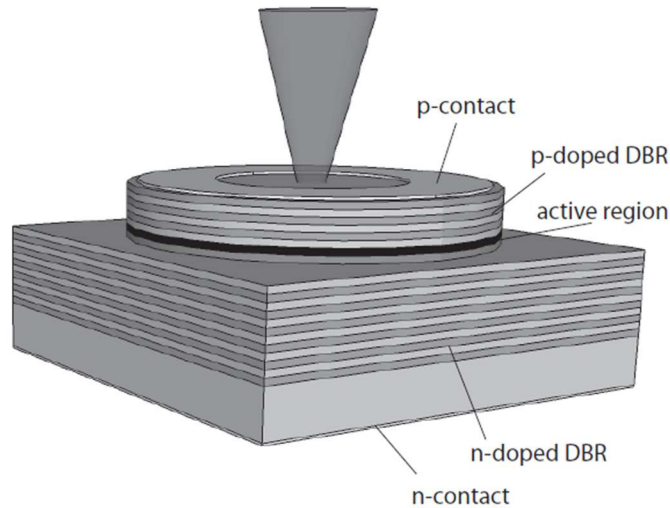


Figura 1.2 Estructura de un VCSEL [12].

## 1.2 Formatos de Modulación.

Hasta este punto se ha explicado el funcionamiento básico de los dos tipos de transmisores que se estudian en este trabajo de investigación. En este inciso se expondrán de manera breve las distintas técnicas o formatos que se usaron para modular la señal de salida del transmisor, es decir, para que contenga información.

Existen distintas formas de modular una señal, pero siempre es necesario variar un parámetro de la misma en función de la señal moduladora, que es la que contiene información. En los casos presentados, esta señal moduladora corresponde a la señal eléctrica con que se alimentan los dispositivos ópticos. Todos los formatos de modulación estudiados en este trabajo son ejemplos de modulación en amplitud, en contraste a la modulación en fase, pero cada uno tiene ciertas características particulares que serán explicadas a continuación. En [13] y [14] se hacen revisiones de los principales formatos avanzados de modulación usados en sistemas ópticos, así como de su estado del arte.

### 1.2.1 Modulación NRZ.

El formato de modulación más comúnmente empleado en las comunicaciones ópticas en la actualidad es el conocido como NRZ (Non-Return-to-Zero). En este formato se le dan solo dos niveles de amplitud a la señal modulada, cuando la señal se encuentra en el nivel superior significa un bit con valor de 1 y cuando está en el inferior significa un 0. Su nombre proviene de que cuando se transmiten 1's la señal no regresa al nivel inferior, sino que se mantiene en el nivel superior por todo el periodo de bit. Uno de los problemas más comunes al emplear NRZ es que se puede perder fácilmente la sincronización entre el transmisor y el receptor al no haber transiciones de potencia; por otro lado, la no-alternancia de la señal representa un ahorro en el ancho de banda [15]. En la figura 1.3 se muestra una señal modulada con NRZ y algunos formatos similares.

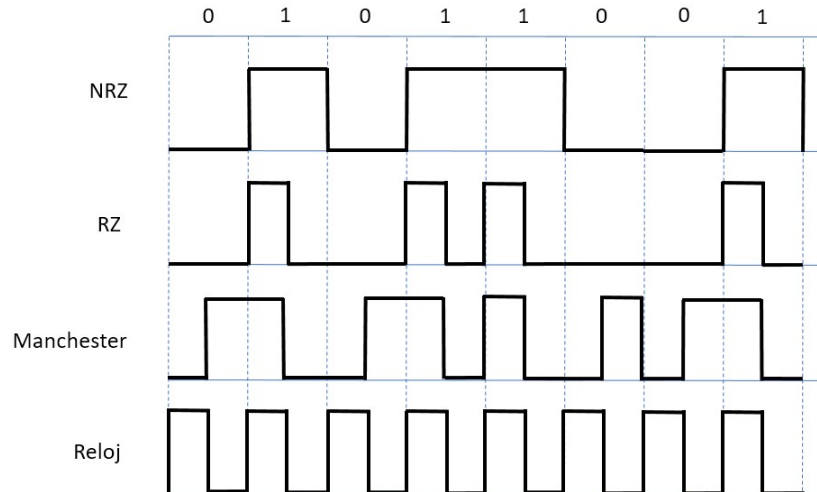


Figura 1.3 Señales moduladas mediante NRZ, RZ y Manchester, así como la señal de reloj.

### 1.2.2 Modulación Duobinaria.

Para poder comprender la modulación duobinaria primero se debe tener un panorama claro de lo que es la modulación polibinaria y la codificación correlativa de nivel (CLC).

Las señales polibinarias son señales multinivel que implementan codificación correlativa de nivel. Una señal óptica multinivel tiene menor apertura entre sus niveles que una señal óptica binaria generada con la misma fuente, por lo que se verá más afectada por cualquier fenómeno que interfiera en la propagación de la señal [16].

La correlación entre los niveles de una señal multinivel se refiere a un proceso de codificación en la transmisión que asocia cada posible combinación de un grupo de  $n$  dígitos binarios con un solo nivel cualquiera de la señal resultante, donde cada dígito binario por sí solo puede asociarse con más de un nivel y la generación de un nivel particular depende del comportamiento anterior de la misma señal. Esto resulta en menor susceptibilidad de la señal a generar y propagar errores [17].

Para generar una señal polibinaria de  $M$  niveles se deben seguir dos pasos. Primero, se codifica la señal binaria  $A$  en una nueva señal binaria  $B$  de forma que en esta última  $M-1$  dígitos consecutivos representen un solo dígito de la señal original  $A$ . Para lograr esto se hace una operación binaria módulo 2 del dígito de  $A$  que se desea codificar con los  $M-2$  dígitos de  $B$  anteriores, como se muestra en la ecuación 1.2. En segundo lugar, se debe transformar la señal  $B$  en una señal  $C$  polibinaria a partir de la suma del elemento de  $B$  que se desea modular más los  $M-2$  elementos anteriores de la misma señal  $B$ , como se muestra en la ecuación 1.3. De esta forma se obtiene una señal multinivel de  $M$  niveles con CLC, es decir, una señal polibinaria [18].

$$b_k = a_k \oplus b_{k-1} \oplus b_{k-2} \oplus \dots \oplus b_{k-(M-2)} \quad (1.2)$$

$$c_k = b_k + b_{k-1} + b_{k-2} + \dots + b_{k-(M-2)} \quad (1.3)$$

Donde  $a_k$  es el  $k$ -ésimo elemento de la señal original binaria  $A$ ,  $b_k$  es el  $k$ -ésimo elemento de señal  $B$  binaria con codificación correlativa y  $c_k$  es el  $k$ -ésimo elemento de la señal polibinaria  $C$ . Para decodificar

la señal polibinaria en el receptor es suficiente aplicar la operación módulo 2 al k-ésimo elemento de la señal recibida, de forma que se cumpla con la ecuación 1.4. Esto significa que no es necesario saber los elementos anteriores de la señal polibinaria C en el receptor para poder decodificarla, lo que simplifica bastante la detección de errores sin la necesidad de agregar redundancia a la información en el transmisor.

$$a_k = c_k \text{ mod } 2 \quad (1.4)$$

Las señales polibinarias tienen la ventaja de ser robustas ante los efectos de la distorsión ocasionada por la dispersión cromática y los efectos no-lineales de la fibra óptica, además de tener una alta eficiencia espectral.

Una señal duobinaria es una señal polibinaria con sólo tres niveles de amplitud. Para generar una señal eléctrica duobinaria se puede emplear un codificador digital que realice la codificación correlativa de nivel, es decir, que transforme la señal digital A en B. Después se imprime la información de B a una señal eléctrica NRZ y posteriormente se pasa esa misma señal por un filtro paso-bajas Bessel, preferentemente de quinto orden, con una frecuencia de corte de aproximadamente la cuarta parte de la tasa de transmisión de la señal NRZ, con lo que se hace la suma de pulsos y se genera la señal C de tres niveles con codificación correlativa de nivel, es decir una señal eléctrica duobinaria. Con esta señal eléctrica se puede bombear el SOA si se desea usar como modulador o también se puede bombear el láser si la configuración deseada es la de un DML.

### 1.2.3 Modulación por amplitud de pulsos (PAM).

La modulación por amplitud de pulsos consiste en imprimir información a una señal mediante la variación de su amplitud, asignándole valores o símbolos a los distintos niveles de la misma. Estos símbolos corresponden a secuencias de  $N$  bits, lo que se relaciona con el número de niveles  $M$  de la señal a través de la ecuación 1.5.

$$N = \log_2 M \quad (1.5)$$

El caso más simple de PAM es cuando se tienen sólo dos niveles en la señal (PAM-2), que resulta ser exactamente lo mismo que NRZ, es decir, NRZ es un caso particular de PAM.

El caso de PAM que se eligió en el presente trabajo es PAM-4, en el cual se envían dos bits en cada símbolo. Por lo tanto, es fácil observar que al emplear PAM-4 se tiene el doble de capacidad que al usar NRZ como formato de modulación, siempre y cuando se mantenga el periodo de símbolo del primero igual al periodo de bit del último. Si, por otro lado, lo que se conserva es la tasa de bits entonces la señal PAM-4 tendrá un ancho de banda de la mitad del correspondiente a NRZ. En la figura se muestra una señal modulada mediante PAM-4, se puede observar cómo varía entre cuatro niveles de amplitud a través del tiempo [19].

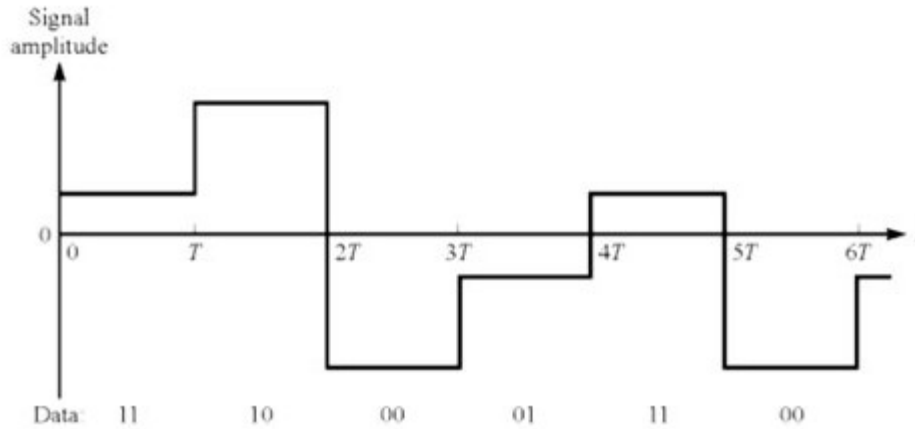


Figura 1.4 Amplitud de una señal PAM-4 en el tiempo [19].

Uno de los problemas principales al usar PAM-4 es que se reduce el espaciado entre niveles, lo que vuelve a la señal más susceptible al ruido y provoca que sea más fácil cometer errores al demodularla. Aun así, PAM-4 es uno de los formatos de modulación más usados hoy en día debido a su simplicidad y bajo consumo de potencia, además de su alta eficiencia espectral [20].

### 1.3 Redes Ópticas Pasivas (PON).

Las PON's son redes ópticas punto-a-multipunto que no tienen elementos activos en el campo como regeneradores o amplificadores electro-ópticos. Los elementos activos en este tipo de redes se alojan en la oficina central o en el extremo del usuario, por lo que es sencillo desplegarlas y costeable mantenerlas. En [21] y [22] se presentan revisiones del desarrollo de las PON's y su estado del arte, en caso de que el lector desee profundizar en este tema. La figura 1.5 muestra la arquitectura de una red PON donde se conecta la terminal de línea óptica (OLT) en la oficina central del proveedor de servicio con las unidades de red óptica (ONU's) en el lado del usuario. Una sola fibra sale del OLT y con ayuda de divisores ópticos pasivos (Optical Splitters) se distribuye la señal óptica en distintas fibras que van hacia los usuarios finales.

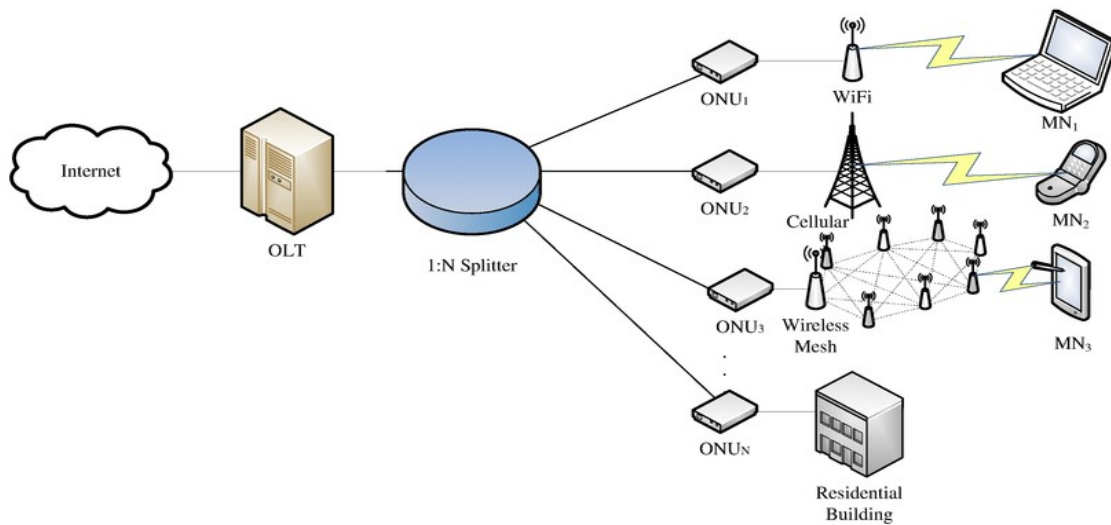


Figura 1.5 Arquitectura de una red óptica pasiva (PON) [23].



El motivo por el cual se desarrollaron las PON fue la necesidad de aumentar la capacidad de las redes de acceso que estaban siendo saturadas por el tráfico de Internet debido al crecimiento masivo de éste en las últimas décadas. El desarrollo de las tecnologías ópticas ha hecho factible el uso de PON's en redes de área local con servicios de última milla como fibra a la casa o fibra al edificio (FTTx).

Las redes PON de primera generación emplean multiplexión por división de tiempo (TDM) para compartir el ancho de banda de la red entre los usuarios. La oficina central del proveedor de servicio es la encargada de gestionar el flujo de subida y de bajada para los suscriptores de la red. En este tipo de redes se emplean acopladores para dividir o combinar la potencia óptica hacia o desde el usuario. El principal problema es que al usar TDM se desaprovecha el enorme ancho de banda de la fibra óptica; la tasa de bits alcanzada por este tipo de redes es de 1 [Gb/s] de subida y 1 [Gb/s] de bajada, es decir, 1 [Gb/s] simétrico para el caso de Ethernet PON (EPON) [24].

La siguiente generación de PON, Gigabit PON (GPON), alcanza tasas de 9.953 [Gb/s] de bajada y 2.488 [Gb/s] de subida y fue estandarizada en 2010. Después, en 2016, se agregó un estándar llamado Gigabit Simétrica PON (XGS-PON) con una tasa de 9.953 [Gb/s] simétricos [21]. Hasta este punto, todas las generaciones de PON's habían utilizado TDM para dar servicio a los múltiples usuarios de la red.

Para alcanzar tasas de transmisión más altas en las redes PON se decidió utilizar tecnología de multiplexión por división de tiempo y longitud de onda (TWDM), que está basada en 10 Gigabit PON's apiladas por multiplexión por división de longitud de onda (WDM). A esta última generación de PON's se le llamó Nueva Generación PON2 (NG-PON2).

Por otro lado, la tecnología de 100 Gigabit Ethernet basada en canales de 25 [Gb/s] y desarrollada para satisfacer la demanda de ancho de banda en interconexiones locales de centros de datos, comenzó a ser utilizada y desplegada en grandes volúmenes, con lo que disminuyeron los costos de los componentes de este tipo de redes. Lo anterior hizo factible la idea de crear un nuevo estándar para redes ópticas pasivas empleando TDM: 25G TDM PON, que se espera sea publicado en 2020 [21].

## **1.4 Estado del Arte.**

A continuación, se presentan algunas de las investigaciones más recientes en las cuales se emplearon transmisores ópticos similares a los estudiados en el presente trabajo, es decir, usaron SOA's como moduladores ópticos y VCSEL's modulados directamente en distintas configuraciones que serán brevemente explicadas a continuación. Además, se hace una comparación entre las características de algunos transmisores ópticos que emplean diferentes técnicas de modulación. Cada investigación representa una aportación al desarrollo de las comunicaciones ópticas y son de gran utilidad para conocer el panorama de las mismas en la actualidad.

En 2018 los investigadores Presi y Ciaramella presentaron en [25] un estudio acerca de una nueva configuración empleando amplificadores ópticos de semiconductor reflectivos (RSOA) para lograr transmisión bidireccional usando la misma longitud de onda. La configuración estudiada hace uso del concepto conocido como 'self-seeding', en donde se agrega un elemento reflectivo al transmisor que interactúa con la selectividad de la longitud de onda de la red y resulta en la sintonización automática de emisores de banda ancha o láseres multimodo como el mismo RSOA, lo que permite la fabricación de transmisores sintonizables de banda ancha y bajo costo para redes WDM.

La nueva configuración propuesta elimina el elemento reflectivo del transmisor y en su lugar utiliza el RSOA al otro extremo del enlace para cumplir con la misma función, de forma que se crea una cavidad entre los dos RSOA's a los extremos del enlace y estos pueden ser modulados simultáneamente. A esta configuración se le llama 'mutual-seeding' y tiene la ventaja de que permite la transmisión bidireccional en la longitud de onda de resonancia, con lo que se puede reducir el número de componentes ópticos requeridos en la red. Aún más importante es la capacidad de este tipo de enlaces para soportar nuevas aplicaciones como redes ópticas reconfigurables.

En la figura 1.6 se muestra un esquema del enlace óptico con la configuración 'mutual-seeding' propuesta. Se puede observar la cavidad resonante que se genera entre los dos RSOA's en color rojo. Los fotodiodos (PD's) son los encargados de recibir la señal óptica y convertirla en una señal eléctrica a la cual se le resta la señal enviada debido a que también es reflejada por el RSOA contrario, para poder eliminar esta señal se le debe dar cierto procesamiento para obtener solamente la señal recibida. Usando la mencionada configuración se envió una señal NRZ a 1.25 [Gb/s] y se logró una transmisión sin errores, cabe mencionar que esto fue solo para caracterizar el enlace y para demostrar el funcionamiento del sistema propuesto.

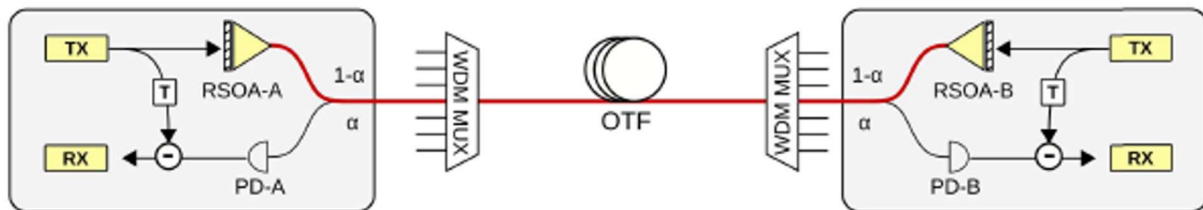


Figura 1.6 Enlace óptico en configuración 'mutual-seeding' [25].

Los investigadores Rizou y Zoiros presentaron en [26] una investigación en la cual se hace un análisis del uso de un resonador de micro-anillo empleado como filtro de muesca para mejorar el desempeño de un SOA modulado directamente. Un resonador de micro-anillo (MRR) es, en pocas palabras, una guía de onda en forma de anillo acoplada a otra guía de onda de bus que se agrega a la salida del SOA y actúa como un discriminador de frecuencias que transforma el deterioro debido a la dependencia del patrón de bits de las componentes espectrales de la señal que entra al MRR en cambios de amplitud, con lo que se contrarrestan los cambios de amplitud de la señal que sale del SOA modulado directamente y se restaura la calidad de la señal de salida.

En el mismo artículo se demuestra mediante simulaciones que el uso del MRR permite alcanzar una tasa de transmisión de 10 [Gb/s] para enlaces de hasta 35 [Km] de fibra óptica monomodo (SMF) empleando NRZ como formato de modulación, lo que representa un incremento de 4 veces la tasa de transmisión que se puede lograr al modular el SOA estudiado. Para lograr esto se deben de ajustar diferentes parámetros del MRR para que haya una mejora en el ancho de banda y por lo tanto de la señal a la salida de la combinación MRR-SOA. En la figura 1.7 se muestra un diagrama del sistema propuesto por Rizou y Zoiros en el cual se puede observar la señal que sale del láser onda continua (CW laser), la señal eléctrica con que se bombea el SOA y la señal óptica a la salida del mismo, así como la señal a la salida del MRR y la mejora que tiene ésta respecto a la que sale del SOA.

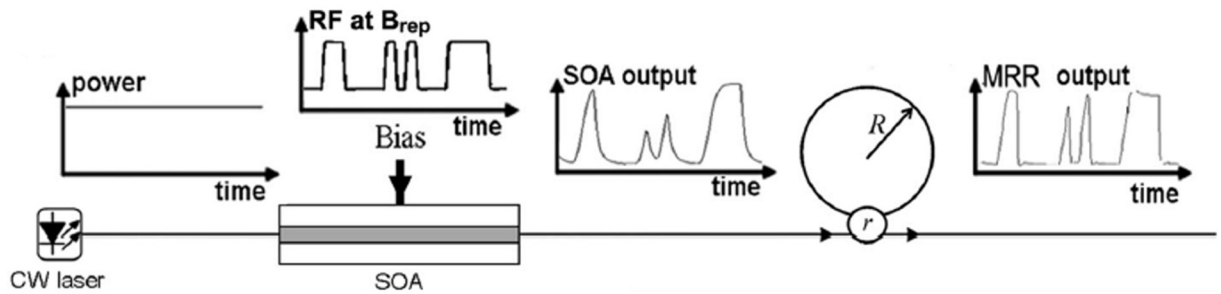


Figura 1.7 Transmisor empleando un resonador de micro-anillo (MRR) como filtro y señales de entrada y de salida [26].

En el artículo presentado por El-Nahal en 2017 [27] se investiga un sistema WDM-PON y se demuestra su funcionamiento para tasas de transmisión de 10 [Gbit/s] simétricos en enlaces de 25 [Km] de fibra óptica. Para lograr lo anterior se emplea modulación por desplazamiento diferencial de fase (DPSK) en el enlace de bajada y NRZ en el de subida; para este último se utiliza un RSOA como modulador.

DPSK es un formato de modulación en el cual la información binaria se añade en la diferencia entre las fases de dos elementos sucesivos de la señal en lugar de variar la amplitud como se hace en los formatos hasta ahora estudiados. Este tipo de modulación tiene distintas ventajas como alta eficiencia espectral y gran tolerancia a la dispersión cromática, además presenta intensidad constante, lo que ayuda a reducir algunos efectos no-lineales en el sistema, así como la dispersión.

El sistema propuesto integra una técnica de reúso de longitud de onda para hacerlo más costeable, esto significa que el enlace de subida usa la misma longitud de onda que el de bajada, de hecho, la señal DPSK de bajada es remodulada por el RSOA en una señal NRZ para el enlace de subida, por lo que no se requiere de un láser de onda continua que alimente el RSOA, como se muestra en la figura. El RSOA fue elegido como modulador en el enlace de subida debido a su alta ganancia óptica, gran ancho de banda y facilidad de integración con otros dispositivos de semiconductor. En la figura 1.8 se muestra el diagrama del sistema propuesto, de lado izquierdo se puede observar el modulador de fase (PM) para generar la señal DPSK del enlace de bajada, mientras que de lado derecho se muestra el RSOA como modulador.

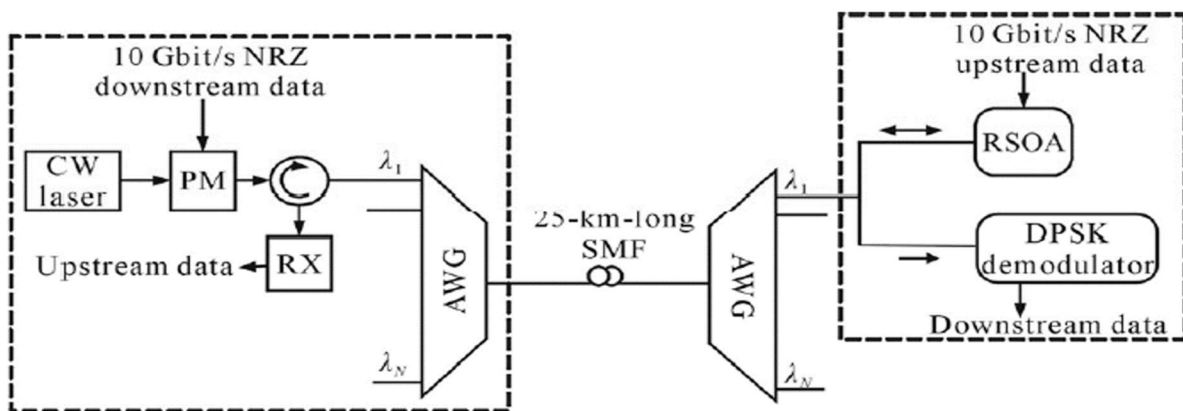


Figura 1.8 Sistema WDM-PON empleando DPSK para el enlace de bajada y NRZ para el enlace de subida [27].

La investigación realizada por los miembros del Instituto de Ingeniería de la UNAM, Gutiérrez-Castrejón, Madera Rodríguez y Ceballos Herrera [1] presenta un transmisor de alta potencia compatible con redes WDM-PON basado en la modulación directa de un SOA, con lo que se elimina la necesidad y el costo de un modulador óptico. En dicha investigación se demuestra el funcionamiento del transmisor propuesto a una tasa de 7.5 [Gb/s] utilizando modulación NRZ y con una ganancia de 10.7 [dB] gracias al amplificador. La ventaja principal que tiene un SOA frente a un láser modulado directamente como un VCSEL o un láser de retroalimentación distribuida (DFB) es que el SOA proporciona mayor potencia a la salida, con lo que incrementa el presupuesto de potencia del enlace. El chirp combinado con la dispersión cromática de la fibra óptica reduce el alcance del enlace. En la figura 1.9 se muestra el esquema del transmisor propuesto, también se presenta la potencia óptica continua generada por el láser y la señal eléctrica modulada con que se bombea el SOA, así como la señal óptica a la salida del mismo que viaja hacia el foto-receptor.

