

Análisis mediante simulación de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA en sistemas monocanal

Yessenia V. Padilla¹, Andrea C. Pavón², María S. Jiménez³
Escuela Politécnica Nacional

Resumen – En el presente trabajo se realiza una breve descripción de los amplificadores ópticos, su principio de funcionamiento, componentes y características. Posteriormente se incluyen los escenarios de simulación utilizados para el estudio de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA considerando sistemas monocanal, en función de los parámetros de ganancia, figura de ruido (Noise Figure, NF), relación señal a ruido óptica (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) y tasa de bits errados (Bit Error Rate, BER). Luego, se analizan los resultados obtenidos en las simulaciones de cada amplificador respecto de los parámetros de bandas de operación, potencia de entrada y sistema de bombeo. Finalmente, se presentan las conclusiones del análisis realizado.

Índices – EDFA, Raman, SOA, figura de ruido y OSNR.

I. INTRODUCCIÓN

Los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erblio (EDFA), Raman y de semiconductor (SOA) son un componente clave en el despliegue de los sistemas de comunicaciones ópticas actuales y han hecho posible la transmisión de información a altas velocidades, en enlaces desde cientos de kilómetros hasta distancias transoceánicas, proporcionando la capacidad necesaria para su implementación en redes de comunicaciones futuras.

El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento de los amplificadores ópticos de fibra EDFA, Raman y de semiconductor (SOA), en sistemas monocanal, mediante la contrastación de su fundamento teórico y los resultados alcanzados en las diferentes simulaciones realizadas.

II. AMPLIFICADORES ÓPTICOS

En esta sección se describen los parámetros característicos de los amplificadores ópticos; así como también, el principio de funcionamiento y características de cada uno de ellos.

A. Parámetros característicos

De acuerdo a la recomendación ITU-T G.661 (Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos pertinentes de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos), se definen los principales parámetros que caracterizan a los amplificadores ópticos:

Figura de ruido (Noise Figure, NF): Indica la degradación que un amplificador óptico presenta en la relación señal a ruido (Signal to Noise Ratio, SNR), expresada en dB.

Emisión espontánea amplificada (Amplified Spontaneous Emission, ASE): Ruido existente en los amplificadores ópticos debido al proceso de emisión espontánea, expresada en dBm.

Potencia de salida de saturación: Potencia óptica de salida, para la cual la ganancia se reduce 3 dB con respecto a la ganancia de pequeña señal.

Relación señal a ruido óptica (Optical Signal to Noise Ratio, OSNR) [1]: Representa la relación entre la potencia de señal y ruido óptico.

B. EDFA: Principio de funcionamiento

Un amplificador de fibra dopada con erbio consta esencialmente de una sección corta de fibra con su núcleo dopado con erbio, añadido al vidrio en forma de un ion (Er^{+3}). La amplificación ocurre por emisión estimulada, en la que una señal de bombeo externa excita los iones de erbio, para que cedan su energía a los fotones de la luz débil que ingresa a ser amplificada [3].

La longitud de la fibra dopada varía acorde con la longitud de onda de trabajo, así en banda C es de 5 a 10 m, en banda L es de 30 a 100 m. Su ganancia típicamente oscila entre 15 y 45 dB. Emplea dos longitudes de onda de bombeo de 980 y 1480 nm para amplificar luz de una longitud de onda superior a la de bombeo. Su figura de ruido (NF) depende de la longitud de onda de bombeo; así, a 980 nm la NF varía entre 5 y 6 dB y, para 1480 nm entre 6 y 7 dB típicamente. Puede utilizar más de una fuente de bombeo cuyas potencias están aproximadamente entre 100 y 350 mW. Su potencia de saturación suele ser de +10 a +20 dBm y trabaja con potencias de entrada usuales entre -30 y 10 dBm.

C. Raman: Principio de funcionamiento

Los amplificadores Raman basan su funcionamiento en el efecto no lineal de scattering estimulado de Raman (Stimulated Raman Scattering, SRS), que tiene lugar cuando un bombeo de alta intensidad atraviesa un medio, en este caso una fibra óptica altamente no lineal que es la que realizarla amplificación, por la cual se transfiere una pequeña fracción de potencia de un campo óptico a otro campo cuya frecuencia se encuentra desplazada de la frecuencia de la fuente de bombeo [4].

Opera en las bandas C, L y una porción de la banda S (longitudes de onda entre 1498 nm y 1529 nm). Su ganancia usualmente alcanza valores entre 10 y 40 dB. Opera con potencias de entrada típicas entre -40 y 5 dBm. Su Figura de ruido (NF) suele estar entre 3 y 6 dB. La ganancia del Raman

Y. V. Padilla (email: yessenia.padilla@epn.edu.ec).

A. C. Pavón (email: andrea.pavon@epn.edu.ec).

M. S. Jiménez (e-mail: maria.jimenez@epn.edu.ec).

es dependiente de la longitud de la fibra no lineal, ya que crece conforme aumenta dicha longitud hasta que ocurre el agotamiento de la fuente de bombeo. La potencia de bombeo varía acorde a la banda de operación, así para banda S está entre 300 mW y 600 mW, para banda C entre 430 mW y 800 mW y para banda L entre 1 W y 1.2 W.