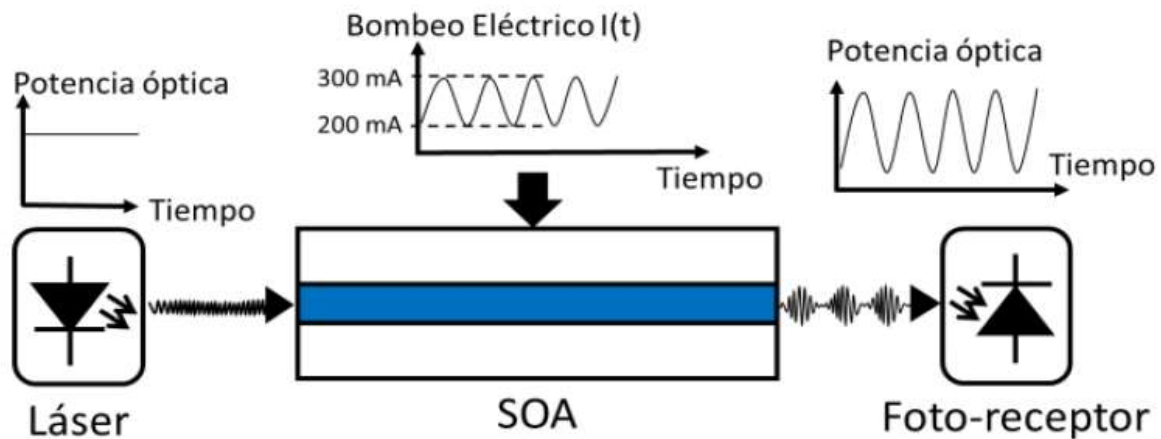


Figura 1.9 Transmisor de alta potencia empleando un SOA como modulador y señales de entrada y de salida [1].

En [28] se reporta un enlace que emplea modulación directa de un VCSEL comercial y un fotodiodo también comercial y se logra una transmisión libre de errores a una tasa de 40 [Gb/s] usando NRZ como formato de modulación. Tanto el transmisor como el receptor usados fueron implementados con tecnología de semiconductor complementario de óxido metálico (CMOS), que es un tipo de proceso de fabricación usado para construir circuitos integrados. El sistema propuesto está diseñado para comunicación entre tableros o racks, por lo que su alcance es tan solo 3 [m] en fibra óptica multimodo (MMF), pero tiene la ventaja de ser muy eficiente energéticamente. En la figura 1.10 se muestran imágenes de los dispositivos que integran el sistema propuesto, en ellas se puede ver el transmisor con la fibra óptica MMF e incluso el VCSEL a la izquierda, mientras que el receptor y su fotodiodo están a la derecha.

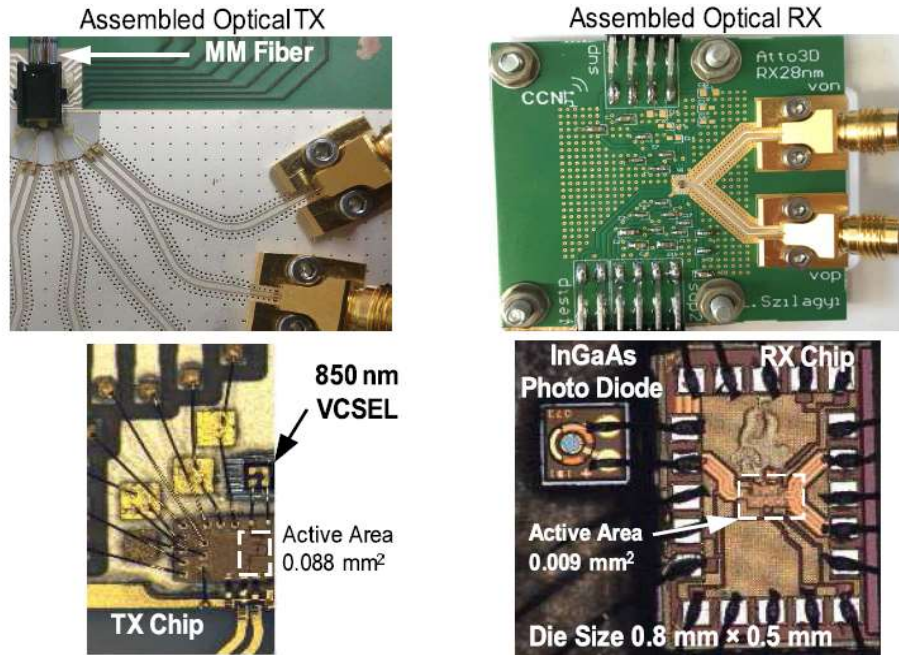


Figura 1.10 Imágenes de los elementos del sistema empleando un VCSEL modulado directamente [28].

Otra investigación importante es la que realizan Breyne, Verplaetse, Neumeyr y otros, en la cual demuestran la transmisión de una señal NRZ con una tasa de 50 [Gb/s] en un enlace de 15 [Km] de fibra óptica SMF [29] usando un VCSEL monomodo de cavidad corta y longitud de onda de 1326 [nm] modulado directamente. Lo anterior se logró empleando un ecualizador compensado (feedforward equalizer o FFE) en el transmisor, con lo cual no fue necesario el uso de técnicas adicionales de procesamiento digital. El transmisor que se usó también fue fabricado con tecnología CMOS y contiene un multiplexor que es capaz de combinar 4 señales eléctricas NRZ con tasas de transmisión de hasta 25 [Gb/s] en una sola señal con una tasa de 100 [Gb/s]. En el receptor se tiene un demultiplexor de 1 a 4 y puede decodificar señales NRZ y duobinarias. En la figura 1.11 se muestra un esquema e imágenes del sistema propuesto y desarrollado, también se puede observar el diagrama de ojo de la señal eléctrica después del FFE y antes de ser transformada en óptica por el VCSEL, así como el mismo diagrama para la señal eléctrica a la salida del fotoreceptor, antes de ser demultiplexada.

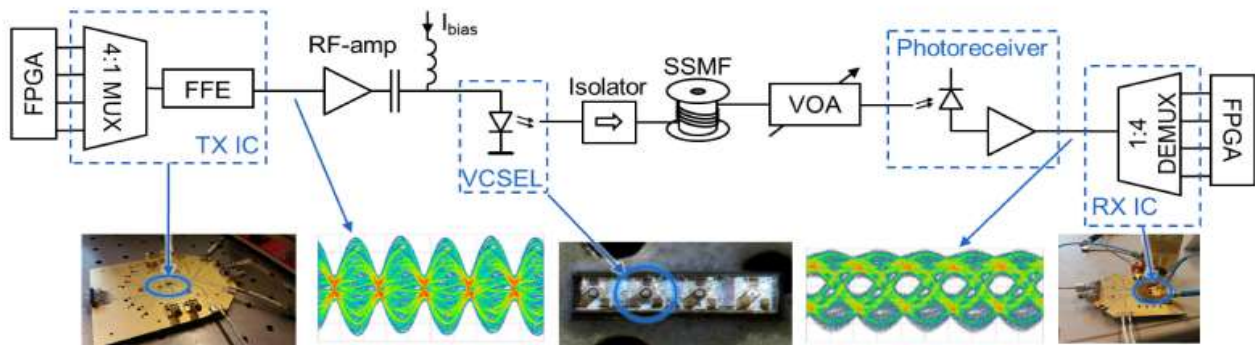


Figura 1.11 Diagrama e imágenes del sistema empleando un FFE y un VCSEL modulado directamente [29].

La investigación realizada por Chorchos [30] presenta una solución intermedia a los formatos de modulación PAM-4 y PAM-8, llamada PAM-6. Este formato está basado en la modulación de amplitud y cuadratura (32-QAM) en el cual no sólo se varía la amplitud de la señal portadora, sino también la fase. Para generar la señal PAM-6 se usó un convertidor de paralelo a serial que envía las componentes de la señal 32-QAM en fase y en cuadratura en diferentes intervalos de tiempo. En el lado del receptor se hace la operación contraria, es decir, se emplea un convertidor de serial a paralelo que regresa la señal a formato 32-QAM y después se decodifica. La solución presentada permite una modulación en amplitud con sistemas de detección directa sin un procesamiento de la señal tan complicado. Otra ventaja es que PAM-6 presenta mayor resistencia al ruido que PAM-8, además de que se pueden alcanzar tasas de transmisión 25% más altas que al usar PAM-4 para el mismo ancho de banda. Una vez generada la señal PAM-6 se empleó un VCSEL multimodo modulado directamente para transmitir la señal y se alcanzó una tasa de 56 [Gb/s]. En la figura 1.12 se muestra un esquema de la generación y recepción de la señal PAM-6 a partir de la señal 32-QAM, en el centro se presenta el diagrama de ojo de la señal PAM-6 y a los lados pueden observar las constelaciones de la señal QAM.

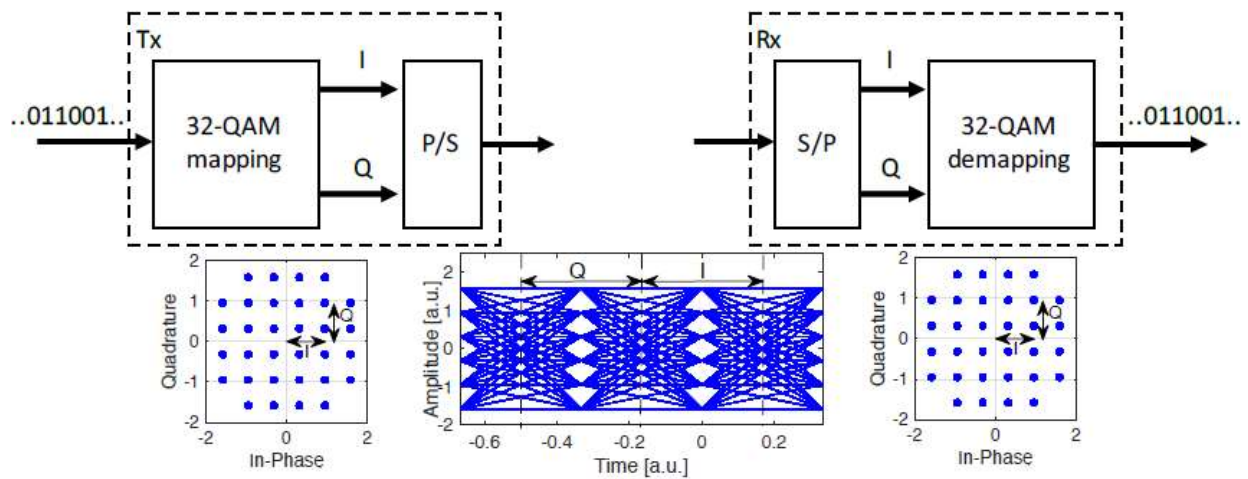


Figura 1.12 Generación y recepción de señal PAM-6 y su diagrama de ojo, así como las constelaciones de las señales QAM [30].

Existen diferentes tipos de moduladores ópticos que se utilizan en las redes ópticas en la actualidad. Dos de los más comunes son: el modulador Mach-Zehnder (MZM) y el modulador de electro-absorción (EAM). Ambos son moduladores externos que pueden ser empleados para modular la amplitud de una señal óptica pero su funcionamiento es distinto. Un MZM, puesto de forma simple, divide la señal óptica continua de entrada en dos guías de onda o brazos, a una de estas guías se le aplica una diferencia de potencial correspondiente a la señal eléctrica que contiene la información, lo que genera un cambio en el índice de refracción de la guía y esto a su vez produce un cambio de fase en la señal que pasa por el brazo. Después se vuelven a unir las guías de onda en una sola y la diferencia de fase entre ambas señales resulta en una interferencia constructiva o destructiva, con lo que se obtiene una señal óptica modulada en amplitud a la salida [5].

Los moduladores de electro-absorción (EAM) utilizan un efecto denominado “Franz-Keldysh”, con el cual se reduce la separación entre las bandas de valencia y de conducción de un semiconductor mediante la

aplicación de un campo eléctrico correspondiente a la señal eléctrica de datos. De esta forma el semiconductor que era transparente para cierto rango de frecuencias, al aplicarse el campo eléctrico empieza a absorber la luz de dicho rango, es decir, obstruye su paso. Mediante este proceso, se modula la amplitud de la señal óptica que pasa por el semiconductor [31].

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre las características principales de algunos transmisores estudiados en distintas aportaciones. Estos dispositivos emplean diferentes técnicas de modulación y fueron utilizados en sistemas diversos.

|                                | <b>VCSEL (DML)<br/>[29]</b> | <b>SOA (EML)<br/>[26]</b> | <b>MZM (EML)<br/>[32]</b> | <b>EAM (EML)<br/>[33]</b> |
|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| <b>Velocidad</b>               | 50 [Gb/s]                   | 10 [Gb/s]                 | 56 [Gb/s]                 | 56 [Gb/s]                 |
| <b>Alcance</b>                 | 15 [Km]                     | 35 [Km]                   | 100 [Km]                  | 4 [Km]                    |
| <b>Potencia de salida</b>      | 3.4 [mW]                    | 40 [mW]                   | 0.8 [mW]                  | 3.2 [mW]                  |
| <b>Pérdidas por inserción</b>  | N.A.                        | -10 [dB]                  | -                         | -                         |
| <b>Razón de extinción (ER)</b> | 2.2 [dB]                    | -                         | 12 [dB]                   | 15 [dB]                   |
| <b>Integrabilidad</b>          | N.A.                        | Alta                      | Media                     | Alta                      |
| <b>Costo</b>                   | \$                          | \$\$                      | \$\$\$                    | \$\$                      |

*Tabla 1.1 Comparación entre características de distintos moduladores.*

El VCSEL modulado directamente presentado en [29] logra una tasa de transmisión alta empleando modulación NRZ, pero su alcance no es muy bueno debido a que su potencia de salida es limitada. Tampoco presenta una razón de extinción alta, pero tiene la ventaja de que su costo es bastante reducido comparado con las demás configuraciones debido a que en este caso no se hace uso de un modulador, con lo que su tamaño sería el más reducido de todos.

El SOA empleado como modulador externo estudiado en [26] también se moduló con una señal NRZ y alcanzó una tasa de transmisión relativamente baja comparado con los demás dispositivos, pero logra una distancia de transmisión bastante alta gracias a la gran potencia de salida que se obtiene debido a la amplificación que proporciona el dispositivo, razón por la cual las pérdidas por inserción son negativas. Los SOA's son fáciles de integrar porque están fabricados con materiales semiconductores al igual que los láseres, además su costo es relativamente bajo y no requieren mucha potencia para operar.

El modulador Mach-Zehnder expuesto en [32] logra una tasa de transmisión muy alta gracias a que emplea un formato de modulación PAM-4, el sistema tiene un alcance muy elevado debido al uso de un amplificador de fibra dopada de Erblio (EDFA) en el lado del transmisor y dos en el lado del receptor, por lo que la potencia de salida del modulador no necesita ser alta. Presenta una razón de extinción bastante buena pero su integrabilidad no es tan alta porque suelen ser dispositivos de mayor tamaño y de diferentes materiales a los utilizados en los láseres, además de que son más costosos que los demás moduladores mostrados en la tabla.

El modulador de electro-absorción presentado en [33] alcanzó una tasa de transmisión muy alta utilizando tanto NRZ como PAM-4 pero la distancia de transmisión del sistema es corta comparada con los demás moduladores a pesar de que la potencia de salida no es tan baja. Proporciona una razón de extinción bastante alta y es sencillo de integrar porque se fabrica con materiales semiconductores, al igual que el SOA. Por esta misma razón su costo es bajo.

## **1.5 Problemática y justificación.**

El crecimiento exponencial en la demanda de servicios de banda ancha por parte de los usuarios, así como el aumento en el número de usuarios de las redes en todo el mundo, ha provocado que los proveedores de servicio incrementen la oferta de dichos servicios hasta llegar a tasas de transmisión de varios [Gb/s]. Este crecimiento se debe a servicios recientes como transmisión de video digital de alta definición, cómputo y aplicaciones en la nube, internet de las cosas y el uso masivo de redes sociales. Con el fin de resolver los problemas técnicos inherentes a estos requerimientos, es necesario investigar sistemas y dispositivos que puedan operar a tasas de información cada vez mayores.

Las PON representan una solución costeable y relativamente sencilla para proveer enlaces de fibra óptica de alta capacidad en las redes de área local con servicios de última milla como fibra a la casa o fibra al edificio (FTTx) y ya han sido desplegadas en muchos países alrededor del mundo, incluido México. Como se mencionó en el inciso 1.3, se están desarrollando nuevos estándares para que estas redes alcancen tasas de transmisión de hasta 100 [Gb/s]. La evolución de las redes PON será de gran importancia para nuevas aplicaciones como la conexión entre centros de datos y la red de transporte para la nueva generación de tecnologías de comunicación móvil 5G.

Un dispositivo fundamental en cualquier enlace óptico es el transmisor. Para el desarrollo de las nuevas redes PON será necesario un transmisor óptico que pueda operar a tasas de transmisión que superen los 10 [Gb/s], que transmita con una potencia óptica suficiente para cubrir enlaces de varios [Km] y que sea relativamente económico. Diversas opciones han sido propuestas por grupos de investigación alrededor del mundo para implementar estas redes. Tanto el VCSEL como el SOA empleado como modulador han sido probados en distintas investigaciones, pero a pesar de las ventajas que ofrecen en términos de alta potencia de transmisión, su velocidad de operación está limitada debido a la distorsión en fase y amplitud que estos dispositivos imprimen en la señal a ser transmitida. Por ende, se requiere ampliar las investigaciones realizadas con el fin de operar estos dispositivos como transmisores a tasas de bits más altas y sin perder los beneficios en términos de potencia que ofrecen. Una alternativa interesante para lograr esto es utilizar formatos avanzados de modulación que exhiban un ancho de banda angosto, tales como los formatos polibinarios o multinivel anteriormente mencionados. Estos formatos ofrecen la ventaja de mantener la transmisión en el plano de modulación en amplitud, evitando las complicaciones inherentes a la detección coherente. Aun así, son suficientemente poderosos y de ahí el interés de evaluarlos como alternativas para incrementar la tasa de transmisión de los moduladores mencionados, con posible aplicación en redes PON, donde el costo de los elementos que las conforman tiene un rol preponderante.

## **1.6 Objetivo del proyecto.**

El objetivo de este proyecto de investigación es analizar numéricamente el desempeño de dos tipos diferentes de transmisores ópticos: un láser de cavidad vertical y emisión superficial (VCSEL) modulado directamente y un transmisor basado en un amplificador óptico de semiconductor (SOA) empleado como modulador externo y probarlos con tres distintos formatos de modulación: NRZ, duobinario y PAM-4. Demostrar la viabilidad técnica de ambos transmisores utilizando dispositivos disponibles con el estado del arte comercial y realizar una comparación entre ellos en términos de sus figuras de mérito, enunciando sus ventajas y desventajas con el fin de definir el transmisor y formato de modulación más convenientes



para redes ópticas de corto alcance. Se espera que el uso de los formatos de modulación avanzados (duobinario y PAM-4) faciliten el incremento en la tasa de transmisión de estos subsistemas.

## Referencias capítulo 1:

- [1] R. Gutierrez-Castrejón, J. J. Madera y D. E. Ceballos, "Diseño y simulación de un transmisor óptico de alta potencia basado en modulación directa de un amplificador de semiconductor", IEEE Sección México, ROC&C, 2017.
- [2] Y. Frignac, G. Charlet y W. Idler, "Transmission of 256 wavelength-division and polarization-division multiplexed channels at 42.7 Gb/s over 3 x 100 km of TeraLight fiber", Proc. Optical Fiber Communication Conf. (OFC), 2002.
- [3] D. K. Mynbaev y L. L. Scheiner, "Fiber-Optic Communications Technology", Prentice Hall, 2001.
- [4] I. Fernández, "Estudio de sistemas ópticos WDM para su implantación en redes de alta velocidad", Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2010.
- [5] G. Keiser, "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 2010.
- [6] L. Peña, "Introducción a la mecánica cuántica", Fondo de Cultura Económica, 2014.
- [7] M. O'Mahony, "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems", Journal of lightwave technology, 1988.
- [8] J. J. Madera, "Análisis de un amplificador óptico de semiconductor como modulador óptico para un sistema de telecomunicaciones", Tesis, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2017.
- [9] J. Mork, M. L. Nielsen y T. W. Berg, "Semiconductor optical amplifiers", Optics and Photonics News, 2003.
- [10] A. Chavarría, "Estudio teórico del uso de un amplificador óptico de semiconductor como elemento de una compuerta lógica fotónica utilizando modulación cruzada de fase", Tesis, Facultad de Ciencias, UNAM, 2013.
- [11] J. T. Verdeyen, "Laser electronics", Prentice Hall, 1995.
- [12] P. Westbergh, "High speed vertical cavity surface emitting lasers for short reach communication", Thesis, Chalmers University of Technology, 2011.
- [13] P. Winzer y R. Essiambre, "Advanced Optical Modulation Formats", Proceedings of the IEEE, 2006.
- [14] Y. Wen, J. Mo, Y. Wang y C. Lu, "Advanced Data Modulation Techniques for WDM Transmission", IEEE Communications Magazine, 2006.
- [15] A. Bateman, "Comunicaciones digitales, diseño para el mundo real", Marcombo, 2003.
- [16] S. Bhoja, "Study of PAM modulation for 100GE over a single fiber", IEEE Next Gen 100G Optical Ethernet Study Group, 2012.

- [17] P. Kabal y S. Pasupathy, "Partial-response signaling", IEEE Transactions on Communications, 1975.
- [18] R. Howson, "An analysis of the capabilities of polibinary data transmission", IEEE Transactions on Communications Technology, 1965.
- [19] W. Way, "PAM-4: A key solution for next-generation short-haul optical fiber links", NeoPhotonics, 2015.
- [20] K. Szczerba, P. Westbergh y J. Karout, "4-PAM for high-speed short-range optical communication", Optical Communication Networks, 2012.
- [21] E. Harstead, D. Veen, V. Houtsma y P. Dom, "Technology roadmap for time division multiplexed pasive optical networks", Journal of Lightwave Technology, 2018.
- [22] D. Nettet, "PON Roadmap", Optical Society of America, 2017.
- [23] M. Sanchez, M. Urueña, A. Oliva, J. Hernández y C. Bernardos, "On providing mobility management in WOBANS: Integration with PMIPv6 and MIH", Communications Magazine, IEEE, 2013.
- [24] Y. Hsueh, W. Shaw y L. G. Kazovsky, "SUCCESS PON demonstrator: experimental exploration of next generation optical access networks", IEEE Optical Communications, 2005.
- [25] M. Presi y E. Ciaramella, "Mutual Seeding of Directly Modulated R-SOAs for Full-Duplex and Single-Wavelength Short Reaches", IEEE Photonics Technology Letters, 2018.
- [26] Z. Rizou y K. Zoiros, "Performance analysis and improvement of semiconductor optical amplifier direct modulation with assistance of microring resonator notch filter", Opt Quant Electron, Springer Science, 2017.
- [27] F. El-Nahal, "A WDM-PON with DPSK modulated downstream and OOK modulated upstream signals based on symmetric 10 Gbit/s wavelength reused bidirectional reflective SOA", Optoelectronics Letters, 2017.
- [28] L. Szilagyi, M. Khafaji, J. Pliva, R. Henker y F. Ellinger, "40-Gbit/s 850-nm VCSEL-Based Full-CMOS Optical Link With Power-Data Rate Adaptivity", IEEE Photonics Technology Letters, 2018.
- [29] L. Breyne, M. Verplaetse, C. Neumeyr y T. Keulenaer, "DSP-Free and Real-Time NRZ Transmission of 50 Gb/s Over 15-km SSMF and 64 Gb/s Back-to-Back With a 1.3- $\mu$ m VCSEL", Journal of Lightwave Technology, 2019.
- [30] L. Chorchos, "PAM-6 generation using 32-QAM constellation", Proceedings of SPIE, Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links, 2019.
- [31] G. Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems", Wiley-Interscience, 2002.
- [32] S. Yin, T. Chan y W. Way, "100-km DWDM Transmission of 56-Gb/s PAM4 per  $\lambda$  via Tunable Laser and 10-Gb/s InP MZM", IEEE Photonics Technology Letters, 2015.

- [33] R. Lin, X. Pang, O. Ozolins y Z. Feng, "Performance Evaluation of PAM and DMT for Short-range Optical Transmission with High Speed InGaAsP DFB-TWEAM", Optical Society of America, OFC, 2016.
- [34] V. Houtsma, D. Veen y E. Harstead, "Recent Progress on Standardization of Next-Generation 25, 50, and 100G EPON", Journal of Lightwave Technology, 2017.

## 2. Modelado del sistema de transmisión.

En el presente capítulo se dará una explicación de los modelos empleados para simular el comportamiento de cada uno de los elementos del sistema óptico propuesto.

Es importante mencionar que los modelos empleados en este proyecto, particularmente del SOA y el DML, no consideran varios de los fenómenos que afectan el funcionamiento de los dispositivos en la realidad debido a que son modelos dinámicos que no toman en cuenta las características espaciales de estos dispositivos, tampoco toman en cuenta el comportamiento de la polarización de la luz ni la variación del índice de refracción y por lo tanto la fase en función del tiempo. En el caso del ruido, se omite la dependencia de este con la temperatura de los dispositivos. Lo anterior se debe a que los modelos matemáticos representan aproximaciones del comportamiento de cada uno de los elementos del sistema y entre mayor cercanía se desee con la realidad, más complicado se vuelve el modelo. A pesar de esto, se considera que los modelos elegidos son lo suficientemente precisos para estudiar el funcionamiento de los sistemas analizados.

### 2.1 Modelo de SOA.

Para simular el comportamiento del SOA se usó un modelo matemático presentado en [1] por Agrawal y Olsson que calcula los cambios en la ganancia proporcionada por el dispositivo respecto al tiempo y considerándolo concentrado en un punto. Este modelo consiste en una ecuación diferencial con parámetros conocidos para los SOA's y se muestra a continuación.

$$\frac{dh(t)}{dt} = \frac{\Gamma a N_0 \left( \frac{I(t)}{I_0} - 1 \right) L - h(t)}{\tau_c} - \frac{P_{in}(t)}{P_{sat} \tau_c} (e^{h(t)} - 1) \quad (2.1)$$

Donde  $h(t)$  es la ganancia total integrada en función del tiempo  $t$ ,  $\Gamma$  es el factor de confinamiento,  $a$  es el diferencial de ganancia,  $N_0$  es la densidad de portadores necesaria para transparencia,  $I(t)$  es la corriente de bombeo o modulación en función del tiempo,  $I_0$  es la corriente requerida para transparencia,  $L$  es la longitud de la región activa del SOA,  $\tau_c$  es el tiempo de vida de los portadores,  $P_{in}(t)$  es la potencia óptica de entrada al SOA en función del tiempo y  $P_{sat}$  es la potencia de saturación del dispositivo.

Los valores de los parámetros del SOA que se utilizaron en las simulaciones son los siguientes [2]:

| Parámetro                                 | Símbolo   | Valor                 | Unidades |
|---|-----------|-----------------------|----------|
| Factor de confinamiento                   | $\Gamma$  | 0.25                  | -        |
| Diferencial de ganancia                   | $a$       | $3.3 \times 10^{-20}$ | $m^2$    |
| Densidad de portadores para transparencia | $N_0$     | $0.15 \times 10^{24}$ | $m^{-3}$ |
| Corriente requerida para transparencia    | $I_0$     | $75 \times 10^{-3}$   | A        |
| Longitud de la región activa              | $L$       | $2 \times 10^{-3}$    | m        |
| Tiempo de vida de los portadores          | $\tau_c$  | $312 \times 10^{-12}$ | s        |
| Potencia de saturación                    | $P_{sat}$ | $10 \times 10^{-3}$   | W        |

Tabla 2.1 Parámetros empleados para el modelo del amplificador óptico de semiconductor.

El factor de confinamiento  $\Gamma$  se refiere a la fracción de la onda óptica que se concentra en la región activa del amplificador. El diferencial de ganancia  $a$  también se conoce como ganancia de sección transversal y representa el cambio que hay en la ganancia del SOA al variar la densidad de portadores  $N$ . La densidad

de portadores para transparencia  $N_0$  representa la cantidad de portadores por metro cúbico que debe haber en la región activa para que la señal óptica de entrada sea igual a la de salida del SOA. Mediante la corriente de bombeo  $I(t)$  se modulará la señal óptica a la salida del SOA para que contenga la información que se desea transmitir.  $I_0$  es la corriente mínima necesaria para que la señal óptica de salida sea igual a la de entrada. Con estas variables se puede definir la ganancia en señal pequeña, que se refiere a la ganancia que presenta el amplificador cuando se inserta una señal óptica cuya potencia se encuentra muy abajo del punto de saturación. Este parámetro se calcula mediante:

$$g_0 = \Gamma a N_0 \left( \frac{I(t)}{I_0} - 1 \right) \quad (2.2)$$

Regresando a la ecuación 2.1, el tiempo de vida de los portadores  $\tau_c$  representa el tiempo promedio que tarda un portador de carga (electrón) en recombinarse, es decir, pasar de la banda de conducción a la de valencia.  $P_{in}(t)$  es la potencia de la señal óptica con que se alimentará el SOA, que en el presente trabajo se mantuvo constante.  $P_{sat}$  es la potencia óptica a partir de la cual la ganancia del SOA decae a la mitad de su valor para señal pequeña.

Se debe mencionar que, cuando se emplea el SOA solo como amplificador en un sistema óptico, es la corriente de bombeo  $I(t)$  la que permanece constante, mientras que la potencia de la señal óptica de entrada  $P_{in}(t)$  es la que lleva la información, por lo que varía. En el presente trabajo se usó el SOA como modulador, por lo que sucede lo contrario.

Para calcular el campo óptico a la salida del SOA a partir del valor de ganancia total obtenido en función del tiempo, se empleó la siguiente ecuación [1]:

$$E_{out}(t) = \sqrt{P_{in}} e^{\frac{1}{2}h(t)(1-j\alpha)} \quad (2.3)$$

Aquí  $\alpha$  es el factor de ensanchamiento de línea, tiene un valor de 10 [-] y se refiere a la relación entre el cambio en la parte real y la parte imaginaria del índice de refracción. Todos los demás parámetros de la ecuación 2.3 son conocidos y al multiplicar el campo óptico de salida por su complejo conjugado mediante la ecuación 2.4 se puede calcular la potencia óptica a la salida del SOA.

$$P_{out}(t) = E_{out}(t)E_{out}^*(t) \quad (2.4)$$

La ecuación 2.1 no tiene una solución analítica conocida, por lo que se empleó el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden para calcular la ganancia total del dispositivo para cada instante de tiempo. Los métodos numéricos Runge-Kutta consisten en calcular la solución de una o más ecuaciones diferenciales en un intervalo mediante la combinación de varias evaluaciones de la función, después se empata la información obtenida con una serie de Taylor de cierto orden para calcular la mejor solución. En el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden cada paso para resolver la ecuación diferencial se evalúa cuatro veces, primero se evalúa en el punto inicial del intervalo, después dos veces en puntos medios o medios pasos de prueba y, por último, una vez en un punto final de prueba del intervalo. De estas evaluaciones se calcula la solución final de la función al final del intervalo. Las ecuaciones para implementar el método Runge-Kutta de cuarto orden son bien conocidas y se presentan a continuación [3]:

$$k_1 = hf(x_n, y_n)$$

$$\begin{aligned}
 k_2 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \\
 k_3 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}\right) \\
 k_4 &= hf(x_n + h, y_n + k_3) \\
 y_{n+1} &= y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

Donde  $k$  son las evaluaciones que se hacen en cada punto del intervalo,  $h$  es el valor del paso o intervalo,  $f$  es la derivada o parte derecha de la ecuación diferencial 2.1,  $x$  es la variable independiente que en el caso de estudio es el tiempo y  $y$  la variable dependiente que en este caso es la ganancia total.

Para observar cómo trabaja el modelo del SOA elegido, se definió cierto valor de potencia óptica de entrada al dispositivo y haciendo uso del sistema de cómputo numérico conocido como MATLAB se generó una señal de corriente con un formato de modulación NRZ. Con estos valores de potencia y corriente se alimentó el modelo presentado y al resolverlo con el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden y usando las ecuaciones 2.3 y 2.4 se obtuvo la potencia óptica de salida del amplificador. En la figura 2.1, la primera gráfica muestra la corriente con que se bombeó el SOA en función del tiempo y la segunda gráfica muestra la potencia a la salida del dispositivo en función del tiempo también. Se puede observar claramente que se logra modular la señal óptica continua con que se alimenta el SOA y se obtiene una señal óptica NRZ. También se nota que el amplificador tarda en reaccionar a la corriente de modulación, razón por la cual los pulsos ópticos se ven deformados.

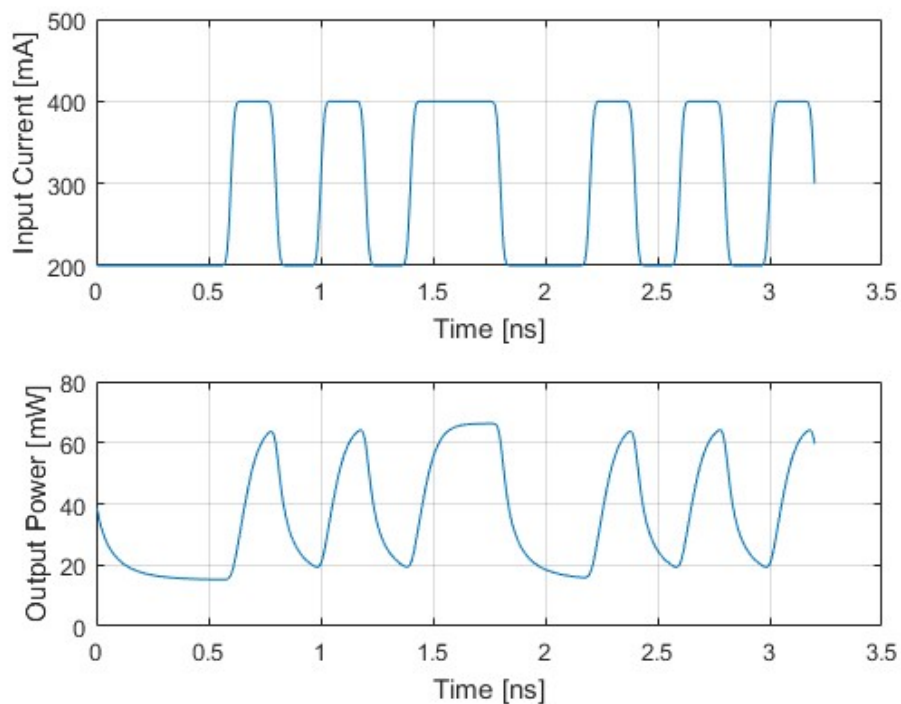


Figura 2.1 Corriente de bombeo (arriba) y potencia óptica de salida (abajo) del SOA.

Una vez obtenida la señal óptica de salida del SOA se decidió agregarle ruido blanco gaussiano (WGN) con ayuda de sistema de cómputo para hacerla más realista y así alcanzar cierta razón de señal a ruido óptico (OSNR) a la salida del transmisor. En el inciso 2.6 se incluye una breve explicación de lo que es la OSNR y cómo se calcula. A continuación, se muestran los espectros de frecuencia de la señal óptica NRZ con una tasa de transmisión de 5 [Gb/s] a la salida del SOA con y sin ruido. Se puede observar que el ruido afecta a todas las frecuencias, tanto las que ocupa la señal óptica como las que no. Este comportamiento era el esperado ya que se trata de un ruido blanco. Asimismo, la OSNR de la señal se ve reducida, de acuerdo a la cantidad de ruido que se adicione.

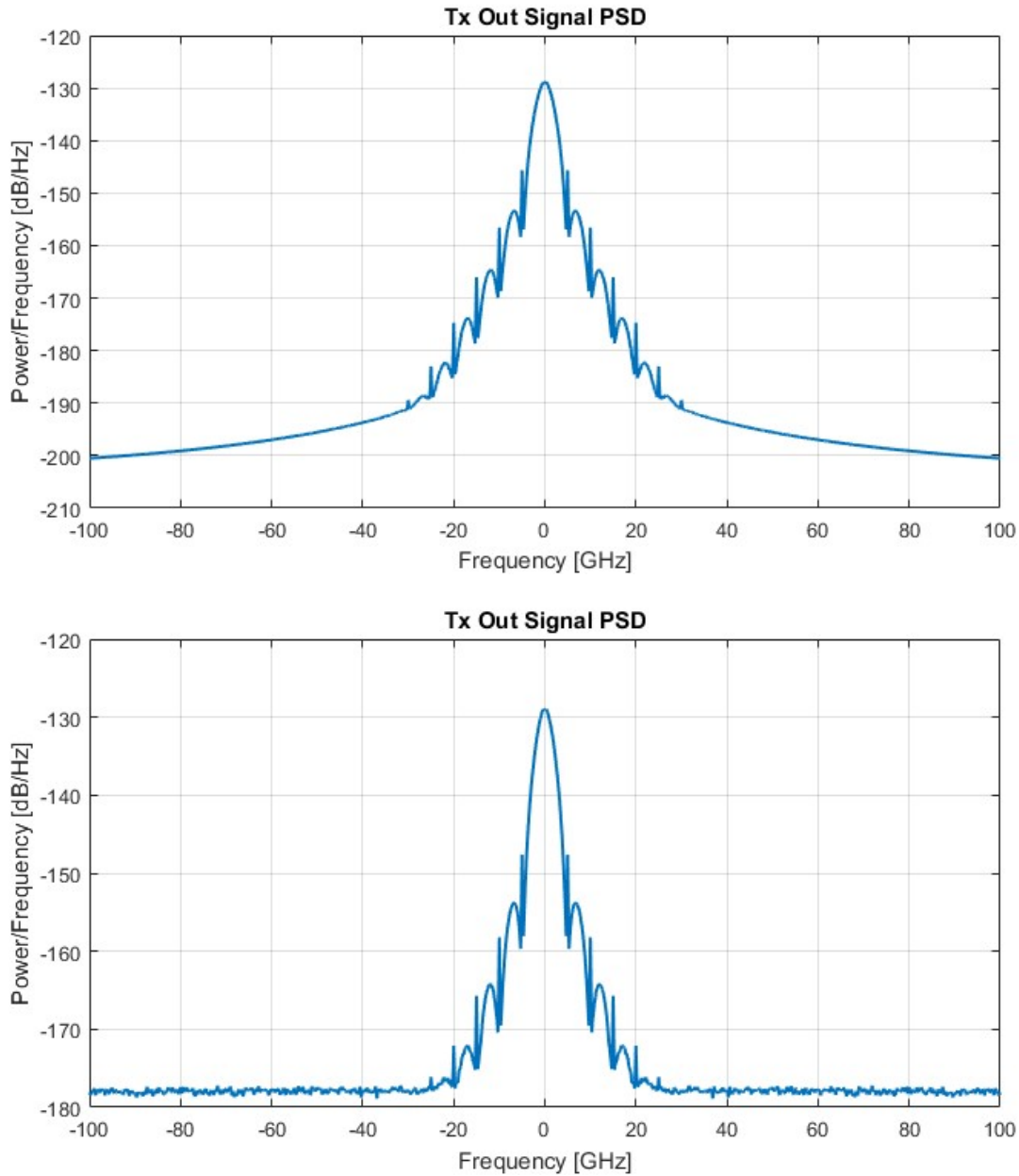


Figura 2.2 Espectros de frecuencia de la señal óptica a la salida del SOA sin ruido (arriba) y con ruido (abajo).



## 2.2 Modelo de DML.

Para simular el comportamiento del DML como transmisor del sistema óptico propuesto, se emplearon dos ecuaciones diferenciales acopladas que modelan las variaciones que hay en la densidad de portadores (electrones) y de fotones respecto al tiempo. Las ecuaciones son las siguientes [4]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I(t)}{qV} - \left( \frac{N}{\tau_c} + BN^2 + CN^3 \right) - \frac{g_0(N - N_T)S}{1 + \epsilon S} \quad (2.6)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma\beta BN^2 - \frac{S}{\tau_p} + \frac{\Gamma g_0(N - N_T)S}{1 + \epsilon S} \quad (2.7)$$

Donde  $N$  es la densidad de portadores de carga y está en función del tiempo  $t$  aunque no se use la notación  $N(t)$  por practicidad,  $S$  es la densidad de fotones también en función del tiempo,  $I(t)$  es la corriente de bombeo con que se alimenta el DML,  $q$  es la carga elemental,  $V$  es el volumen de la región activa,  $\tau_c$  es el tiempo de vida de los portadores,  $\tau_p$  es el tiempo de vida de los fotones,  $B$  es el coeficiente de emisión espontánea,  $C$  es el coeficiente de recombinación de Auger,  $g_0$  es el diferencial de ganancia,  $N_T$  es la densidad de portadores necesaria para transparencia,  $\epsilon$  es el factor de compresión de ganancia,  $\Gamma$  es el factor de confinamiento y  $\beta$  es la fracción de fotones generados por emisión espontánea a la salida del DML.

Los valores de los parámetros que se emplearon en las simulaciones del DML se muestran en la tabla siguiente [5]:

| Parámetro  | Símbolo    | Valor                   | Unidades      |
|--|------------|-------------------------|---------------|
| Carga elemental                                      | $q$        | $1.602 \times 10^{-19}$ | C             |
| Volumen de la región activa                          | $V$        | $3.01 \times 10^{-19}$  | $m^3$         |
| Tiempo de vida de los portadores                     | $\tau_c$   | $100 \times 10^{-9}$    | s             |
| Tiempo de vida de los fotones                        | $\tau_p$   | $2.2 \times 10^{-12}$   | s             |
| Coeficiente de emisión espontánea                    | $B$        | $2 \times 10^{-16}$     | $1/(s \ m^3)$ |
| Coeficiente de recombinación de Auger                | $C$        | $1 \times 10^{-42}$     | $1/(s \ m^6)$ |
| Diferencial de ganancia                              | $g_0$      | $2 \times 10^{-12}$     | $m^3/s$       |
| Densidad de portadores para transparencia            | $N_T$      | $2 \times 10^{24}$      | $1/m^3$       |
| Factor de compresión de ganancia                     | $\epsilon$ | $0.442 \times 10^{-23}$ | $m^3$         |
| Factor de confinamiento                              | $\Gamma$   | 0.03                    | -             |
| Fracción de fotones generados por emisión espontánea | $\beta$    | $1 \times 10^{-4}$      | -             |

Tabla 2.2 Parámetros empleados para el modelo del láser modulado directamente.

La mayoría de los parámetros empleados en las ecuaciones 2.6 y 2.7 se explicaron brevemente en el inciso anterior. Se debe agregar que el coeficiente de emisión espontánea  $B$  se refiere a la fracción de electrones que pasan de la banda de conducción a la de valencia generando fotones que no son coherentes con los fotones generados por emisión estimulada. El coeficiente de recombinación de Auger representa la fracción de pares electrón-hueco que se recombinan y donan su energía a otro electrón o hueco en forma de energía cinética.

El último término de las ecuaciones 2.6 y 2.7 contiene la expresión de ganancia  $G$  que se empleó en el modelo y es la siguiente:

$$G = \frac{g_0(N - N_T)}{1 + \epsilon S} \quad (2.8)$$

Una vez que se calcula la densidad de fotones respecto al tiempo, se puede calcular la potencia de la señal óptica de salida del DML respecto al tiempo con la siguiente ecuación.

$$P_{out}(t) = S(t) \frac{V\eta h\nu_0}{2\Gamma\tau_p} \quad (2.9)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia cuántica interna del dispositivo y tiene un valor de 0.6 [-],  $h$  es la constante de Planck y  $\nu_0$  es la frecuencia central de la señal óptica de salida del DML.

Al igual que en el caso del SOA, para las ecuaciones 2.6 y 2.7 tampoco existen soluciones analíticas, por lo que se empleó el mismo método numérico Runge-Kutta de cuarto orden para calcular la densidad de portadores de carga y de fotones en cada instante de tiempo. La diferencia es que en este caso se tienen dos ecuaciones diferenciales acopladas, razón por la cual se deben utilizar dos conjuntos de ecuaciones para implementar el método numérico Runge-Kutta de cuarto orden, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} k_1 &= hf(x_n, y_n, z_n) \\ l_1 &= hg(x_n, y_n, z_n) \\ k_2 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}, z_n + \frac{l_1}{2}\right) \\ l_2 &= hg\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}, z_n + \frac{l_1}{2}\right) \\ k_3 &= hf\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}, z_n + \frac{l_2}{2}\right) \\ l_3 &= hg\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{k_2}{2}, z_n + \frac{l_2}{2}\right) \\ k_4 &= hf(x_n + h, y_n + k_3, z_n + l_3) \\ l_4 &= hg(x_n + h, y_n + k_3, z_n + l_3) \\ y_{n+1} &= y_n + \frac{k_1}{6} + \frac{k_2}{3} + \frac{k_3}{3} + \frac{k_4}{6} \\ z_{n+1} &= z_n + \frac{l_1}{6} + \frac{l_2}{3} + \frac{l_3}{3} + \frac{l_4}{6} \end{aligned} \quad (2.10)$$

De la misma forma que en el inciso anterior y para este caso de estudio  $k$  y  $l$  son las evaluaciones de las funciones que se hacen en cada punto del intervalo,  $h$  es el tamaño del intervalo o paso,  $f$  es la derivada o parte derecha de la ecuación diferencial 2.6,  $g$  es la derivada o parte derecha de la ecuación 2.7,  $x$  es la variable independiente, es decir, el tiempo, mientras que  $y$  y  $z$  son las variables dependientes, que en este caso son la densidad de portadores de carga y la densidad de fotones, respectivamente.

También como en el caso del SOA, se resolvió el modelo matemático del DML elegido haciendo uso del método numérico explicado. Se alimentó el dispositivo con una corriente de bombeo modulada en formato NRZ como se muestra en la primera gráfica de la figura 2.3 y se obtuvo la potencia óptica de salida que se muestra en la segunda gráfica. Se puede observar que también se logra modular la señal óptica a pesar de que presenta ‘overshooting’, que es cuando la señal excede o queda por debajo del nivel objetivo debido a la respuesta transitoria del dispositivo, aunque después alcanza su estado estable.

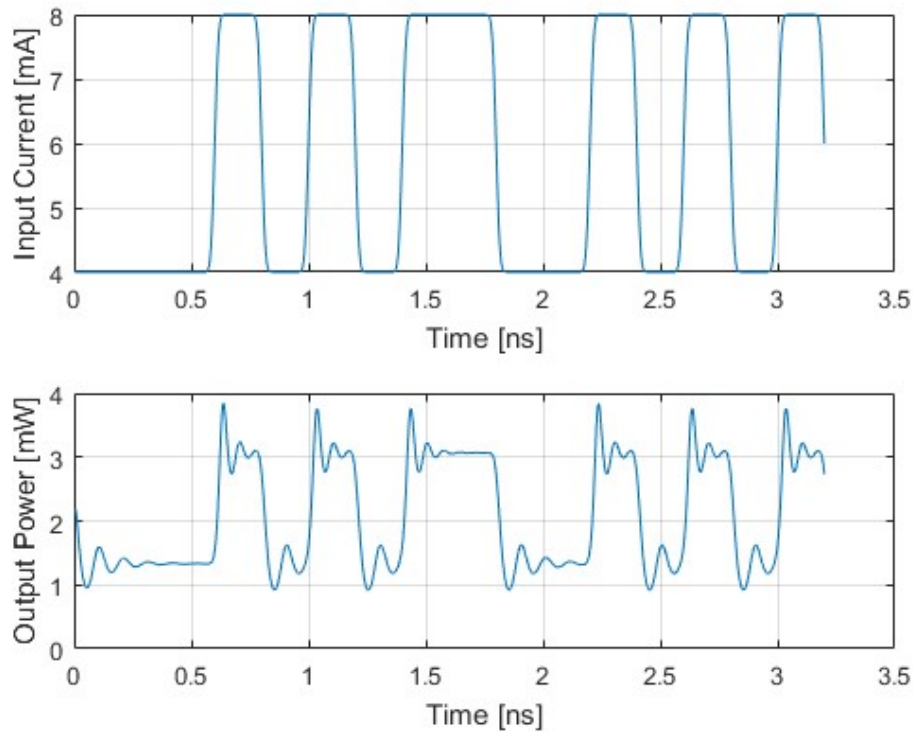


Figura 2.3 Corriente de bombeo (arriba) y potencia óptica de salida (abajo) del DML.

Al agregar ruido a la señal óptica de salida del DML se decidió hacerlo de manera distinta que en el caso del SOA, en este caso se decidió agregar ruido de intensidad relativa (RIN). Si se asume que el ruido en la señal tiene una distribución de probabilidad Gaussiana en torno a la potencia promedio del nivel de la misma señal, entonces el RIN se define como la relación entre la media cuadrática de la distribución Gaussiana del ruido respecto al tiempo  $\langle \delta P(t)^2 \rangle$  entre el cuadrado del promedio de potencia de la señal  $P_0^2$ , como se muestra en la ecuación 2.11.

$$RIN = \frac{\langle \delta P(t)^2 \rangle}{P_0^2} \quad (2.11)$$

Para simular este tipo de ruido se agregaron nuevos términos a las ecuaciones 2.6 y 2.7 conocidos como fuentes de ruido de Langevin y definidos como  $F_N(t)$  y  $F_S(t)$  y se sumaron a la densidad de portadores y de fotones, respectivamente. Estos términos se simularon como procesos aleatorios Gaussianos con media igual a 0 y cierta varianza que se obtuvo a través de las siguientes ecuaciones [6].

$$\langle F_S F_S \rangle = 2\Gamma R'_{sp} S_0$$

$$\begin{aligned}\langle F_N F_N \rangle &= \frac{2R'_{sp} S_0}{\Gamma} - \frac{G S_0}{V} + \frac{\eta_i (I + I_{th})}{q V^2} \\ \langle F_S F_N \rangle &= -2R'_{sp} S_0 + \frac{G S_0}{V_p}\end{aligned}\quad (2.12)$$

Donde  $\langle F_i F_j \rangle$  son las densidades espectrales de ruido de Langevin,  $R'_{sp}$  es la tasa de emisión espontánea y cumple con  $R'_{sp} = \beta B N_0^2$ ;  $N_0$  y  $S_0$  son las densidades promedio de portadores y fotones, respectivamente;  $\eta_i$  es la eficiencia de inyección del material y tiene un valor de 0.6 [-],  $I_{th}$  es la corriente de umbral con un valor de 1 [mA] y  $V_p$  es el volumen de la región activa completa y cumple con  $V_p = V/\Gamma$ . Los demás parámetros son conocidos y ya han sido explicados.

Se calcularon los valores para las densidades espectrales de ruido de Langevin, que también se pueden interpretar como las fuerzas de correlación del ruido, y con ellas se creó la matriz 2.13. Con ayuda del sistema de cómputo se hizo una factorización de Cholesky de la matriz calculada y así se obtuvieron los valores de varianza para los términos de ruido agregados [6].

$$\begin{bmatrix} \langle F_N F_N \rangle & \langle F_S F_N \rangle \\ \langle F_S F_N \rangle & \langle F_S F_S \rangle \end{bmatrix}\quad (2.13)$$

## 2.3 Modelo de Sistema Base-NRZ.

Para estudiar el comportamiento de los transmisores propuestos, se comenzó por crear una señal eléctrica con la cual se alimentó a los mismos. En ambos casos, esta señal eléctrica corresponde a la corriente de bombeo que se utilizó en los modelos presentados. Para crear cualquier señal por medio de MATLAB se debe generar un vector cuyos valores corresponden a las muestras de la misma señal. Para generar una señal NRZ primero se debe crear una señal digital que es básicamente una secuencia de bits de cierta longitud, esto se hizo mediante un generador de secuencias de bits pseudo-aleatorio (PRBS Generator) incluido en MATLAB. Después se asigna un número definido de muestras a cada bit de información, al repetir cada bit por el número de muestras que se definió, se obtiene la señal NRZ a la cual después se puede modificar su amplitud y su nivel. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de ojo de la señal NRZ generada mediante MATLAB que se empleó como corriente de bombeo para el SOA. Se puede notar que la amplitud y nivel se modificaron para que la señal oscilara entre 200 y 400 [mA], la tasa de bits de esta señal es de 5 [Gb/s] y la potencia óptica de entrada al SOA que se usó es de 0 [dBm]; también se modificó el tiempo de subida y de bajada de la señal para que estuviera más apegado a la realidad.

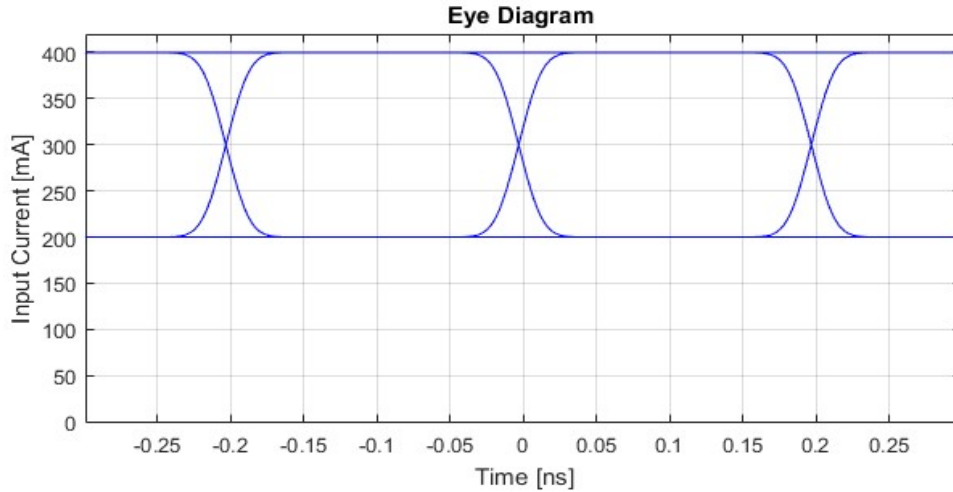


Figura 2.4 Diagrama de ojo de la señal NRZ empleada como corriente de bombeo para el SOA.

Mientras más muestras haya por cada bit de información, la señal generada tendrá mayor nitidez o resolución temporal y al pasar por el sistema simulado entregará resultados más certeros; por otro lado, el equipo computacional empleado tendrá que procesar más información, lo que requerirá más tiempo de cómputo. También se debe de mencionar que, para que los métodos numéricos utilizados funcionen correctamente, es necesario que la señal que se va a estudiar sea bastante nítida, es decir, que tenga un buen número de muestras por bit. Por los motivos anteriores, se definieron 64 muestras por cada bit para realizar las simulaciones de los sistemas propuestos.

Una vez que se tiene la señal NRZ con que se va a bombear el SOA o DML y los modelos correspondientes solucionados mediante el método numérico explicado, se puede alimentar el transmisor elegido con la señal modulada para estudiar su comportamiento. Se comenzó por hacer pruebas en configuración back-to-back, es decir, con el transmisor unido al receptor sin fibra óptica de por medio para después agregar fibra y analizar el desempeño del sistema para ciertas longitudes de ésta. En la figura 2.5 se muestra el diagrama de ojo de la potencia óptica obtenida al modular el SOA con la señal de corriente NRZ mostrada en la figura anterior.

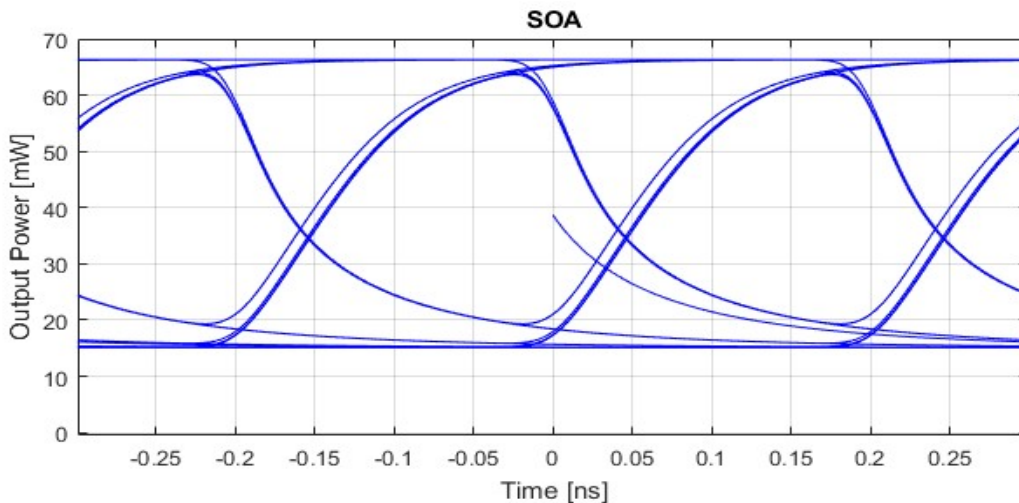


Figura 2.5 Diagrama de ojo de la señal de potencia de salida del SOA.

El modelo de fibra óptica empleado es ampliamente conocido [7], se usaron los parámetros de una fibra óptica monomodo SMF-28 trabajando en banda C y sólo se consideró la parte dispersiva del modelo debido a que la potencia de entrada a la fibra es lo suficientemente baja, además de que sólo se usa una longitud de onda, por lo que se pueden descartar los efectos no-lineales [8]. Para simular el comportamiento de un receptor óptico se empleó un modelo sencillo que convierte la señal óptica en una eléctrica como haría un fotodiodo [9], para esto simplemente se toma el campo óptico de entrada al receptor y se multiplica por su complejo conjugado para obtener la potencia de la señal y después multiplicarla por la responsividad del fotodiodo, que representa la capacidad del dispositivo para convertir la potencia óptica a la entrada en corriente eléctrica a la salida. Esto se muestra en la siguiente ecuación.

$$i_{out}(t) = R \cdot E_{in}(t)E_{in}^*(t) \quad (2.14)$$

Donde  $i_{out}(t)$  es la corriente que sale del fotodiodo,  $R$  es la responsividad con un valor de 0.9 [A/W] y  $E_{in}(t)$  es el campo óptico de entrada al dispositivo.

Después se agregó ruido en ambos transmisores como se explica en los incisos 2.1 y 2.2 y por último se agregó ruido térmico en el receptor, no se agregó ruido de disparo debido a que el ruido térmico se asumió preponderante [10]. Cada uno de los pasos se realizó para aproximar lo más posible el sistema óptico simulado a uno real. En la figura 2.6 se muestra la señal de corriente NRZ que sale del fotodiodo en el sistema con ruido y sin fibra óptica, al alimentarlo con la señal de corriente mostrada en la figura 2.4 y la potencia óptica de entrada elegida.

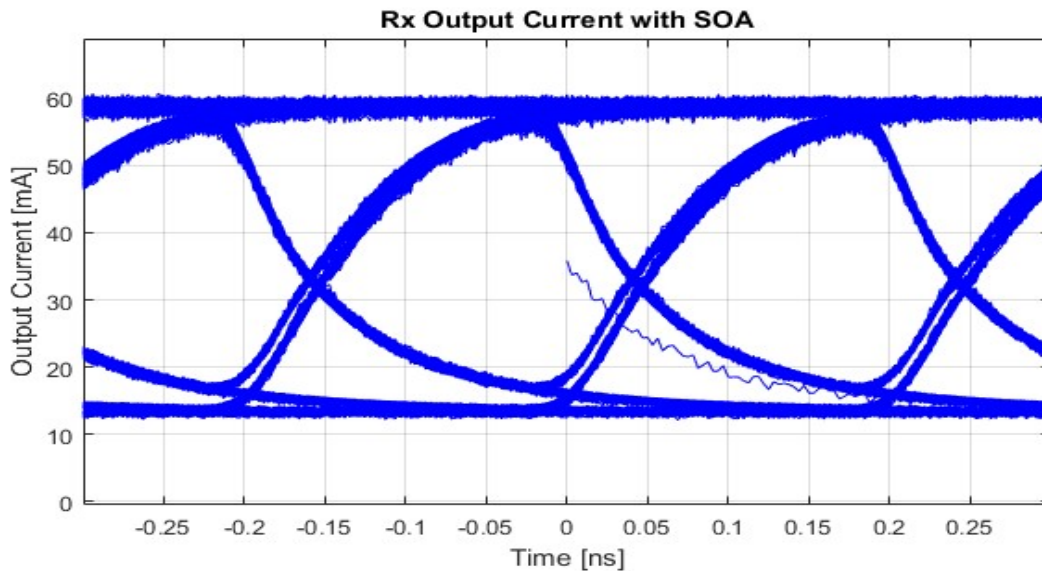


Figura 2.6 Diagrama de ojo de la señal de corriente de salida del fotodiodo.

A continuación, se presenta un diagrama del sistema base-NRZ completo. La señal que entrega el generador PRBS es simplemente una secuencia de bits, por lo que se define como digital. Por otro lado, la señal que sale del modulador NRZ corresponde a una señal física que varía en el tiempo y que se tomó como corriente de bombeo, por lo que se define como eléctrica. Por último, la señal que sale del SOA o DML corresponde a una señal óptica que también varía en el tiempo. Los resultados más relevantes de todas las simulaciones que se llevaron a cabo se muestran en el siguiente capítulo.

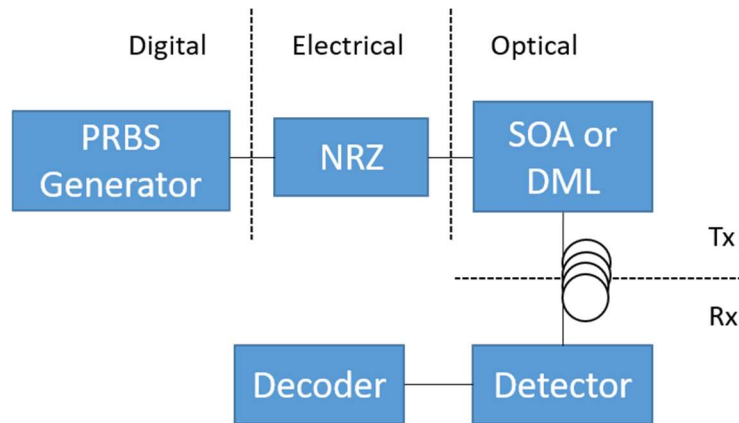


Figura 2.7 Diagrama de bloques del sistema base-NRZ completo.

## 2.4 Modelo de Sistema Duobinario.

Como se mencionó en el capítulo 1, las señales polibinarias tienen mayor resistencia a los efectos de la dispersión cromática y mayor eficiencia espectral que un formato de modulación simple como NRZ. Existen diferentes formas de generar una señal duobinaria, en el presente trabajo se generó mediante la adición de un precodificador para la señal digital y un filtro paso-bajas Bessel de quinto orden para la señal eléctrica. La configuración de la simulación del sistema se muestra en la figura 2.8, los bloques verdes fueron los que se agregaron para generar la señal duobinaria, mientras que los azules fueron los que se emplearon para generar la señal NRZ:

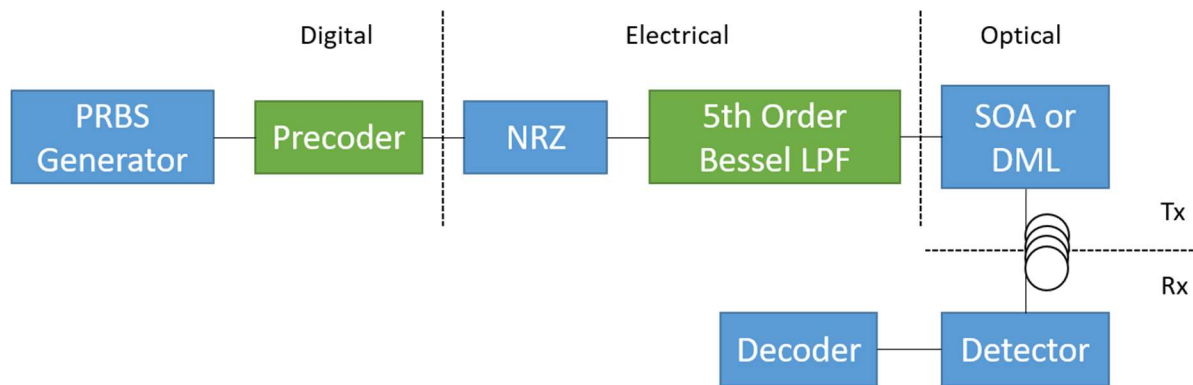


Figura 2.8 Diagrama de bloques del sistema duobinario completo.

En la figura 2.9 primero se muestra el diagrama de ojo de la señal duobinaria de corriente generada como se explicó en el párrafo anterior. De nuevo, dicha señal se generó con una tasa de transmisión de 5 [Gb/s] y una potencia de entrada al SOA de 0 [dBm]. Con ella se moduló el SOA y se transmitió al receptor para obtener la señal de corriente que sale del fotodiodo en configuración back-to-back y que se muestra en el segundo diagrama de ojo de la figura. En ambos casos se pueden observar los tres niveles de la señal duobinaria y el desfase que hay entre la señal de entrada y la de salida debido a su paso por el sistema.

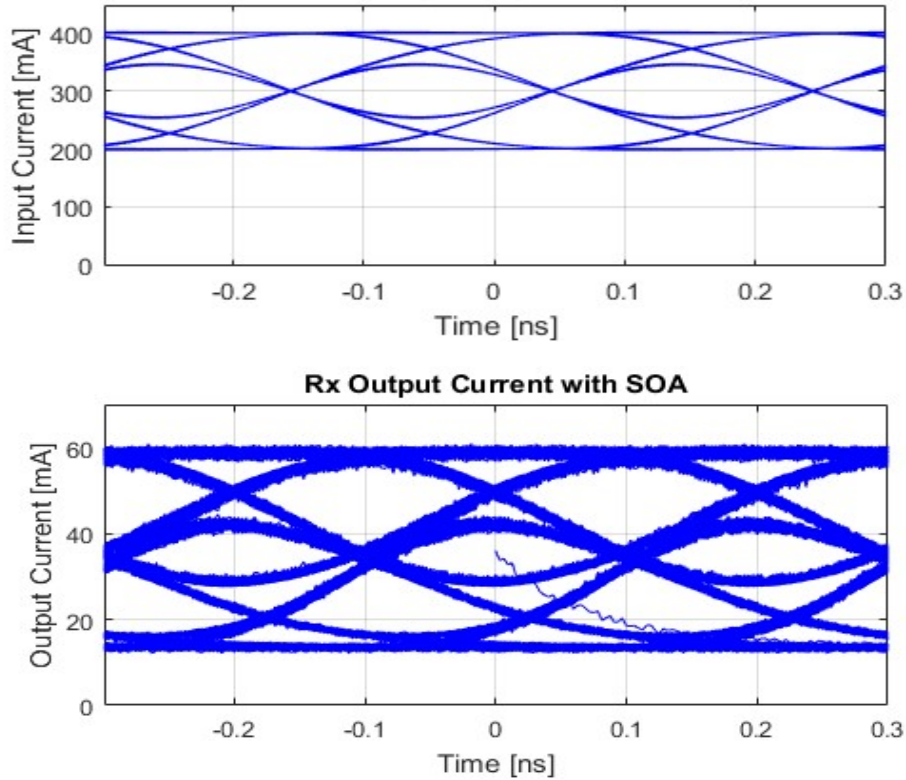


Figura 2.9 Diagramas de ojo de la señal duobinaria empleada como corriente de bombeo al SOA (arriba) y de la corriente de salida del fotodiodo (abajo).

## 2.5 Modelo de Sistema PAM-4.

Para producir una señal PAM-4 primero se debe de codificar la secuencia original de bits de forma que dos bits consecutivos generen un solo símbolo de la nueva señal. La forma más sencilla de realizar esto es tomando los valores decimales de cada par de bits y asignarles un símbolo de la señal PAM-4, de esta forma cuando se tiene un par de bits 00 se asigna al símbolo 0 de la señal PAM-4, si se tiene un par 01 se asigna al símbolo 1, 10 se asigna al símbolo 2 y 11 al símbolo 3.

Una vez que se tiene la secuencia de símbolos PAM-4, simplemente se produce una señal de cuatro niveles repitiendo un número definido de muestras cada símbolo de la secuencia. Con esa señal se alimenta al transmisor y la señal óptica PAM-4 producida se envía por la fibra óptica o directamente al receptor en el caso back-to-back. Para poder recuperar la secuencia original de bits enviada, se debe utilizar un decodificador PAM-4 después del detector, que realiza la operación contraria al codificador, es decir, asigna dos bits a cada símbolo de la señal PAM-4 detectada. A continuación, se presenta un diagrama del sistema PAM-4 completo.



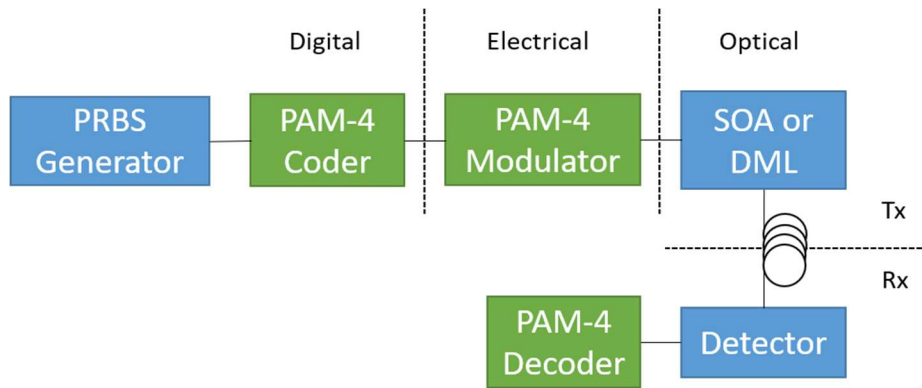


Figura 2.10 Diagrama de bloques del sistema PAM-4 completo.

El primer diagrama de ojo que se muestra en la figura 2.11 corresponde a la señal de corriente PAM-4 con que se alimentó el SOA, éste a su vez produjo una señal PAM-4 óptica que se transmitió directamente al receptor. El segundo diagrama corresponde a la corriente de salida del fotodiodo. Se pueden observar los cuatro niveles de la señal PAM-4 y cómo la distancia entre ellos es más pequeña que en los casos NRZ y duobinario.

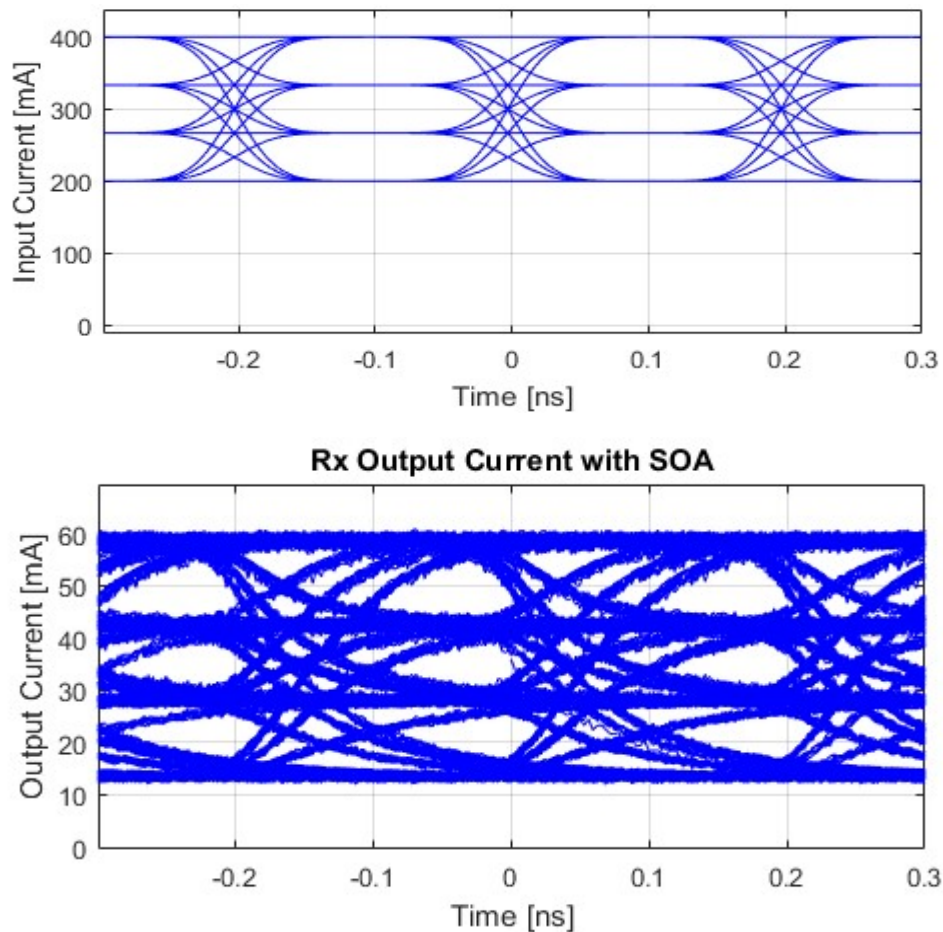


Figura 2.11 Diagramas de ojo de la señal PAM-4 empleada como corriente de bombeo al SOA (arriba) y de la corriente de salida del fotodiodo (abajo).

## 2.6 Parámetros de desempeño.

Para medir el desempeño de un sistema óptico de comunicaciones existen varios parámetros basados en ciertas características del enlace óptico, llamados también figuras de mérito, los cuales serán brevemente explicados a continuación.

La relación de bits erróneos (o tasa de bits erróneos, BER) se puede definir como la relación que tiene el número de bits erróneos recibidos con el número total de bits transmitidos. Esta relación se muestra en la ecuación 2.15.

$$BER = \frac{E}{n} \quad (2.15)$$

$$n = TR \quad (2.16)$$

Donde  $E$  es el número de bits erróneos,  $n$  es el número de bits transmitidos,  $T$  es el tiempo en que se transmiten  $n$  bits y  $R$  es la tasa de transmisión. El cálculo de BER es el parámetro comúnmente aceptado en academia e industria para evaluar un nuevo sistema de telecomunicaciones. Por ejemplo, en el caso del estándar 400 Gigabit Ethernet (GbE) la BER requerida es de  $10^{-13}$ , lo que significa que sólo un bit erróneo puede ser recibido entre  $10^{13}$  bits transmitidos. Mediante el uso de técnicas de corrección de errores hacia adelante (FEC) se pueden reducir las exigencias del sistema en términos de BER, dependiendo del tipo de FEC utilizado se pueden obtener BER's de  $10^{-13}$  con señales que presentan BER's de hasta  $10^{-2}$ , esto permite tener señales mucho más distorsionadas en el receptor, lo que significa que se puede aumentar la longitud del enlace óptico, así como la tasa de transmisión respecto a un enlace sin FEC [11]. Estas técnicas de corrección de errores son usadas en la actualidad para estándares como 400 GbE y Gigabit Passive Optical Networks (GPON). Gracias a la ganancia que estas técnicas proporcionan, las exigencias en términos de BER antes de aplicarlas se reducen, ya que permiten convertir una BER de, por ejemplo,  $3.8 \times 10^{-3}$  en una BER de  $1 \times 10^{-12}$ .

Experimentalmente, una forma confiable en que se puede estimar la BER de un sistema es medir el tiempo  $T$  en que se detectan 100 bits erróneos  $E$ , una vez que se conocen estas variables además de la tasa de transmisión  $R$ , se puede calcular  $n$  empleando la ecuación 2.16 y la BER mediante la ecuación 2.15 [12].

El factor de calidad  $Q$  es un parámetro que puede ser utilizado como una alternativa estadística al cálculo de BER y se define como la relación de la diferencia de las corrientes promedio en los fotodiodos entre un estado de bit uno y un estado de bit cero, con la suma de las desviaciones estándar de las corrientes de ruido para ambos estados. En el modelo se asume que las distribuciones correspondientes son Gaussianas [9]. Lo anterior se muestra en la ecuación 2.17 y en la figura 2.12.

$$Q = \frac{|I_1 - I_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{|V_1 - V_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (2.17)$$

Donde  $Q$  es el factor de calidad,  $I_1$  es la corriente promedio en el fotodiodo para el estado de bit uno,  $I_0$  es la corriente promedio en el fotodiodo para el estado de bit cero,  $\sigma_1$  es la desviación estándar para la corriente de ruido en el fotodiodo para el estado de bit uno,  $\sigma_0$  es la desviación estándar para la corriente de ruido en el fotodiodo para el estado de bit cero,  $V_1$  es el voltaje promedio en la resistencia de carga del fotodiodo para el estado de bit uno y  $V_0$  es el voltaje promedio en la resistencia de carga del fotodiodo para el estado de bit cero. La corriente en el fotodiodo fluctúa entre bits iguales alrededor de una corriente promedio ( $I_1$  para los bits uno e  $I_0$  para los bits cero), lo que puede modelarse como una función de

distribución de probabilidad ( $p_r$ ) para ambos niveles de bit donde cada uno tiene su tasa ( $P$ , promedio) y su desviación estándar. En la figura 2.12 se muestra la señal eléctrica entregada por el fotodiodo al circuito de decisión que compara el nivel de la señal con un nivel umbral ( $I_{th}$ ). Si el nivel de la señal del bit recibido es mayor al del umbral entonces el circuito identifica el bit como un uno, en caso contrario lo identifica como un cero [12].

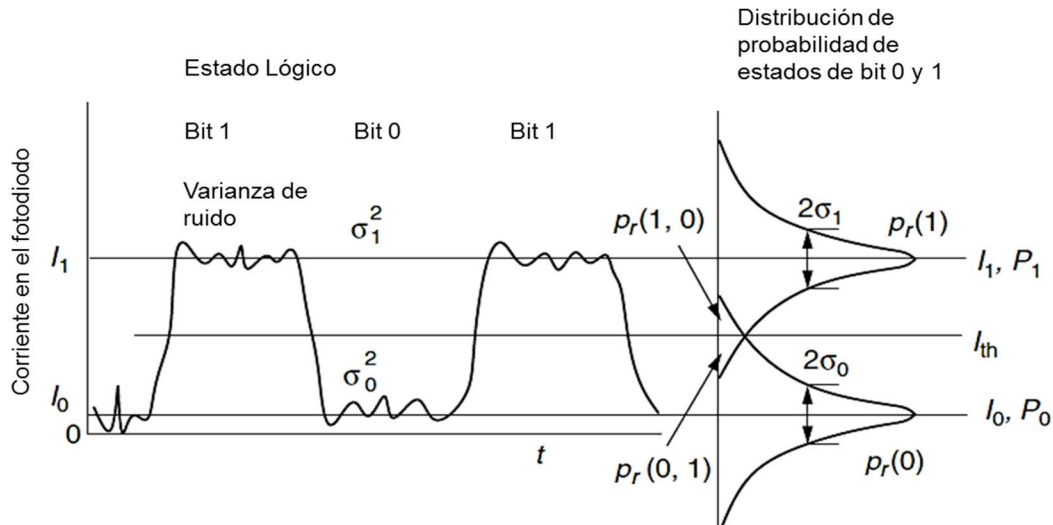


Figura 2.12 Corriente eléctrica en el fotodiodo con ruido y cálculo de factor Q.

La relación entre el factor Q y la BER se muestra en la ecuación 2.18, la cual es una aproximación para un circuito receptor optimizado.

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \quad (2.18)$$

Donde  $\operatorname{erfc}$  es la función de error complementario [9]. Otra aproximación en el cálculo de BER para cuando Q es mayor que 3 se muestra en la ecuación 2.19.

$$BER \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{Q^2}{2} \right) \quad (2.19)$$

Donde  $\exp$  es la función exponencial. La obtención de las ecuaciones presentadas es bien conocida y por tanto queda fuera de los alcances de esta tesis, por lo que se invita al lector a consultar las referencias [12] [9].

Otra figura de mérito para caracterizar el desempeño de un sistema de comunicación óptico es la relación de extinción ( $ER$ ). Ésta es una medida de la modulación digital en la señal portadora y se define como la potencia óptica promedio de un nivel de bit uno ( $P_1$ ) dividida entre la potencia óptica promedio de un bit cero ( $P_0$ ), por lo que el resultado es siempre mayor a uno. Si la relación de extinción disminuye entonces la diferencia entre la potencia óptica promedio entre los dos niveles de bit también disminuye, esto resulta en la degradación de la sensibilidad y aumenta la probabilidad de que el circuito receptor se equivoque al identificar los bits recibidos, por lo que la BER aumenta [13]. La relación de extinción puede obtenerse mediante la ecuación 2.20.

$$ER = \frac{P_1}{P_0} \quad (2.20)$$

La relación de extinción es comúnmente expresada como un valor positivo en [dB], para obtener este valor se puede emplear la ecuación 2.21.

$$ER_{dB} = 10 \log(ER) \quad (2.21)$$

La relación señal a ruido óptico (OSNR) es otro parámetro importante para medir el desempeño de un sistema. Se define como la relación entre la potencia de la señal y la potencia del ruido en cierto ancho de banda espectral y puede ser calculado en cualquier punto del enlace óptico [13]. La potencia de ruido se puede definir como la potencia de cualquier señal no-deseada que interfiere con la transmisión. Si la potencia de ruido aumenta, el receptor óptico tendrá mayor dificultad al interpretar los bits de información, por lo que puede incurrir en errores, aumentando la BER. Todos los receptores ópticos pueden soportar cierto nivel de ruido si éste se encuentra por debajo de la señal óptica. La OSNR puede definirse también como la relación logarítmica entre la potencia promedio de la señal y la potencia promedio del ruido. Esto se muestra en la ecuación 2.22.

$$OSNR = 10 \log\left(\frac{P_{sig}}{P_{noise}}\right) \quad (2.22)$$

Donde  $P_{sig}$  es la potencia de la señal deseada y  $P_{noise}$  es la potencia del ruido en el ancho de banda determinado. Para medir la OSNR se puede emplear un analizador de espectro óptico (OSA), en el cual se especifica el ancho de banda espectral en el que se encuentra la señal y el dispositivo mide el promedio de la potencia óptica de la señal en el ancho de banda especificado. Después mide la potencia del ruido a ambos lados de la señal y realiza una interpolación para determinar la potencia de ruido existente en la longitud de onda en que se encuentra la señal [12]. Una vez que se tienen esos datos, el OSA calcula la OSNR mediante la ecuación 2.22.

## Referencias capítulo 2:

- [1] G. P. Agrawal y N. A. Olsson, "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25(11), 2297-2306, 1989.
- [2] T. Engel, Z. V. Rizou, K. E. Zoiros y P. Morel, "Semiconductor optical amplifier direct modulation with double-stage birefringent fiber loop", *Applied Physics B*, 122(6), 1-10, 2016.
- [3] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling y B. P. Flannery, "Numerical Recipes in C", Cambridge University Press, 1988.
- [4] P. Westbergh, "High Speed Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for Short Reach Communication", Chalmers University of Technology, PhD. Thesis, 2011.
- [5] R. Michalzik (Editor), "Fundamentals, Technology and Applications of VCSEL's", Springer Series in Optical Sciences 166, 2013.
- [6] L. A. Coldren, S. W. Corzine y M. L. Masanovic, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", John Wiley and Sons, 2012.
- [7] V. Dolores Calzadilla, "Estudio de la propagación de solitones ópticos mediante la ecuación no lineal de Schrödinger", Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 2009.
- [8] G. P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics", Academic Press, 1989.
- [9] G. P. Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems", Wiley-Interscience, 2002.
- [10] S. Personick, "Optical Detectors and Receivers", *Journal of Lightwave Technology*, 2008.
- [11] D. Van Veen, V. Houtsma y A. L. Van Wijngaarden, "FEC code for 25/50/100G EPON", Nokia Bell Labs, USA, IEEE P802.3ca 100G-EPON Task Force Meeting, 2017.
- [12] B. Chomycz, "Planning Fiber Optic Networks", McGraw Hill, 2009.
- [13] G. Keiser, "Optical Fiber Communications", McGraw Hill, 1983.

### **3. Análisis de resultados.**

En este capítulo se presentarán los resultados obtenidos al realizar pruebas con los programas desarrollados para estudiar los dos transmisores propuestos trabajando con los tres formatos de modulación elegidos. Se da una explicación del comportamiento de cada sistema y se realiza un análisis del desempeño de los mismos. Las simulaciones realizadas corresponden a cada uno de los sistemas descritos en el capítulo anterior.

#### **3.1 Sistema empleando SOA como modulador óptico.**

Al usar el SOA como modulador óptico se hicieron pruebas para cada uno de los formatos de modulación elegidos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos en cada caso y se presenta una explicación de cada uno de los pasos seguidos para poder observar el comportamiento del sistema, en particular del SOA, siempre buscando los parámetros para lograr el mejor desempeño.

##### **3.1.1 Non-Return-to-Zero.**

La primera parte del análisis del sistema NRZ empleando el SOA como modulador, consistió en hacer una comparación entre el desempeño calculado para distintas potencias ópticas de entrada al SOA. Es importante mencionar que los cálculos presentados a continuación se realizaron en un sistema sin ruido en el transmisor ni en el receptor y tampoco se empleó fibra óptica, es decir, se empleó una configuración back-to-back para poder observar solamente el comportamiento del SOA como modulador óptico y no enmascarar su dinámica con otros efectos propios del sistema. Más adelante se agregaron los demás elementos para hacer un análisis completo del sistema.

Con el fin de medir el desempeño del sistema, se calculó el factor de calidad mediante el uso de la fórmula estadística explicada en el capítulo anterior. Este factor de calidad (Q) proporciona una medida bastante aproximada del desempeño del sistema en un amplio intervalo de tasas de bits. Como se explica más adelante, el cálculo de BER mediante conteo de bits es una forma más precisa de medir el desempeño de un sistema, pero tiene la desventaja de que requiere mucho más tiempo de cómputo que al calcular el factor de calidad. Con la justificación de ahorrar tiempo de cómputo se usó el cálculo estadístico del factor de calidad solamente para determinar la corriente de bombeo y la potencia óptica de entrada al SOA.

En la figura 3.1 se muestran las curvas del factor de calidad calculado para distintas tasas de bits. Cada curva se obtuvo para diferentes potencias ópticas de entrada, empleando siempre una corriente de bombeo oscilando entre 200 y 300 [mA].

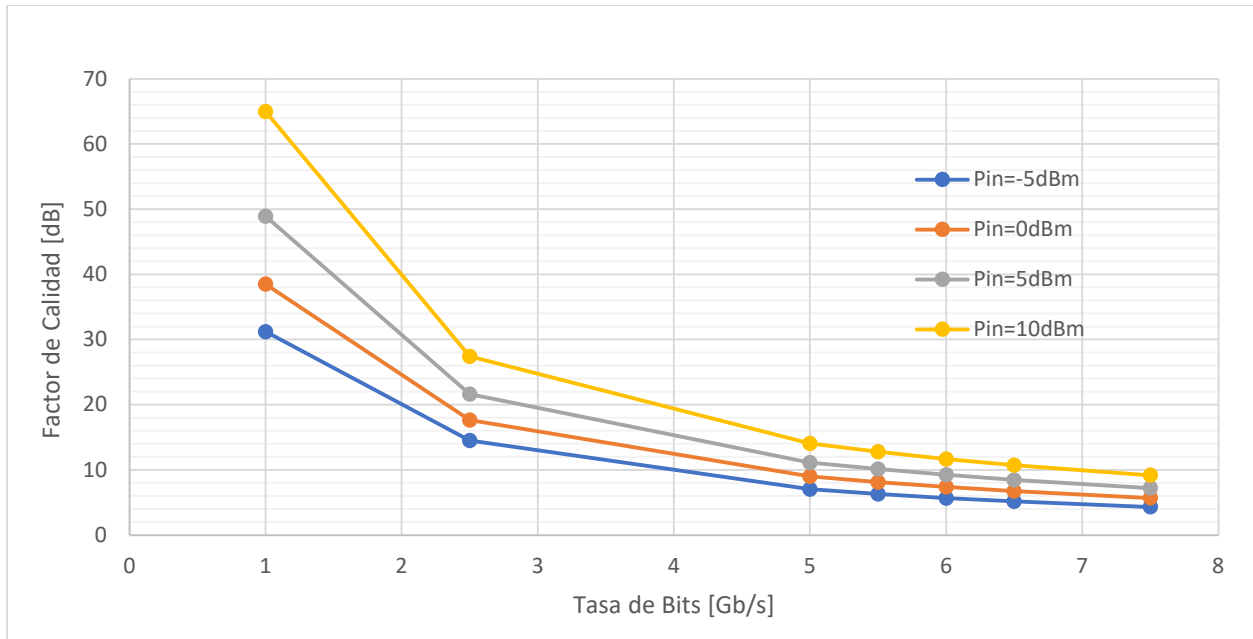


Figura 3.1 Curvas de tasa de bits vs. Factor de calidad para diferentes potencias ópticas de entrada.

En la figura 3.1 se observa cómo el desempeño del sistema disminuye conforme se incrementa la tasa de bits, lo cual es un resultado esperado ya que el amplificador de semiconductor tiene un ancho de banda finito. Asimismo, al aumentar la potencia óptica de entrada al SOA, mejora el desempeño del mismo. Esto sucede para todas las tasas de transmisión y ocurre porque aumenta el nivel de saturación del amplificador, reduciendo por tanto la distorsión del ojo debido a efectos no lineales [1]. En este punto se puede pensar que una potencia de 10 [dBm] es la mejor opción para implementar el transmisor óptico, pero se deben también considerar otros dos factores muy importantes en el estudio del sistema, como lo son la razón de extinción de la señal que sale del transmisor y la ganancia que provee el SOA. En la figura 3.2 se muestra la razón de extinción calculada para distintas tasas de bits; se varió la potencia óptica de entrada al SOA para cada curva y, al igual que en el caso anterior, se empleó una corriente de bombeo de 200 a 300 [mA].

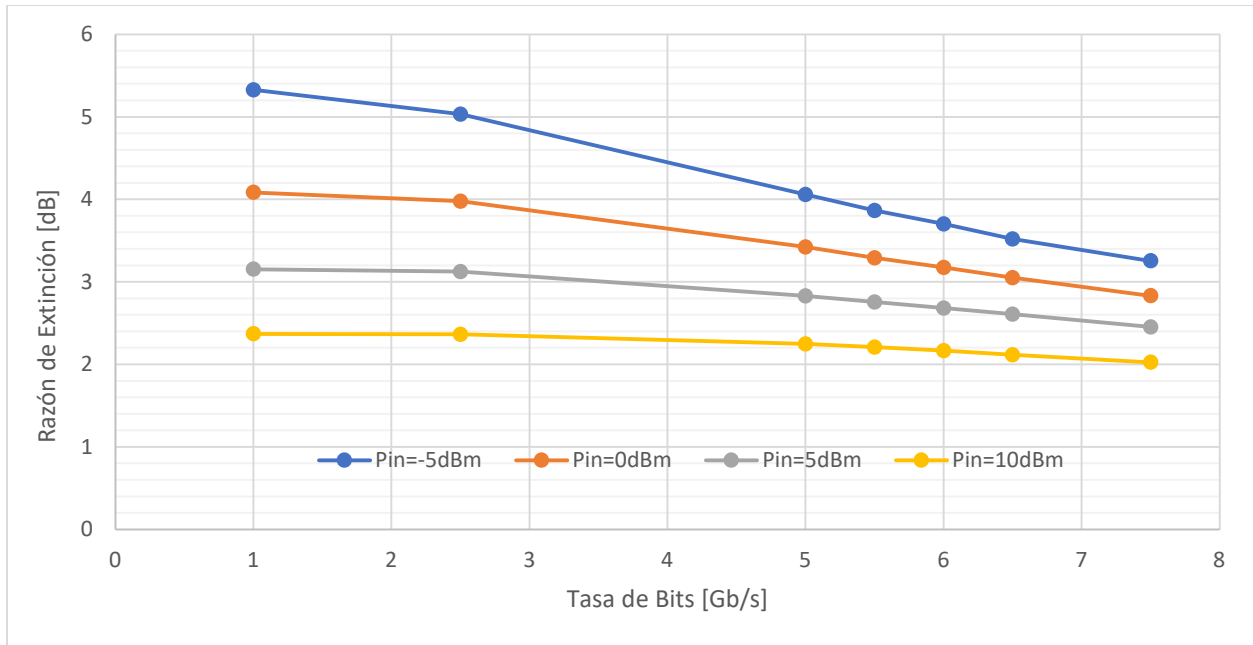
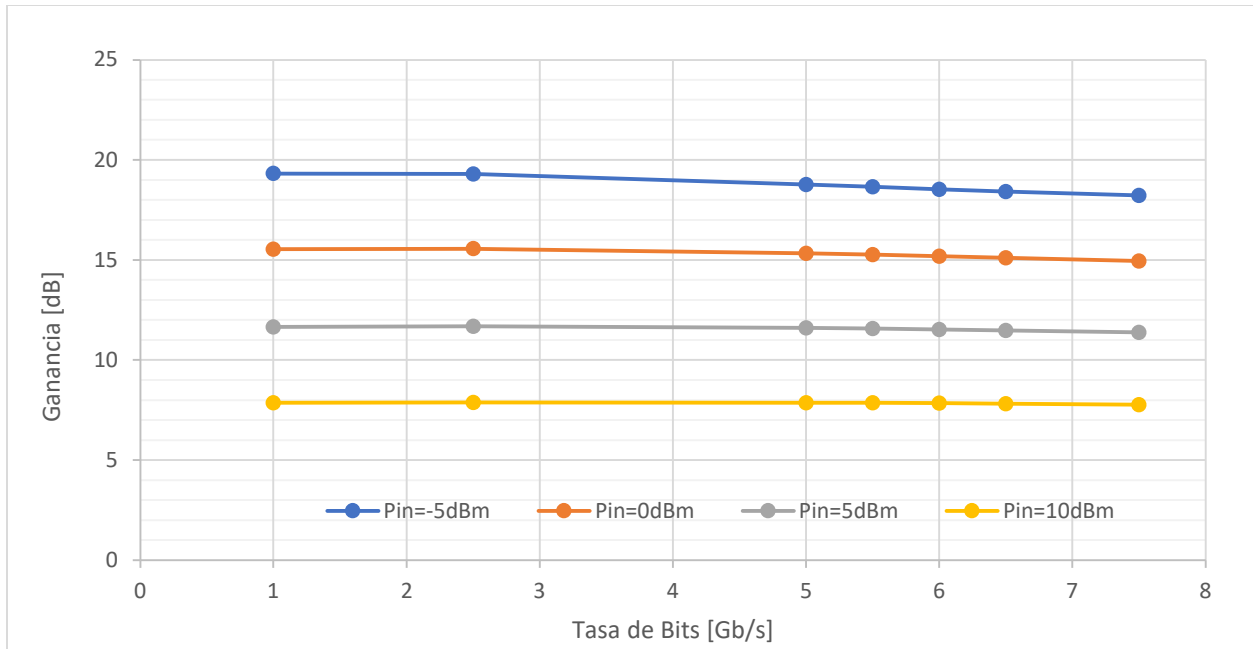


Figura 3.2 Curvas de tasa de bits vs. Razón de extinción para diferentes potencias ópticas de entrada.

En la figura 3.2 se nota que mientras menor sea la potencia óptica de entrada al SOA, mayor será su razón de extinción, lo que sucede para todas las tasas de transmisión. Esto se debe a que mientras mayor sea la potencia de entrada, el SOA trabajará más cerca de la zona de saturación, que es cuando decae la ganancia que provee el dispositivo y esto produce que la diferencia entre los niveles de la señal óptica sea menor. Lo anterior se puede confirmar con la figura 3.3, que muestra la ganancia del SOA para cada tasa de transmisión, usando los mismos valores de potencia de entrada y de corriente de bombeo. Curiosamente, se observa que la ganancia prácticamente no varía con la diferencia de tasa de bits, esto se debe a que la potencia promedio de la señal es prácticamente la misma independientemente de la tasa de bits seleccionada. Este comportamiento, por tanto, es el esperado.





*Figura 3.3 Curvas de tasa de bits vs. Ganancia para distintas potencias ópticas de entrada.*

Al observar las figuras 3.1, 3.2 y 3.3 se puede concluir que si se busca un buen desempeño del sistema y también se desea aprovechar la ganancia que ofrece el SOA entonces se debe elegir una potencia de entrada que no sea demasiado elevada para que no sature el dispositivo pero que no sea demasiado baja para conservar un factor de calidad alto en la señal óptica. Son entonces de mayor interés los casos con potencias de entrada de 0 y 5 [dBm].

Se eligió una potencia de entrada de 5 [dBm] para después estudiar el comportamiento del SOA al variar la corriente de bombeo, para esto se calculó de nuevo el factor de calidad de la señal a la salida del SOA para distintas tasas de transmisión y los resultados obtenidos son los siguientes:

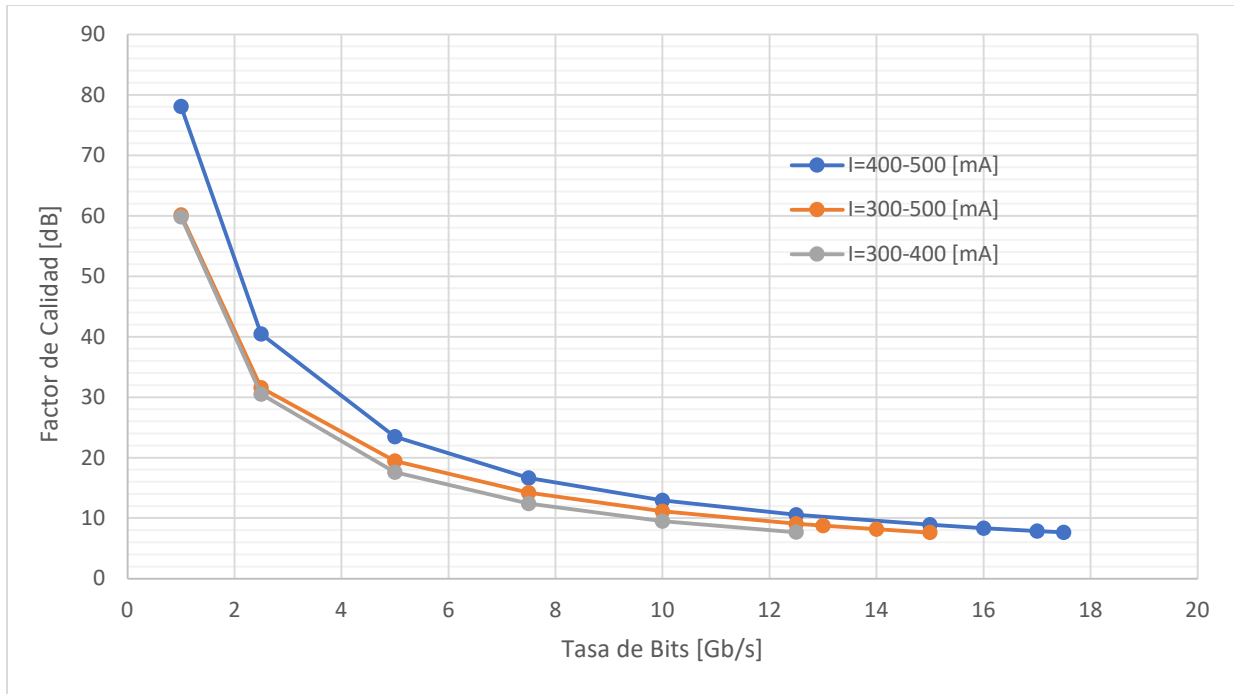
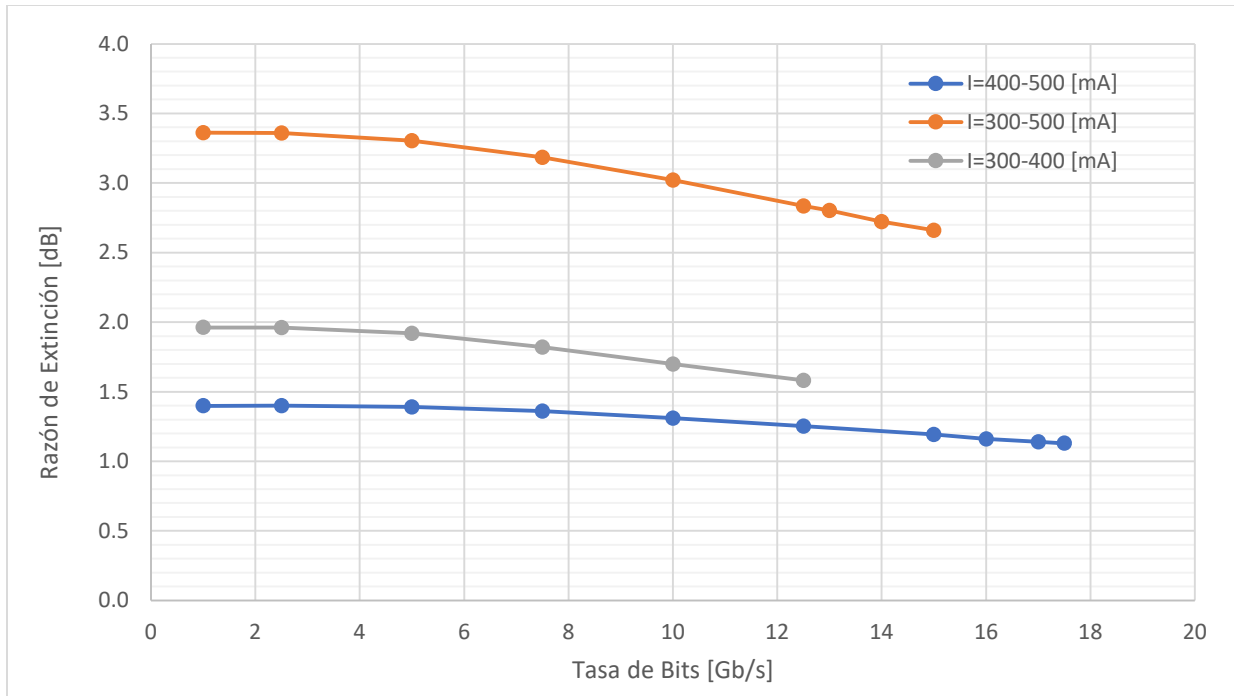


Figura 3.4 Curvas de tasa de bits vs. Factor de calidad para distintas corrientes de bombeo.

En la figura 3.4 se puede observar cómo al aumentar los dos límites de la corriente de bombeo, el SOA presenta un mejor desempeño. Esto se debe a que la corriente de bombeo genera pares electrón-hueco entre la banda de valencia y de conducción que existen en el amplificador óptico, por lo que si se aumenta la corriente resulta mucho más probable que se generen fotones dentro del mismo gracias a la emisión estimulada [2]. Por otro lado, cuando se quiere mejorar la razón de extinción de la señal óptica, no es necesario aumentar los límites de la corriente de bombeo, sino hacer más grande la diferencia entre estos, es decir, el 'swing' de la corriente eléctrica como se explica a continuación.



*Figura 3.5 Curvas de tasa de bits vs. Razón de extinción para distintas corrientes de bombeo.*

En la figura 3.5 se muestra la razón de extinción calculada al variar la tasa de transmisión para los mismos valores de la corriente de bombeo utilizados anteriormente y se hace notorio cómo al aumentar la diferencia entre los límites de la corriente, la razón de extinción de la señal mejora, lo que se explica porque esta señal óptica de salida del SOA es finalmente una transformación de la señal eléctrica de entrada con que se bombea el dispositivo.

En la figura 3.6 se presenta la ganancia que el SOA proporciona a la señal óptica para distintas tasas de transmisión. Se usaron los mismos valores para la corriente de bombeo y de igual forma se observa cómo al aumentar los valores también aumenta la ganancia del dispositivo gracias al proceso de emisión estimulada ya explicado.

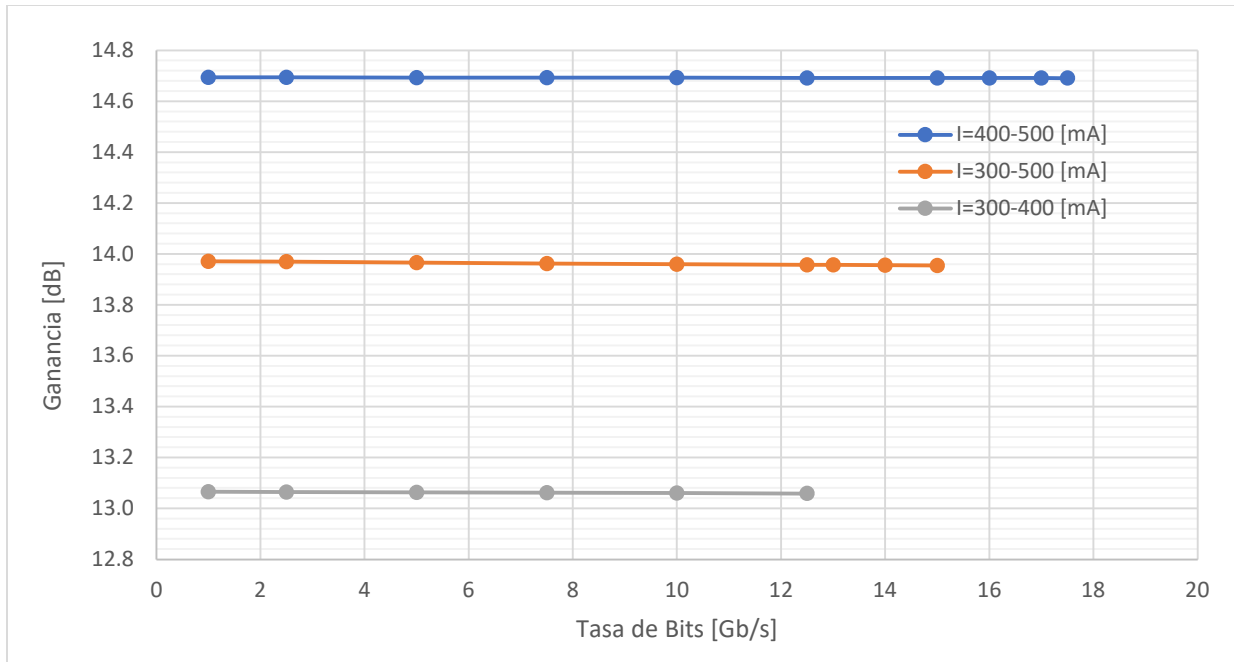


Figura 3.6 Curvas de tasa de bits vs. Ganancia para distintas corrientes de bombeo.

Hasta este punto los valores para la corriente de bombeo que parecen más interesantes son de 300 a 500 [mA] debido a que generan una señal óptica con buen desempeño y razón de extinción, además de que el SOA presenta un buen nivel de ganancia en este caso.

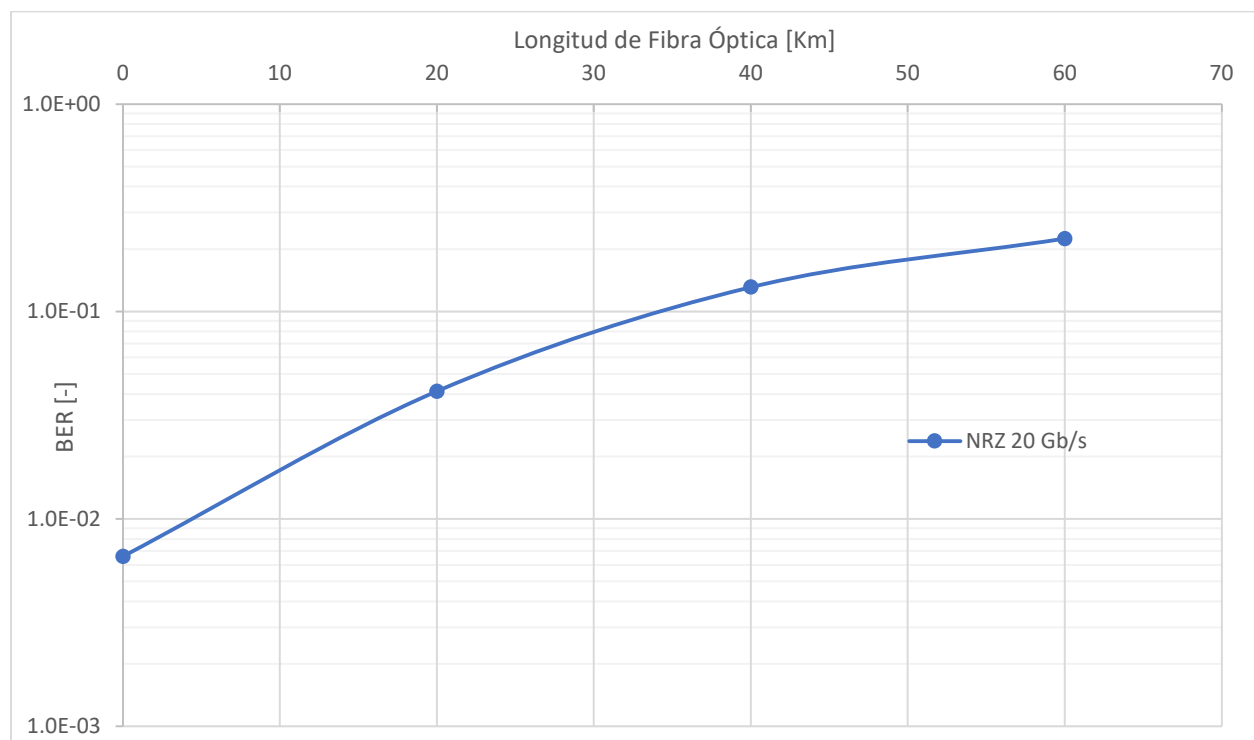
A partir de este punto (para el sistema NRZ) se comenzó a calcular la razón de bits erróneos (BER) mediante conteo de bits para tener mayor precisión en la medición del desempeño. El conteo de bits consiste básicamente en detectar los bits recibidos y compararlos con la secuencia original de bits enviados, se hace un conteo de los bits que no hayan sido recibidos correctamente y se divide entre el número total de bits enviados, con lo que se obtiene la BER. Al realizar esto, se hizo notable que había una gran diferencia entre los resultados obtenidos mediante conteo de bits y los obtenidos mediante cálculo estadístico debido a las no-linealidades propias del SOA que distorsionan severamente el ojo, lo cual a su vez hace que las distribuciones que se habían asumido Gaussianas, no lo sean. Resultó que el sistema podía alcanzar tasas de transmisión mayores sin presentar errores, por lo que se decidió reducir la potencia óptica de entrada al SOA de 5 a 0 [dBm] y también la corriente de bombeo con un rango de 300 a 500 [mA] por uno de 200 a 400 [mA] para que no hubiera gran diferencia con los resultados de desempeño ya obtenidos y también para disminuir los gastos que significaría implementar el sistema propuesto en una red óptica real.

La principal diferencia al calcular la BER mediante conteo de bits es que debe enviarse una cantidad muy alta de bits para que el cálculo sea lo más preciso posible, con lo que aumenta considerablemente el tiempo de cómputo que requiere el simulador. La cantidad de bits enviada depende de la BER que se desea alcanzar, en el presente caso se designó una BER de  $1 \times 10^{-2}$  como corresponde a redes ópticas con corrección de errores hacia adelante (FEC) de baja densidad y revisión de paridad (LDPC) [3], lo que significa que solo 1 bit de cada cien puede ser erróneo. Para que el cálculo sea preciso debe enviarse por lo menos 100 veces esa cantidad de bits, es decir, 10,000 bits. En las simulaciones realizadas para calcular

la BER del sistema mediante conteo de bits se enviaron  $2^{15} \approx 32\,000$  bits para tener un cálculo más confiable.

Para comprobar que al cambiar la forma en que se calcula el desempeño se siguen conservando las tendencias descritas al variar la potencia de entrada al SOA y la corriente de bombeo, se realizaron simulaciones variando estos parámetros y, en efecto, se pudieron observar las mismas tendencias debido a que los procesos físicos simulados no cambian con la forma en que se calcula el desempeño del sistema. El cálculo de ganancia y de razón de extinción se mantuvieron iguales, por lo que las curvas de estos parámetros son las ya mostradas.

Además de cambiar el cálculo del parámetro de desempeño, se agregó ruido blanco Gaussiano en el transmisor y ruido térmico en el receptor con las características explicadas en el capítulo anterior y posteriormente se calculó la BER para distintas longitudes de fibra óptica. En la siguiente figura se muestra la curva de BER para una tasa de transmisión de 20 [Gb/s] al usar longitudes de 0, 20, 40 y 60 [Km] de fibra. La potencia óptica de entrada al SOA es de 0 [dBm] y la corriente de bombeo va de 200 a 400 [mA].



*Figura 3.7 Curva de longitud de la fibra óptica vs. BER empleando modulación NRZ.*

En la figura 3.7 es notable el deterioro que provoca la fibra en la señal óptica debido a la dispersión y a la atenuación; conforme se aumenta la longitud de la fibra óptica, el desempeño del sistema cae. También se muestra cómo, al trabajar con 20 [Gb/s], resultó que solo el caso back-to-back tuvo una BER menor al umbral definido. Otra cuestión de interés es que, al calcular el desempeño del sistema para una tasa de transmisión de 16 [Gb/s] se obtuvieron transmisiones sin errores para prácticamente todas las longitudes de fibra óptica analizadas.

### 3.1.2 Duobinario.

Al igual que en el sistema con modulación NRZ, la primera parte del análisis del sistema empleando modulación duobinaria consistió en hacer pruebas con diferentes potencias ópticas de entrada al SOA y también distintos valores de corriente de bombeo para poder elegir los valores de estos parámetros que aseguraran una transmisión con el mejor desempeño posible. Al hacer las pruebas simultáneamente al sistema NRZ también se comenzó haciendo el cálculo del factor de calidad mediante el método estadístico. De igual manera, se empezó realizando las simulaciones con el sistema sin ruido y en configuración back-to-back.

En la figura 3.8 se muestran los resultados de calcular el factor de calidad para un rango de tasas de transmisión. Primero se varió la potencia óptica de entrada al SOA para ciertos valores de corriente y una vez elegido el caso con mejor desempeño, se varió la corriente de bombeo para observar el comportamiento del sistema. Se obtuvieron los siguientes resultados:

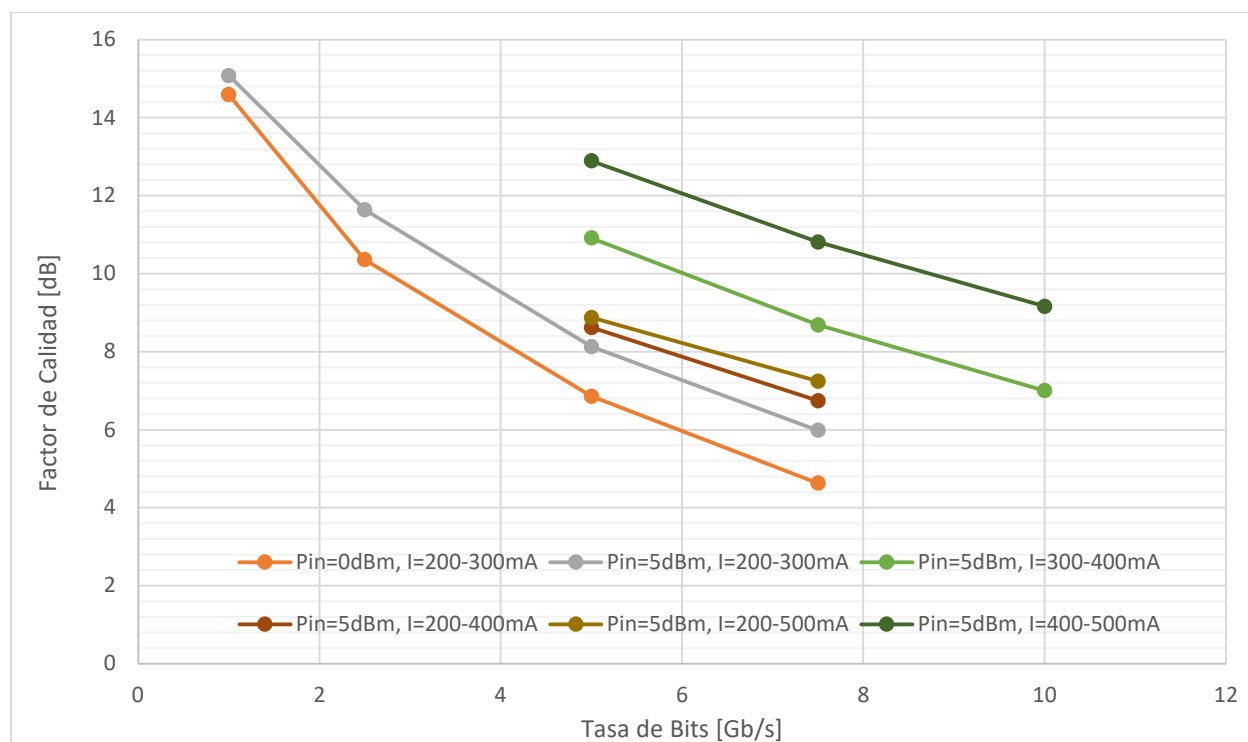
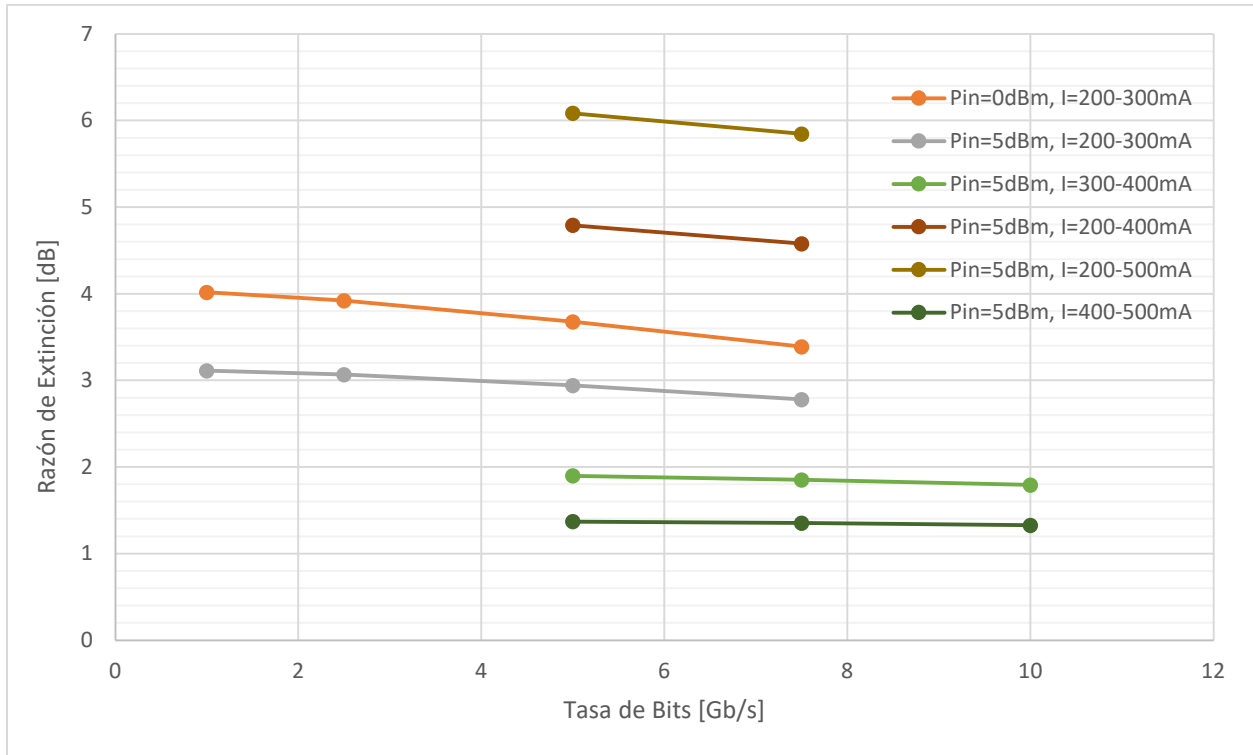


Figura 3.8 Curvas de tasa de bits vs. Factor de calidad para distintas potencias ópticas de entrada y corrientes de bombeo.

En la figura 3.8 se puede ver que, al igual que empleando modulación NRZ, al aumentar la potencia de entrada mejora el factor de calidad de la señal óptica a la salida del SOA. De la misma forma, al aumentar la corriente de bombeo al SOA, mejora el desempeño del dispositivo. Estos resultados presentan la misma tendencia que en el inciso anterior donde se usó modulación NRZ debido a que en ambos formatos se modula la amplitud de la señal óptica, lo que los hace muy similares.

Para realizar un análisis más completo de los distintos casos de corriente de bombeo y potencia de entrada al SOA, también se hizo el cálculo de la razón de extinción de la señal óptica a la salida del amplificador y

de la ganancia proporcionada por el mismo; todo esto para un rango de tasas de transmisión. Los resultados se muestran en las dos figuras siguientes.



*Figura 3.9 Curvas de tasa de bits vs. Razón de extinción para distintas potencias ópticas de entrada y corrientes de bombeo.*

En la figura 3.9 primero se puede observar cómo, al aumentar la potencia de entrada al SOA, disminuye la razón de extinción de la señal óptica. Después, al variar la diferencia entre los límites de la corriente de bombeo, también varía la razón de extinción de la señal óptica de forma proporcional.

En la figura 3.10 se puede notar cómo al aumentar la potencia de entrada al SOA, disminuye su ganancia. También se observa que, al aumentar los valores de corriente de bombeo aumenta la ganancia que proporciona el amplificador gracias al fenómeno de emisión estimulada explicado anteriormente. Todo esto en forma muy similar a como sucedió en el análisis del sistema usando modulación NRZ.

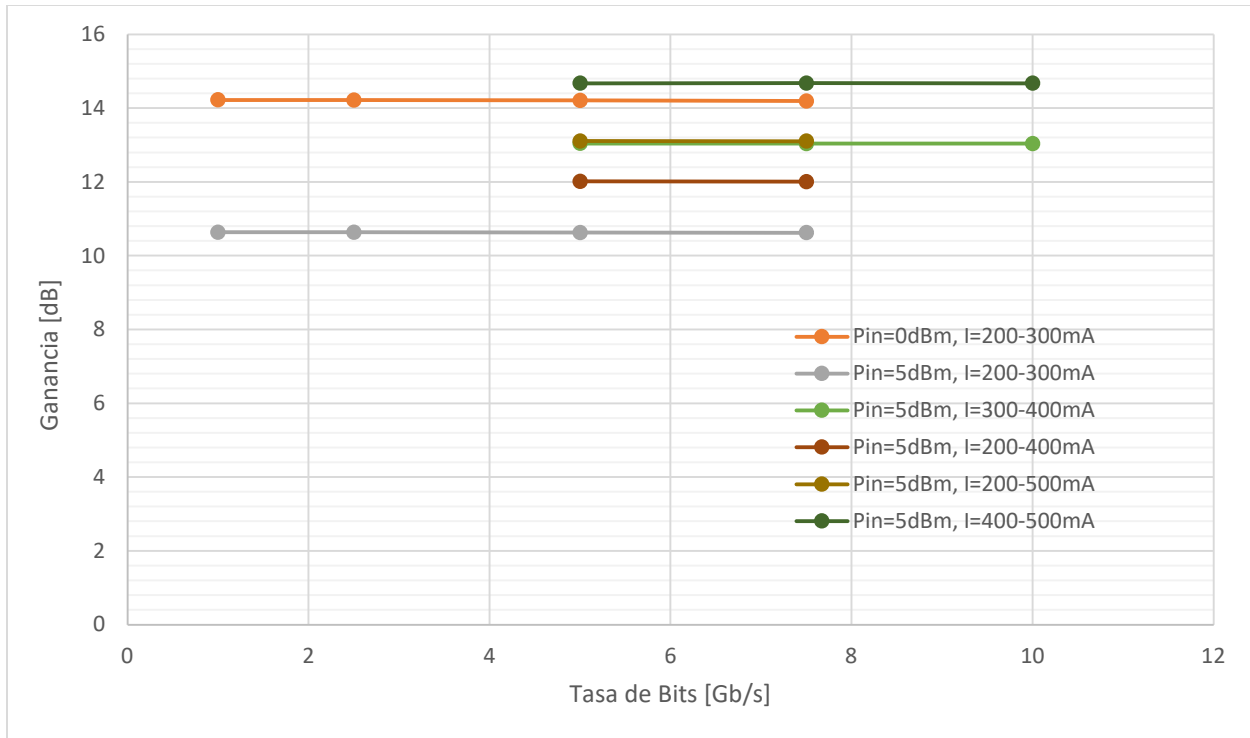


Figura 3.10 Curvas de tasa de bits vs. Ganancia para distintas potencias ópticas de entrada y corrientes de bombeo.

Hasta este punto se pensó que, para el sistema empleando modulación duobinaria, la potencia óptica de entrada al SOA que más convendría usar sería de 5 [dBm] con una corriente de bombeo de 200 a 500 [mA], sin embargo, por los motivos explicados en el inciso anterior, se cambió el cálculo del factor de calidad mediante fórmula estadística por el cálculo de BER mediante conteo de bits, con lo cual se alcanzaron tasas de transmisión mucho más altas en transmisiones sin errores. Al realizar este cambio, se decidió reducir el valor de potencia óptica de entrada al SOA a 0 [dBm] y de corriente de bombeo de 200 a 400 [mA] como se hizo en el sistema NRZ al usar conteo de bits para calcular la BER, todo esto para hacer una comparación justa y fidedigna entre ambos formatos de modulación.

Uno de los componentes principales al implementar modulación duobinaria como en el presente trabajo, es un filtro paso-bajas que generalmente tiene una frecuencia de corte de la cuarta parte de la tasa de transmisión (BR), como se explicó en el capítulo 1. Esta frecuencia de corte puede ser optimizada para el sistema en el cual se esté trabajando, es decir, puede modificarse su valor para mejorar el desempeño del sistema. Siguiendo esta idea, se decidió hacer pruebas con distintas frecuencias de corte en el filtro paso-bajas para así poder compararlos y elegir el que permitiera al sistema tener un mejor rendimiento.

En la figura 3.11 se muestran las curvas generadas al calcular la BER para 0, 20, 40 y 60 [Km] de fibra óptica en el sistema empleando modulación duobinaria con ruido en el transmisor y en el receptor, todo esto para una tasa de transmisión de 16 [Gb/s]. Cada curva corresponde a una distinta frecuencia de corte en el filtro paso-bajas.



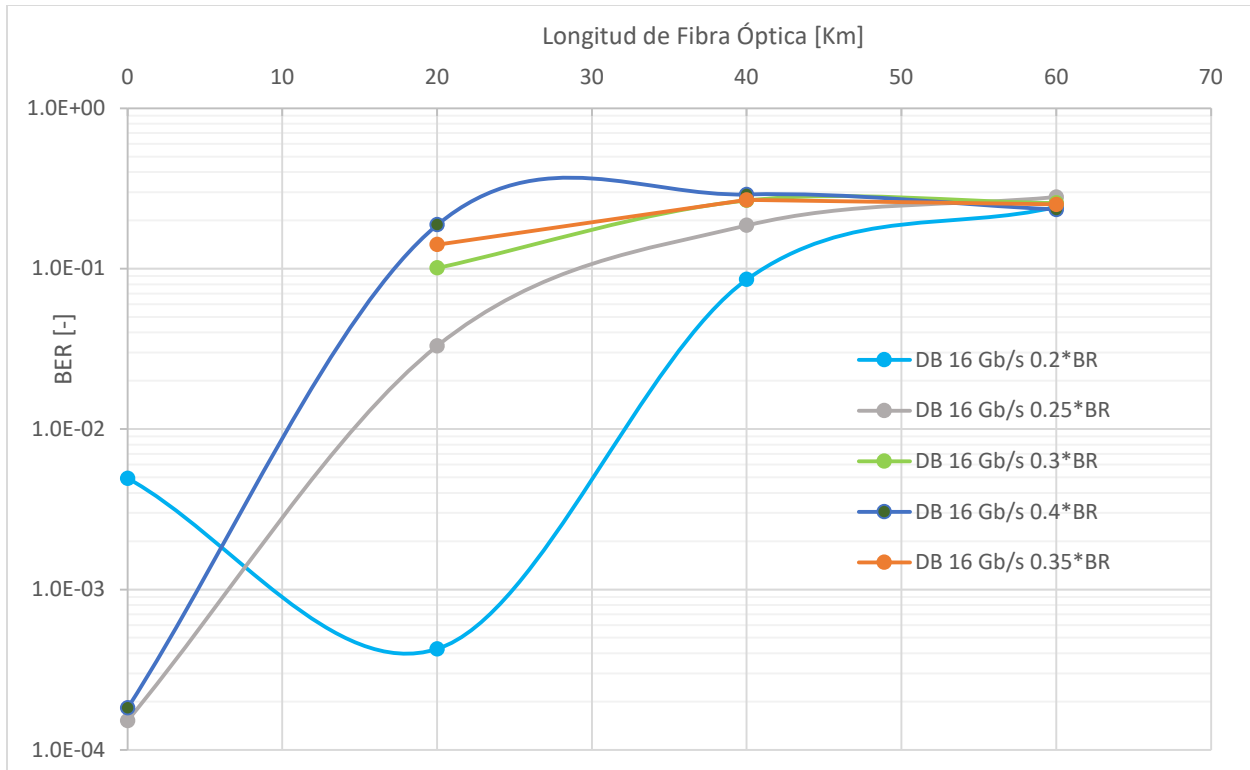


Figura 3.11 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas frecuencias de corte del filtro paso-bajas y una tasa de transmisión de 16 [Gb/s].

Las curvas que no tienen valores para 0 [Km] es porque tuvieron una BER = 0, es decir, una transmisión sin errores. Los casos que presentan esto son en los que se emplearon frecuencias de corte de 0.3\*BR y 0.35\*BR. Se puede observar que, al añadir fibra óptica, sólo el caso en el que la frecuencia de corte es de 0.2\*BR tiene un mejor desempeño que cuando se usa el valor estándar de 0.25\*BR para distancias de 20 y 40 [Km]. Además, para 20 [Km] de fibra es el único caso en donde se obtiene una BER menor al umbral.

Las variaciones en el desempeño del sistema cuando se cambia la frecuencia de corte del filtro paso-bajas se deben a que se modifica la forma de los pulsos ópticos y éstos, al interactuar con los distintos elementos del sistema, son mayor o menormente afectados, dependiendo en gran parte de la respuesta en frecuencia que tiene cada elemento.

Es interesante observar que, cuando se usa una frecuencia de corte de 0.2\*BR, al añadir fibra óptica de 0 a 20 [Km], hay una mejora en el desempeño del sistema. Esto parece contradecir la lógica, puesto que, una transmisión en configuración back-to-back siempre debería tener un mejor desempeño que una en la cual existe fibra óptica entre el transmisor y el receptor. Lo anterior se puede explicar porque también entran en juego dos factores muy importantes que son: la dispersión de la fibra óptica y el chirp que tiene la señal óptica que sale del SOA. Estos dos fenómenos pueden interactuar de tal forma que los pulsos ópticos se vean menos perjudicados para cierta distancia de la fibra [4].

En la figura 3.12 se muestran los resultados del cálculo de BER para las mismas distancias y usando los mismos parámetros que en la figura anterior, sólo se aumentó la tasa de transmisión a 20 [Gb/s].

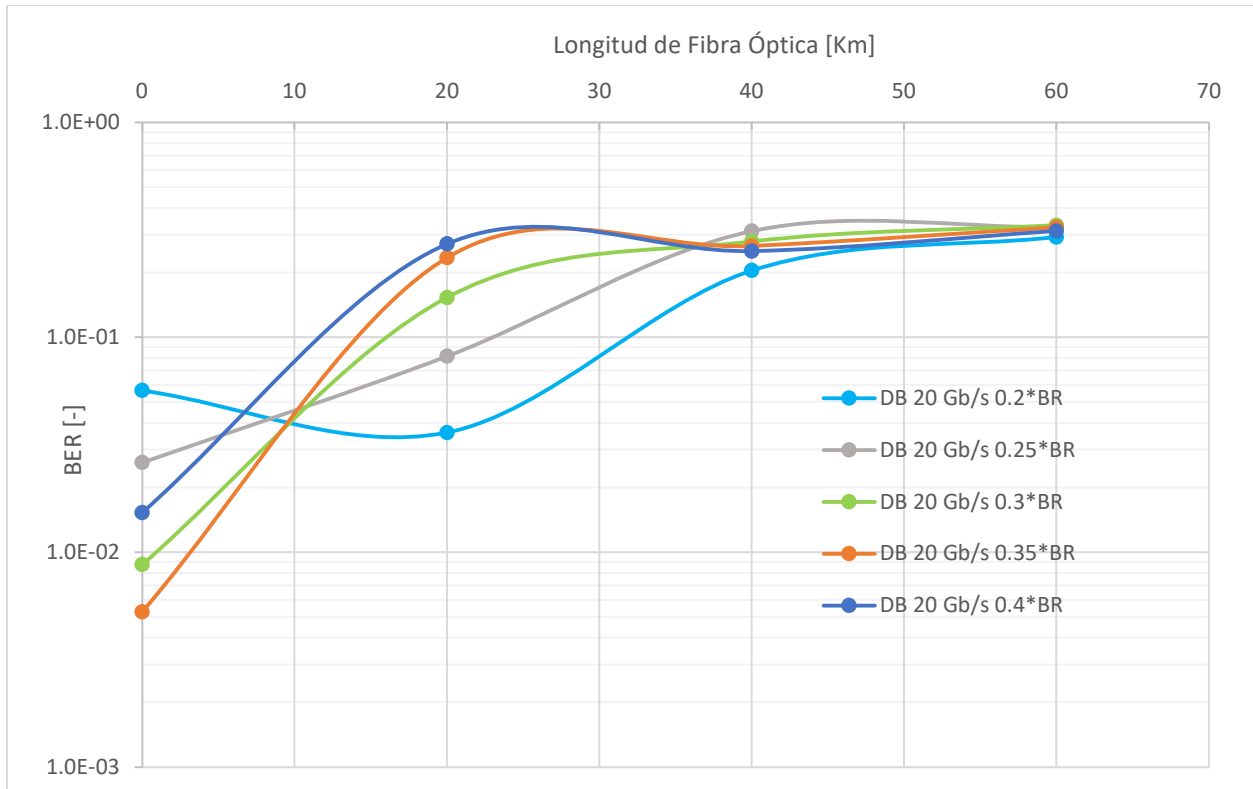


Figura 3.12 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas frecuencias de corte del filtro paso-bajas y una tasa de transmisión de 20 [Gb/s].

Se puede observar la misma tendencia que en la figura anterior. En este caso las curvas para las cuales se empleó una frecuencia de corte de  $0.3*BR$ ,  $0.35*BR$  y  $0.4*BR$  muestran un mejor desempeño que al usar la frecuencia de corte estándar cuando se tiene una configuración back-to-back. Al agregar una fibra óptica de 20 [Km] sólo el caso para el cual se usó una frecuencia de corte de  $0.2*BR$  tiene mejor desempeño que el caso estándar, aunque ya supera el umbral de BER definido. Para mayores longitudes de fibra la BER obtenida es tan alta para todas las frecuencias de corte que estos casos se pueden descartar. Este comportamiento se explica con las mismas razones que en la figura anterior. Por tanto, se puede concluir de este análisis que la frecuencia de corte óptima dependerá de la distancia que se quiera alcanzar.

### 3.1.3 Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM-4).

Una vez obtenidos los resultados para el sistema trabajando con modulación NRZ y duobinaria, se procedió a hacer pruebas con modulación PAM-4. Para hacer una comparación justa entre los formatos de modulación, se decidió usar los mismos valores de corriente de bombeo y potencia óptica de entrada al SOA, que son: 200 a 400 [mA] y 0 [dBm], respectivamente. Por lo anterior, desde el principio se empleó conteo de bits como técnica para calcular la BER.

En la figura 3.13 se muestran los resultados del cálculo de BER para 0, 20, 40 y 60 [Km] de fibra óptica en el sistema PAM-4 con ruido en el transmisor y en el receptor. Se generaron curvas para dos tasas de transmisión: 16 y 20 [Gb/s].

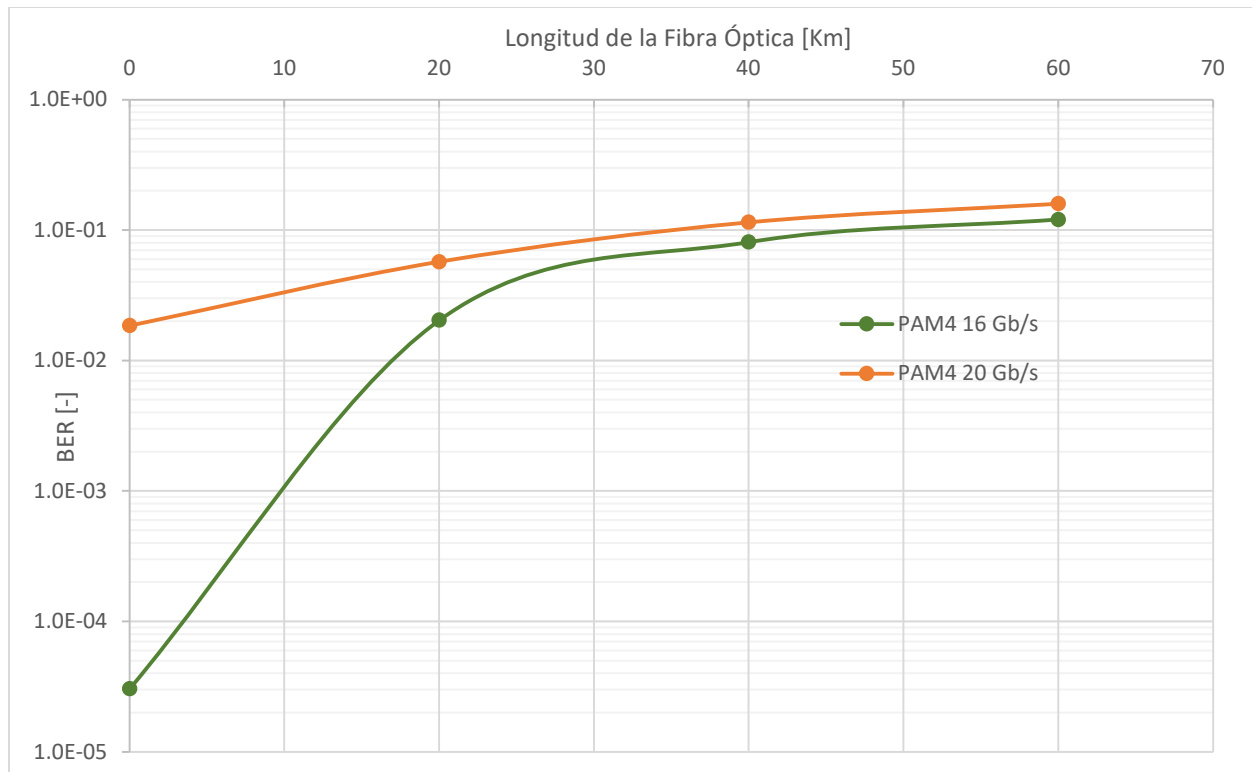


Figura 3.13 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas tasas de transmisión.

En la figura se observa cómo, conforme aumenta la longitud de la fibra óptica, el desempeño del sistema va decayendo como es de esperarse debido a la dispersión y la atenuación que añade la fibra. También tiene sentido que la curva de 16 [Gb/s] presente siempre un mejor desempeño que la de 20 [Gb/s] debido a la velocidad tan alta a la que trabaja el SOA.

Cabe mencionar que, al emplear el SOA como modulador, para los tres formatos analizados se obtuvo una ganancia igual o poco mayor a 15.9 [dB] a partir de que se eligieron los valores de corriente de bombeo y potencia óptica de entrada al amplificador ya mencionados. Por este motivo no se presentaron nuevas curvas de ganancia para el dispositivo, puesto que serían todas muy similares y casi sin variaciones respecto a la tasa de bits en prueba. Este valor de ganancia es bastante bueno si se considera que, para el SOA empleado, el valor máximo de ganancia es aproximadamente de 30 [dB] cuando solo está trabajando como amplificador y no como modulador.

### 3.2 Sistema empleando Láser Modulado Directamente (DML).

En el presente inciso se analizarán los resultados obtenidos al emplear un láser modulado directamente como transmisor en el sistema óptico simulado para los tres formatos de modulación elegidos. Como era de esperarse, el DML no obtuvo buenos resultados para longitudes tan grandes de fibra óptica como en el caso del SOA debido a que tiene una potencia de salida mucho menor. También se debe mencionar que todos los resultados obtenidos en este inciso son para el sistema completo, es decir, con fibra óptica dispersiva, ruido de intensidad relativa en el transmisor y ruido térmico en el receptor. En este caso el cálculo de BER se hizo mediante conteo de bits desde un principio.

### 3.2.1 Non-Return-to-Zero.

El primer formato de modulación que se probó al utilizar el DML como transmisor fue NRZ. Como se explicó en el primer capítulo, un DML sólo debe alimentarse con una corriente de bombeo que ya está modulada con la información que se desea transmitir. Para hacer más rápido el proceso de simulación, se calculó la BER para longitudes de fibra óptica de 0, 10 y 20 [Km] con el sistema completo, es decir, con ruido en el receptor y en el transmisor. Todo esto para una corriente de bombeo de 4-8 [mA].

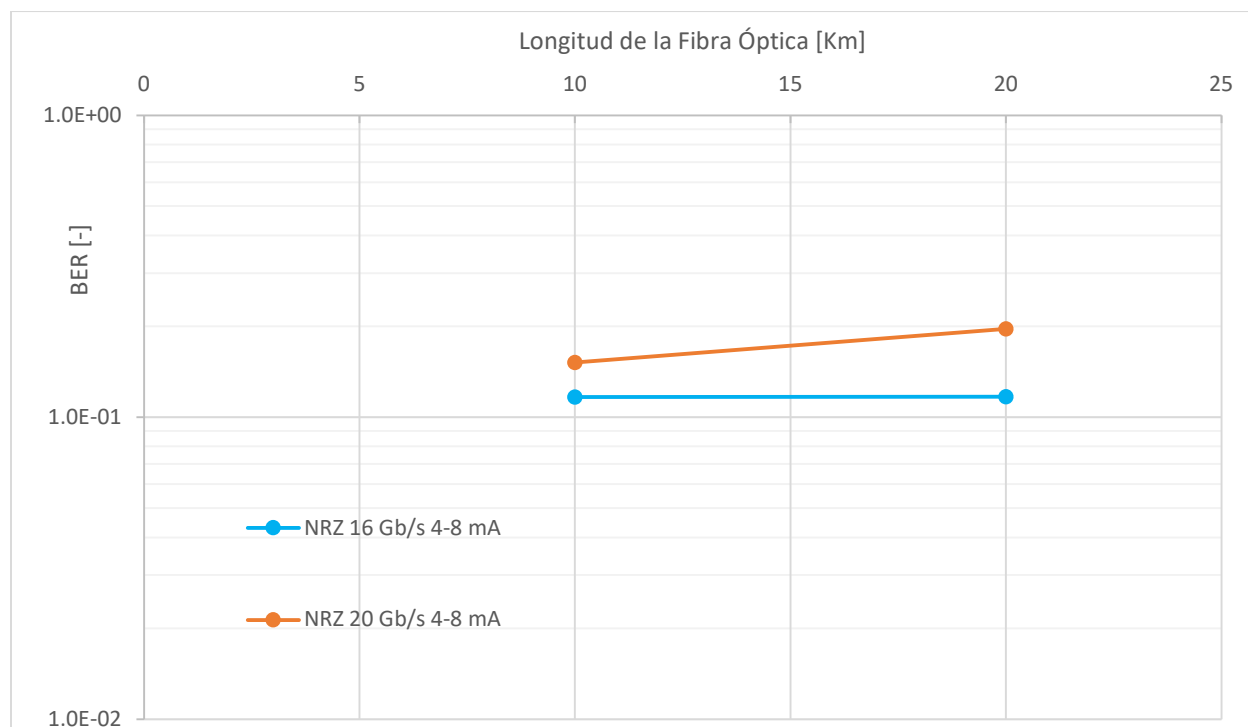


Figura 3.14 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas tasas de transmisión.

Una vez más, las curvas que no muestran valores para 0 [Km] es porque tuvieron una transmisión sin errores, como sucede en ambos casos. En la figura 3.14 se puede ver cómo, al aumentar la tasa de transmisión de 16 a 20 [Gb/s] cae un poco el desempeño del sistema como es esperado. Cuando se agregó fibra óptica, en ningún caso se obtuvo una BER por debajo del umbral.

### 3.2.2 Duobinario.

Después de haber obtenido los resultados para el sistema con formato de modulación NRZ, se procedió a realizar pruebas con modulación duobinaria. En este caso se eligió una corriente de bombeo de 4 a 8 [mA] porque la señal duobinaria tiene tres niveles y entre más separados estén, es decir, entre mayor sea la razón de extinción de la señal óptica, se obtendrá mejor desempeño del sistema. Al igual que en el caso anterior, donde se utilizó el SOA como modulador óptico, se intentó optimizar la frecuencia de corte del filtro paso-bajas para obtener el mejor desempeño posible en el sistema con transmisor DML empleando modulación duobinaria. En la figura 3.15 se muestran los resultados de calcular la BER para 0, 10 y 20 [Km] de fibra óptica para una tasa de 20 [Gb/s], las frecuencias de corte del filtro paso-bajas que se probaron son de  $0.25 \cdot BR$ ,  $0.2 \cdot BR$ ,  $0.3 \cdot BR$ ,  $0.35 \cdot BR$  y  $0.4 \cdot BR$ .

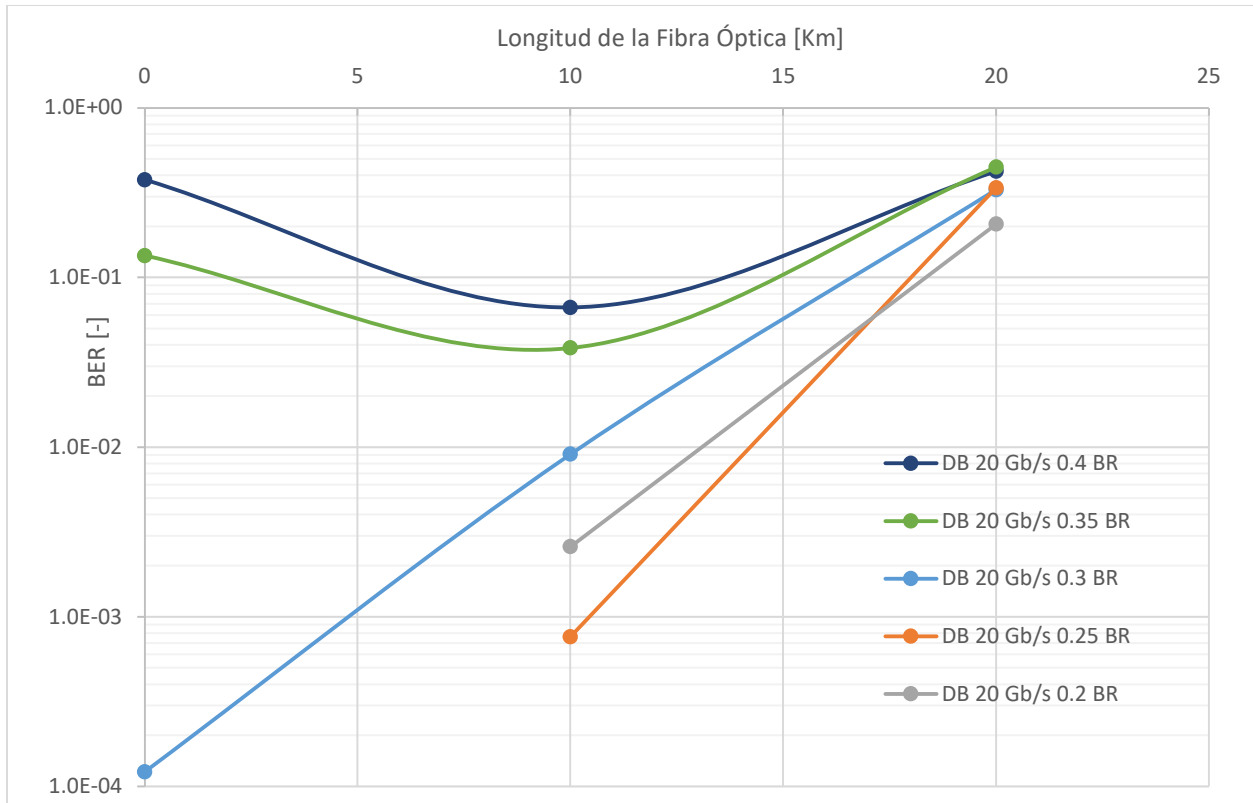


Figura 3.15 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas frecuencias de corte del filtro paso-bajas.

En la figura se muestra cómo, al emplear frecuencias de corte de  $0.2 \cdot BR$ ,  $0.25 \cdot BR$  y  $0.3 \cdot BR$ , se alcanza una BER aceptable hasta 10 [Km] de fibra, mientras que en configuración back-to-back se logra una transmisión sin errores en los dos primeros casos. Cuando se usaron las demás frecuencias de corte no se alcanzó el umbral de BER requerido para ninguna distancia de fibra, por lo que pueden ser descartadas. En todos los casos, al aumentar la longitud de la fibra óptica cae el desempeño del sistema, como es de esperarse.

### 3.2.3 Modulación por Amplitud de Pulsos (PAM-4).

Las pruebas realizadas con PAM-4 también se basaron en el cálculo de BER para 0, 10 y 20 [Km] de distancia. Se probaron dos distintas corrientes de bombeo: 4 a 8 y 6 a 8 [mA] y tasas de transmisión de 16 y 20 [Gbps] para hacer una comparación de todos los casos. A continuación, se muestran los resultados.

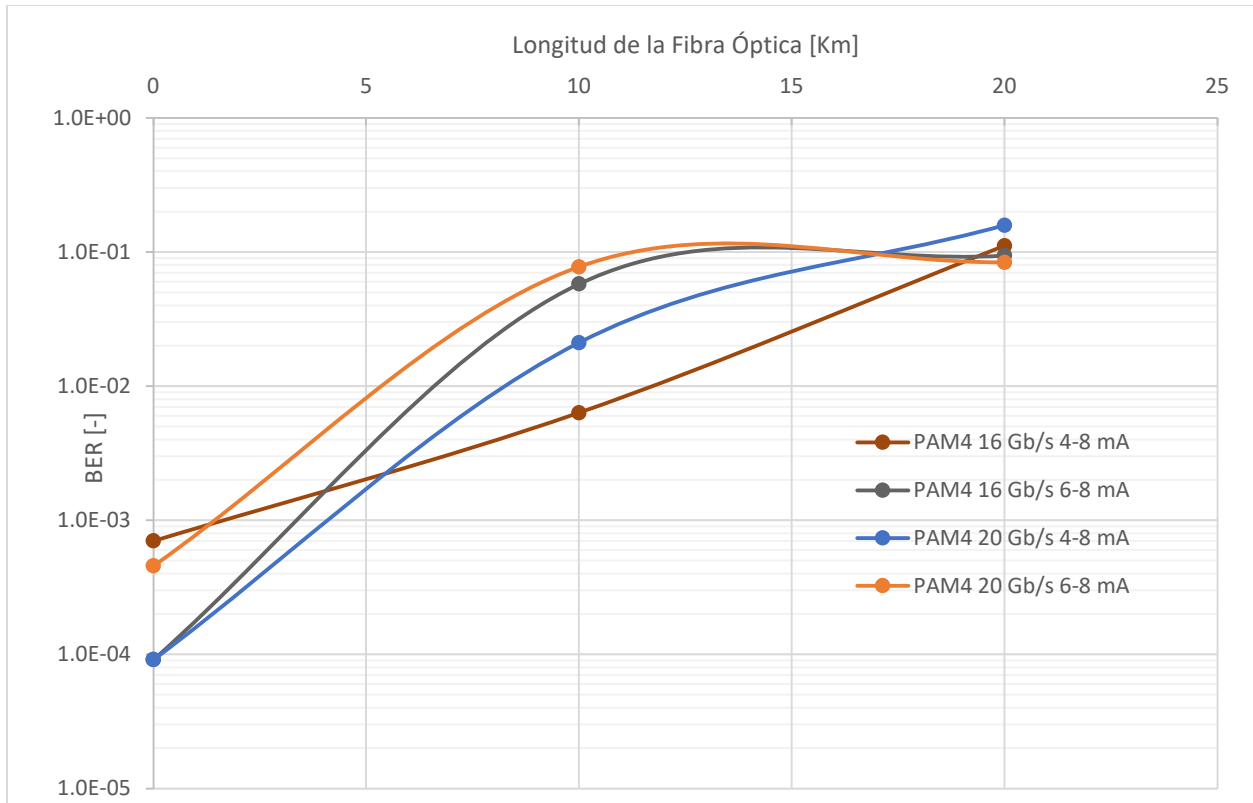


Figura 3.16 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER para distintas tasas de transmisión y corrientes de bombeo.

Como se muestra en la figura, cuando la diferencia entre los límites de la corriente de bombeo fue mayor se obtuvo mejor desempeño debido a la razón de extinción mayor de la señal óptica, cuestión muy importante en PAM-4 porque permite al detector distinguir más fácilmente los cuatro niveles de la señal. Por esta razón, con 10 [Km] de fibra óptica, las curvas para una corriente de bombeo de 4 a 8 [mA] muestran valores más bajos de BER y sólo cuando se usó una tasa de transmisión de 16 [Gb/s] se logró una BER menor al umbral. En configuración back-to-back todas las curvas están por debajo del umbral de BER, mientras que para 20 [Km] de fibra, ningún caso tiene un desempeño aceptable debido a que, al aumentar la longitud de la fibra, también aumenta el impacto que tiene la dispersión cromática y la atenuación en la señal óptica.

### 3.3 Comparación de resultados.

Para hacer una comparación entre los formatos de modulación elegidos, se tomaron los casos que presentaron mejor desempeño en cada formato y para cada transmisor. Cuando se empleó el SOA como modulador, se eligió una potencia óptica de entrada de 0 [dBm] y una corriente de bombeo de 200 a 400 [mA] porque con estos valores se obtuvieron los mejores resultados para los tres formatos de modulación, como se explicó a lo largo del inciso 3.1. A continuación, se muestra el desempeño que tuvo el sistema con ruido para cada uno de los formatos estudiados al emplear una tasa de transmisión de 20 [Gb/s] con distintas longitudes de fibra óptica, en el caso de duobinario se encontró que al emplear un filtro pasobajas con una frecuencia de corte de 0.2 veces la tasa de transmisión se obtuvo mejor desempeño del sistema que al emplear la frecuencia de corte estándar cuando se agregó fibra óptica.

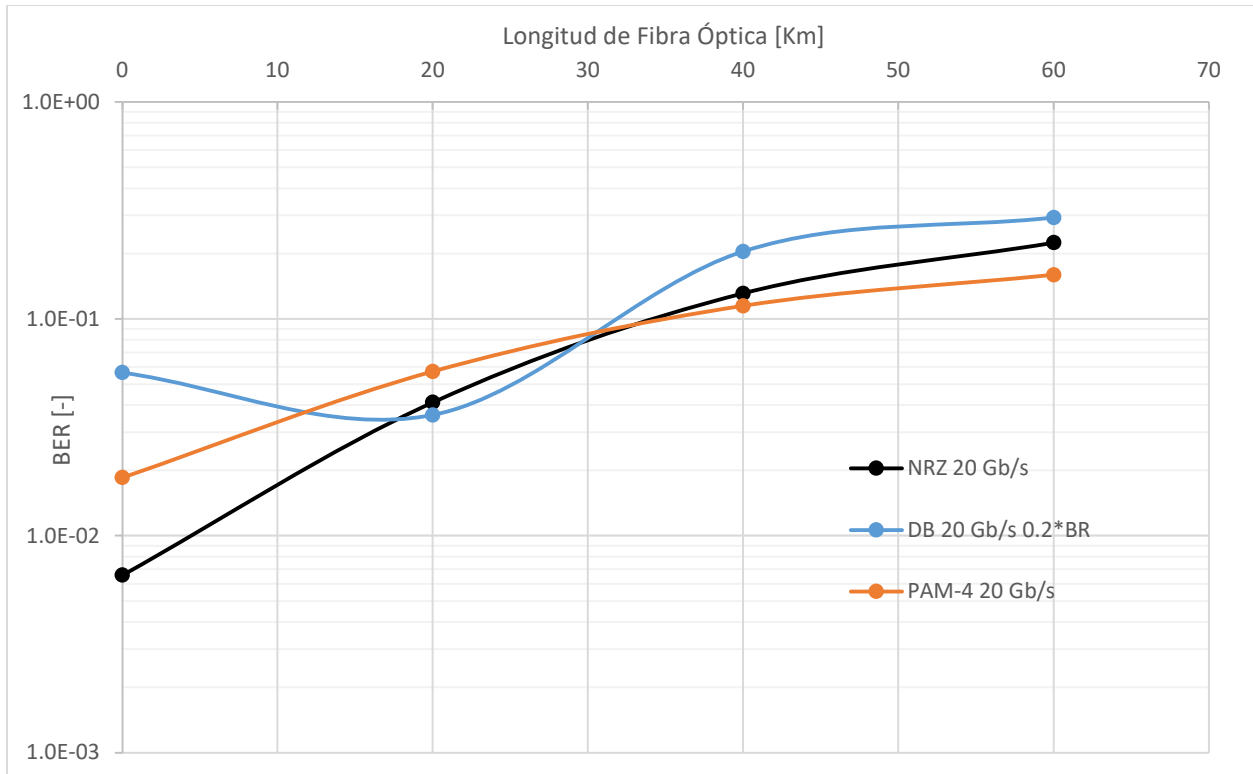


Figura 3.17 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER empleando el SOA con los tres formatos de modulación elegidos.

En la figura 3.17 se observa que NRZ presenta el mejor desempeño en el caso back-to-back, además de ser el único caso que cumple con el umbral de BER especificado. Para 20 [Km] de fibra óptica, la señal duobinaria tiene mejor desempeño que cuando se emplearon los otros formatos de modulación, a pesar de que la diferencia es muy pequeña y no se alcanza una BER aceptable. Para 40 y 60 [Km] de fibra óptica es PAM-4 el formato que presenta mejores resultados, pero en cualquiera de los casos la BER obtenida es tan alta que se pueden descartar. Es interesante observar que, cuando se usaron 20 [Km] de fibra óptica, a pesar de que no se alcanza un desempeño aceptable, los resultados obtenidos para los tres formatos de modulación están relativamente cerca del umbral de BER, por esta razón se decidió ampliar el estudio para esta longitud de fibra y descubrir la tasa de transmisión máxima a la que puede trabajar cada formato sin sobrepasar el umbral definido.

En la figura 3.18 se muestra el desempeño que tuvo el sistema óptico al usar el SOA como modulador y 20 [Km] de fibra para cada formato de modulación estudiado al variar la tasa de bits empleada. Todo esto con los valores de corriente de bombeo y potencia óptica de entrada al SOA ya definidos.

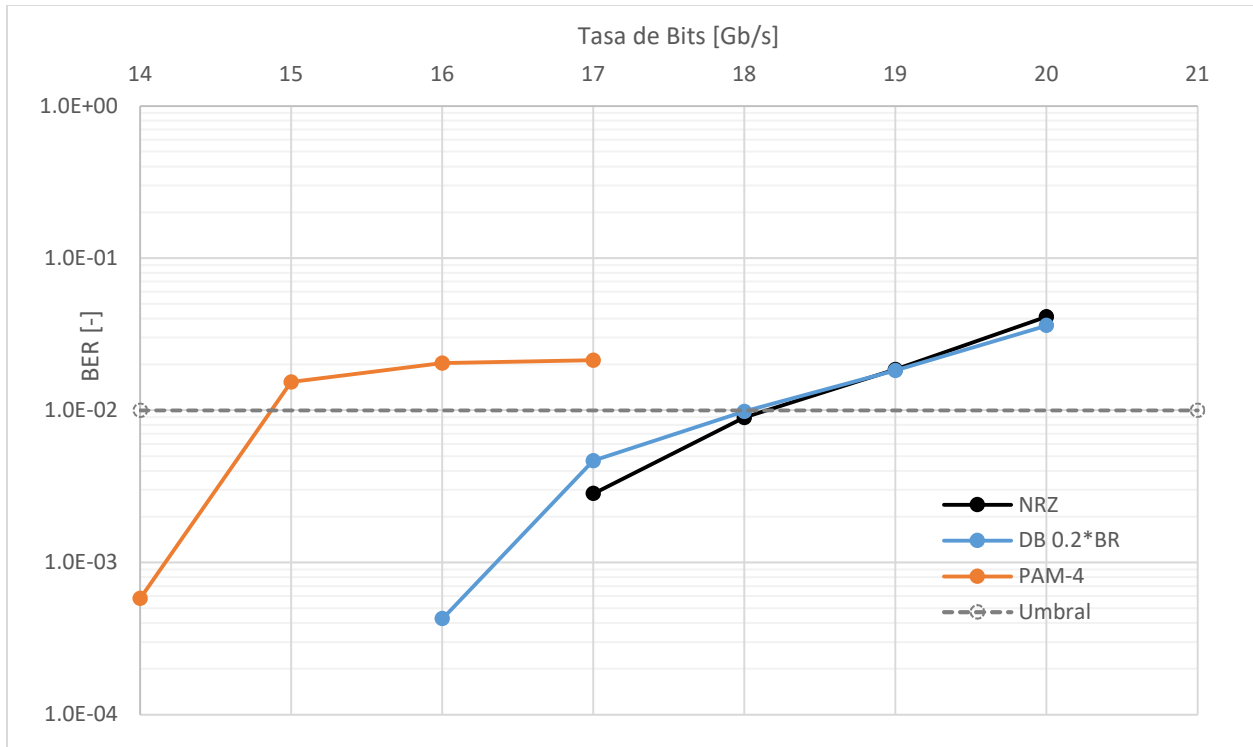


Figura 3.18 Curvas de tasa de bits vs. BER empleando el SOA con los tres formatos de modulación elegidos.

En la figura se pueden observar las tasas de transmisión máximas que se pueden alcanzar con cada formato de modulación sin sobrepasar el umbral de BER definido. En el caso de PAM-4 se pueden transmitir hasta 14 [Gb/s] obteniendo una BER muy por debajo del umbral, mientras que para NRZ y duobinario se pueden alcanzar hasta 18 [Gb/s] obteniendo una BER apenas por debajo del umbral. Estos dos últimos formatos muestran comportamientos muy similares, por lo que en un sistema sencillo sería prácticamente indistinto usar cualquiera de los dos. Sin embargo, si se quisiera enviar más información por la misma fibra óptica, el método más empleado es la multiplexión por división de longitud de onda (WDM), en donde se envían múltiples señales ópticas con distintas longitudes de onda por la misma fibra. En este caso sería mejor opción utilizar el formato de modulación duobinario porque la señal óptica generada ocupa menor ancho de banda que cuando se usa NRZ.

Cuando se usó el DML como transmisor del sistema óptico con una corriente de bombeo de 4 a 8 [mA] se obtuvieron los resultados más favorables para los tres formatos de modulación, como se explicó en el la sección 3.2. Al hacer pruebas con duobinario se obtuvieron los mejores resultados cuando se empleó una frecuencia de corte para el filtro paso-bajas de 0.25 veces la tasa de transmisión, como generalmente se utiliza. En la figura 3.19 se muestra el desempeño que tuvo cada uno de los formatos estudiados en el sistema con ruido al emplear una tasa de transmisión de 20 [Gb/s] y calcular la BER para distintas longitudes de fibra óptica.



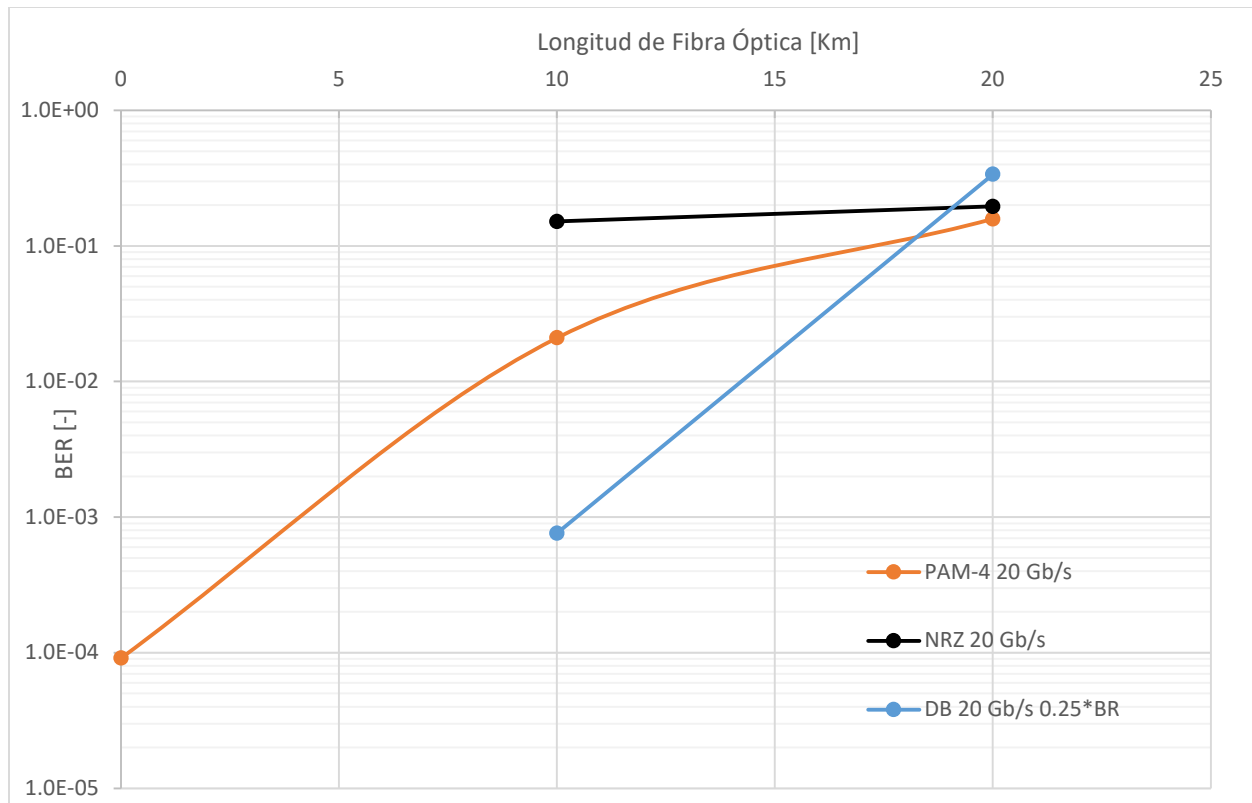


Figura 3.19 Curvas de longitud de la fibra óptica vs. BER empleando el DML con los tres formatos de modulación elegidos.

En la figura se muestra cómo, para el caso back-to-back, tanto NRZ como duobinario presentaron transmisiones sin errores, mientras que PAM-4 alcanzó una BER muy por debajo del umbral. Cuando se utilizó una fibra óptica de 10 [Km] de longitud, fue el formato de modulación duobinario el único que obtuvo una BER aceptable, mientras que PAM-4 apenas sobrepasó el umbral y NRZ presentó una BER muy alta, por lo que se puede descartar, al igual que cuando se emplearon 20 [Km] de fibra óptica con cualquiera de los formatos estudiados.

Se consideró que el caso más importante al emplear el DML como transmisor fue cuando se utilizó una fibra de 10 [Km] debido a que PAM-4 se acercó bastante al umbral y duobinario obtuvo una BER muy por debajo, por lo que se pensó en variar la tasa de transmisión en estos casos y calcular el desempeño del sistema para así encontrar la tasa máxima a la que puede trabajar cada formato sin superar el umbral definido, como se muestra en la figura 3.20.

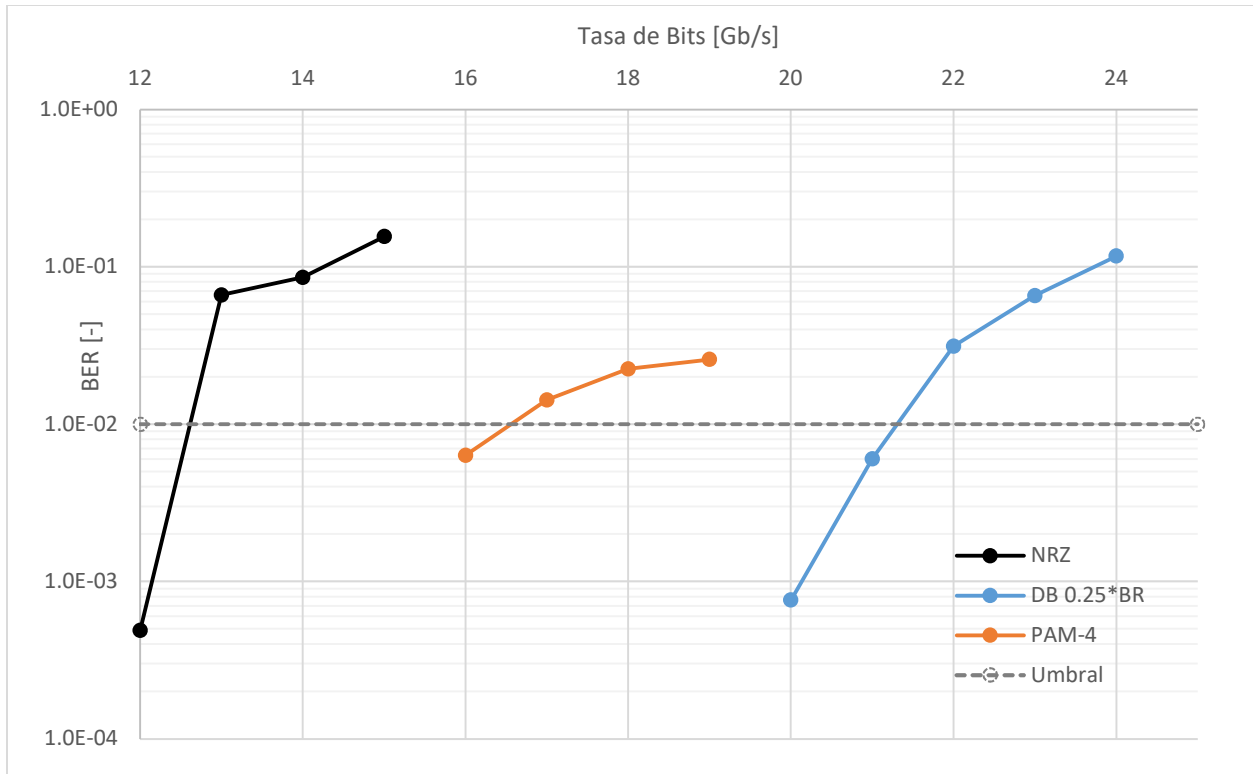


Figura 3.20 Curvas de tasa de bits vs. BER empleando el DML con los tres formatos de modulación elegidos.

En la figura se puede ver que al usar NRZ se pueden transmitir hasta 12 [Gb/s] con una BER bastante aceptable. Cuando se emplea PAM-4 se puede usar una tasa de hasta 16 [Gb/s] sin sobrepasar el umbral de BER definido. En el caso de duobinario se pueden alcanzar hasta 21 [Gb/s] y tener una BER por debajo del umbral, por lo que se cree que es el formato de modulación más conveniente al emplear un DML como transmisor óptico en un sistema con las características del que se presenta.

En la tabla 3.1 se muestran las tasas de transmisión máximas que se alcanzaron con cada transmisor y para cada formato de modulación estudiado sin superar el umbral de BER definido. De acuerdo a los estudios presentados a lo largo de este capítulo, se eligieron distintos parámetros para cada sistema simulado. En el caso del SOA como modulador óptico se empleó una fibra de 20 [Km] de longitud y en el caso del DML se usó una fibra de 10 [Km]. También cabe recalcar que se eligieron distintas frecuencias de corte del filtro paso-bajas para la modulación duobinaria, cuando se empleó el SOA se usó una frecuencia de corte de 0.2 veces la tasa de bits de la señal óptica, mientras que para el DML se usó una frecuencia de corte de 0.25 veces la tasa de bits, que es la que generalmente se utiliza.

|  | NRZ       | Duobinario | PAM-4     |
|--|-----------|------------|-----------|
| <b>Semiconductor Optical Amplifier (20 [Km])</b> | 18 [Gb/s] | 18 [Gb/s]  | 14 [Gb/s] |
| <b>Directly Modulated Laser (10 [Km])</b>        | 12 [Gb/s] | 21 [Gb/s]  | 16 [Gb/s] |

Tabla 3.1 Tasas de transmisión máximas logradas con cada transmisor y formato de modulación.

De la tabla se puede concluir que, cuando se emplea el SOA como modulador óptico, la modulación duobinaria es la mejor opción debido a que alcanza la misma tasa de transmisión que NRZ sin superar el umbral de BER definido, pero ocupa la cuarta parte del ancho de banda, con lo que se podrían enviar más

canales si se emplea un esquema como WDM, por ejemplo. Además, el uso de duobinario no aumentaría demasiado la complejidad del sistema comparado con NRZ, lo que lo hace aún más atractivo y costeable.

Al emplear el DML como transmisor óptico resultó que, al igual que con el SOA, la modulación duobinaria parece la mejor opción puesto que con ella se alcanza la mayor tasa de transmisión sin superar el umbral de BER definido y, de igual forma, se ahorra ancho de banda sin aumentar la complejidad del sistema.

Realizando una comparación del desempeño de ambos transmisores, se puede concluir que si lo que se requiere es un enlace óptico con una longitud mayor a 10 y menor a 20 [Km], entonces el SOA empleando modulación duobinaria es la mejor opción siempre y cuando no se requiera una tasa de transmisión mayor a 18 [Gb/s]. Si, por otro lado, se desea un enlace óptico con una longitud menor a 10 [Km], entonces el DML también empleando modulación duobinaria es la mejor opción puesto que permite una tasa de transmisión de hasta 21 [Gb/s].

### Referencias capítulo 3:

- [1] R. Gutiérrez-Castrejón, "Nonlinear dynamics of semiconductor optical amplifiers", Institute of Engineering, UNAM, 2012.
- [2] M. O'Mahony, "Semiconductor laser optical amplifiers for use in future fiber systems", Journal of lightwave technology, 1988.
- [3] D. Van Veen, V. Houtsma y A. L. Van Wijngaarden, "FEC code for 25/50/100G EPON", Nokia Bell Labs, USA, IEEE P802.3ca 100G-EPON Task Force Meeting, 2017.
- [4] G. P. Agrawal, "Fiber Optic Communication Systems", Wiley-Interscience, 2002.

## 4. Conclusiones.

En el presente proyecto de investigación se realizó el análisis y comparación de dos distintos transmisores ópticos propuestos para su implementación en redes ópticas pasivas: un transmisor basado en un amplificador óptico de semiconductor (SOA) empleado como modulador óptico y un láser modulado directamente (DML) basado en un láser de emisión superficial y cavidad vertical (VCSEL). Cada transmisor se probó con tres diferentes formatos de modulación: NRZ (Non-Return-to-Zero), duobinario y PAM-4 (Pulse Amplitude Modulation). Esto con el fin de tener un análisis más completo y determinar cuál formato era el más conveniente en términos de desempeño del sistema. Todos los resultados mostrados se obtuvieron mediante la simulación de cada sistema estudiado, empleando los modelos explicados en el capítulo 2 de esta aportación. A continuación, se presentan las conclusiones a las que se pudo llegar a lo largo de este proyecto.

1. Al estudiar el transmisor basado en un SOA empleado como modulador óptico de una señal NRZ se concluyó que para tener un buen desempeño del sistema y al mismo tiempo aprovechar la ganancia que ofrece el SOA se debía elegir una potencia óptica de entrada intermedia que no saturara el dispositivo y que conservara un factor de calidad alto, por lo que los valores para la potencia de entrada de mayor interés fueron 0 y 5 [dBm].
2. Se observó que al aumentar los dos límites de la corriente de bombeo NRZ mejoró el desempeño del sistema empleando el SOA como modulador. Para mejorar la razón de extinción de la señal óptica se debe aumentar la diferencia entre los límites de la corriente de bombeo, es decir, el swing de la señal eléctrica. La ganancia calculada para la señal óptica aumentó con la corriente de bombeo al igual que el factor de calidad, por lo que los valores para la corriente de mayor interés fueron de 300 a 500 [mA].
3. Al calcular la BER mediante conteo de bits en vez del factor de calidad resultó que el sistema podía alcanzar tasas de transmisión mayores sin presentar errores, por lo que se eligió una potencia óptica de entrada de 0 [dBm] y se redujo la corriente de bombeo a un rango de 200 a 400 [mA].
4. Cuando se calculó el desempeño del sistema para distintas longitudes de fibra óptica se hizo notorio el deterioro que provoca la fibra a la señal óptica y al trabajar con 20 [Gb/s] solo el caso back-to-back tuvo una BER menor al umbral de  $1 \times 10^{-2}$  definido.
5. Empleando modulación duobinaria y el SOA como modulador óptico se encontró la misma tendencia que al usar NRZ. Al aumentar la potencia de entrada al SOA mejoró el factor de calidad de la señal de salida, pero disminuyó la razón de extinción y al aumentar la corriente de bombeo también mejoró el desempeño del sistema, pero para aumentar la razón de extinción se debe incrementar la diferencia entre los límites de la corriente de bombeo. En el caso de la ganancia también se obtuvo la misma tendencia, al aumentar la potencia de entrada al SOA disminuyó su ganancia y al aumentar los valores de corriente de bombeo incrementó la ganancia proporcionada por el amplificador. Por lo anterior se eligió una potencia óptica de entrada al SOA de 0 [dBm] y una corriente de bombeo de 200 a 400 [mA] para hacer una comparación justa entre ambos formatos de modulación.
6. Se observó que cuando se utilizaron frecuencias de corte del filtro paso-bajas empleado para generar la señal duobinaria en el transmisor de  $0.3 \cdot BR$ ,  $0.35 \cdot BR$  y  $0.4 \cdot BR$ , se logró un mejor desempeño que al usar la frecuencia de corte estándar de  $0.25 \cdot BR$  en configuración back-to-back. Sin embargo, al agregar una fibra óptica de 20 [Km], sólo el caso para el cual se usó una frecuencia de corte de  $0.2 \cdot BR$  tuvo mejor desempeño que el caso estándar, aunque ya superaba el umbral de

BER definido. Para mayores longitudes de fibra la BER obtenida fue tan alta para todas las frecuencias de corte estudiadas que estos casos fueron descartados.

7. Al emplear modulación PAM-4, de nuevo se pudo observar el impacto de la fibra óptica en el desempeño del sistema y sólo cuando se trabajó con una tasa de 16 [Gb/s] se alcanzó una BER aceptable en el caso back-to-back y cercana, aunque superior al umbral, para 20 [Km] de fibra óptica.
8. Cuando se empleó el SOA como modulador, para los tres formatos analizados se obtuvo una ganancia igual o poco mayor a 15.9 [dB] a partir de que se eligieron los valores de corriente de bombeo y potencia óptica de entrada al amplificador ya mencionados.
9. En el caso del láser modulado directamente no se alcanzaron longitudes tan grandes de fibra óptica debido a que tiene una potencia de salida mucho menor que en el caso del SOA. Al realizar pruebas empleando modulación NRZ se eligió una corriente de bombeo de 4 a 8 [mA] y se lograron transmisiones sin errores en el caso back-to-back para tasas de transmisión de 16 y 20 [Gb/s] y, al agregar fibra óptica, ningún caso obtuvo una BER por debajo del umbral establecido.
10. Al probar el DML con modulación duobinaria se alcanzaron BER's por debajo del umbral al usar frecuencias de corte para el filtro paso-bajas de  $0.2 \cdot BR$ ,  $0.25 \cdot BR$  y  $0.3 \cdot BR$  hasta 10 [Km] de fibra con el sistema trabajando a 20 [Gb/s], pero fue cuando se empleó una frecuencia de corte para el filtro paso-bajas de  $0.25 \cdot BR$  que se logró mejor desempeño del sistema.
11. Empleando PAM-4 con el DML los resultados mostraron que para una longitud de fibra hasta 10 [Km] se alcanzó una BER por debajo del umbral cuando se trabajó con una tasa de transmisión de 16 [Gb/s] y una BER muy cercana pero que supera el umbral para una tasa de 20 [Gb/s].
12. Cuando se empleó el SOA como modulador óptico, los resultados al calcular la BER para distintas longitudes de fibra óptica en el sistema con ruido trabajando con una tasa de transmisión de 20 [Gb/s] mostraron que NRZ obtuvo el mejor desempeño en el caso back-to-back, además de ser el único caso que alcanzó una BER por debajo del umbral especificado. Para 20 [Km] de fibra óptica, la señal duobinaria tuvo mejor desempeño que cuando se emplearon los otros formatos de modulación, a pesar de que la diferencia entre los tres fue muy pequeña y no se alcanzó una BER por debajo del umbral, aunque relativamente cercana. Para longitudes más grandes de fibra la BER obtenida con los tres formatos de modulación fue tan alta que se descartaron. La tasa de transmisión máxima a la que logró trabajar PAM-4 con 20 [Km] de fibra óptica fue de 14 [Gb/s] obteniendo una BER muy por debajo del umbral, mientras que NRZ y duobinario alcanzaron hasta 18 [Gb/s] obteniendo una BER apenas por debajo del umbral.
13. Ocupando el DML como transmisor, al calcular la BER para distintas longitudes de fibra óptica en el sistema con ruido trabajando con una tasa de transmisión de 20 [Gb/s] se observó que en el caso back-to-back, tanto NRZ como duobinario presentaron transmisiones sin errores, mientras que PAM-4 alcanzó una BER muy por debajo del umbral. Cuando se utilizó una fibra óptica de 10 [Km] de longitud, fue el formato de modulación duobinario el único que obtuvo una BER aceptable, mientras que PAM-4 apenas sobrepasó el umbral y NRZ presentó una BER muy alta, al igual que para longitudes mayores de fibra con cualquiera de los formatos estudiados. La tasa máxima a la que logró trabajar NRZ fue de 12 [Gb/s] con una BER bastante aceptable. Cuando se empleó PAM-4 se pudo usar una tasa de hasta 16 [Gb/s] sin sobrepasar el umbral de BER definido. En el caso de duobinario, se alcanzó una tasa de hasta 21 [Gb/s] con una BER por debajo del umbral.
14. Si se emplea el SOA estudiado como modulador óptico, entonces el formato de modulación duobinario es la mejor opción debido a que con este formato se alcanzó la misma tasa de transmisión que con NRZ sin superar el umbral de BER definido, con la diferencia de que una señal

duobinaria ocupa la cuarta parte del ancho de banda que utiliza una señal NRZ. Gracias a esto se podrían enviar más canales si se tiene una red con tecnología WDM, por ejemplo. De igual forma, si se emplea el DML estudiado, la modulación duobinaria parece la mejor opción puesto que con ella se alcanzó la mayor tasa de transmisión sin superar el umbral de BER definido, además del ahorro de ancho de banda que conlleva.

15. Si se compara el desempeño de los dos transmisores ópticos analizados a lo largo de este proyecto, se puede determinar que, si se desea un enlace óptico con una longitud menor a 10 [Km], entonces el DML empleando modulación duobinaria es la mejor opción para emplear como transmisor puesto que permite una tasa de hasta 21 [Gb/s]. Por otro lado, si lo que se requiere es un enlace óptico con una longitud mayor a 10 y menor a 20 [Km], entonces el SOA empleando modulación duobinaria es la mejor opción siempre y cuando no se necesite una tasa de transmisión mayor a 18 [Gb/s].