Utiliza múltiples fuentes de bombeo a diferentes longitudes de onda para alcanzar una ganancia plana en una gran región espectral. [5]

D. SOA: Principio de funcionamiento

Un SOA es un dispositivo optoelectrónico capaz de amplificar una señal fotónica que atraviesa el medio activo, bajo condiciones de operación específicas. Una señal débil entra a la guía de onda de semiconductor para ser amplificada; esto sucede mientras el SOA se encuentra en la región activa y está polarizado de manera adecuada. Se debe aplicar una corriente eléctrica que permita disponer de una gran concentración de portadores en la cavidad activa y con ello obtener una ganancia óptica debido a la emisión estimulada que se produce en el SOA. [6] [7]

El SOA opera en banda O y C con ganancias usualmente mayores a 15 dB, pero inferiores a las del EDFA y Raman. Tiene niveles altos de figura de ruido (NF) entre 12 y 14 dB para banda O y entre 7 y 11,5 dB para banda C. Utiliza bombeo eléctrico, ya que se le inyecta una corriente, con un valor típico de 500 mA. Su potencia de salida de saturación está entre 14 y 17 dBm. El SOA introduce muy alto crosstalk cuando se utiliza en sistemas multicanal WDM, por lo que no resulta adecuado en tales sistemas. [8] [9]

III. ESQUEMAS PARA SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA

Como software de simulación se utilizó OptiSystem, por la funcionalidad y facilidades que ofrece para los fines de esta investigación. En las Fig. 1 y 2 se muestran los esquemas de simulación empleados para los amplificadores de fibra y SOA respectivamente. A continuación, se describen brevemente los componentes de los esquemas de simulación utilizados.

Fuente de luz: Genera una señal láser a la potencia y longitud de onda que se desee.

Amplificador: En el componente Erbium Doped Fiber se configura la longitud de la fibra dopada con erbio para el EDFA, en el componente Raman Amplifier se configura la longitud de la fibra no lineal que requiere dicho amplificador y, en el SOA se configura la corriente de excitación del mismo.

Visualizadores: Se utilizan para mostrar las características de la señal de entrada y señal de salida de los amplificadores.

Acoplador selectivo de longitud de onda: También conocido como acoplador WDM, se utiliza para combinar o separar la señal de bombeo de la señal óptica a ser amplificada.

Aislador óptico: Dispositivo que transmite luz en una única dirección, con la finalidad de evitar la inserción de señales de ruido interno del amplificador en las entradas y salidas del mismo.

Sistema de bombeo: Sólo requerido en los amplificadores EDFA y Raman que utilizan una fuente de bombeo láser, en la que se configura los parámetros de longitud de onda y potencia acorde a las especificaciones de cada uno de los

amplificadores. El nivel de ganancia es similar tanto con un bombeo codireccional como contradiereccional; mientras que con un bombeo bidireccional se alcanza niveles superiores de ganancia. Un bombeo contradiereccional produce figuras de ruido (NF) superiores a las de un bombeo codireccional y bidireccional.

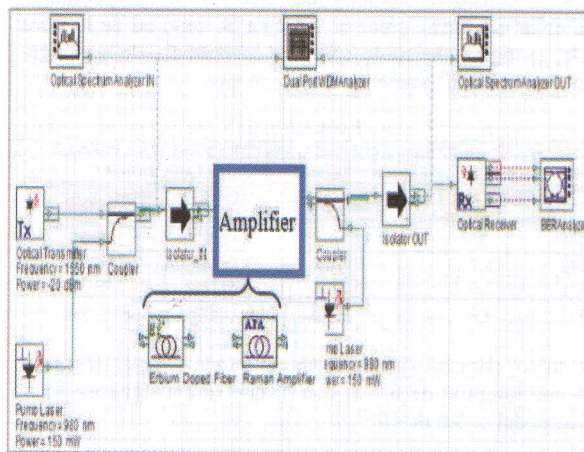


Fig. 1. Esquema de simulación de los amplificadores de fibra EDFA y Raman

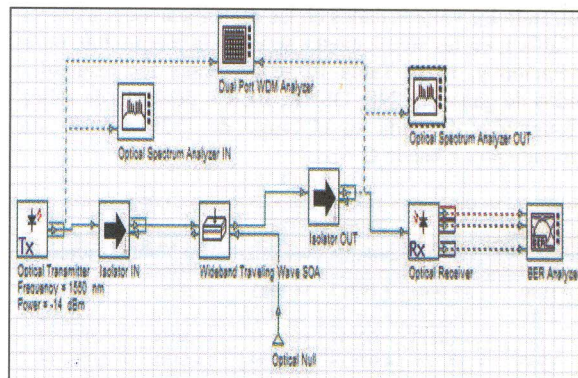


Fig. 2. Esquema de simulación del amplificador de semiconductor SOA

IV. SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA

A. EDFA en sistemas monocanal

En esta sección se presenta la simulación de un EDFA en sistemas monocanal, tomando como ejemplo una configuración de bombeo codireccional. Los parámetros característicos de cada componente se configuraron de acuerdo a las especificaciones técnicas de un amplificador EDFA comercial, que se presenta en la Tabla I.

TABLA I

PARÁMETROS TOMADOS DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL EDFA

| Parámetros | Mín | Máx | Unidad |
|------------------------------|-------------|-----|--------|
| Bandas de operación | C y L | | - |
| Potencia de entrada | -30 | 10 | dBm |
| Potencia de bombeo @ 980 nm | 100 | 350 | mW |
| Potencia de bombeo @ 1480 nm | 120 | 350 | mW |
| Ganancia | | >30 | dB |
| Potencia de salida | 10 | 24 | dBm |
| Figura de ruido (NF) | 5 | 7 | dB |
| Velocidad de transmisión | 10, 40, 100 | | Gbps |

1) Elección de la fibra dopada con erbio

La longitud de la fibra dopada con erbio se elige de acuerdo con los parámetros de ganancia, figura de ruido (NF) y tasa de bits errados (BER) que se espera tenga la señal amplificada.

En la Tabla II, se muestran los resultados obtenidos para banda C, mediante simulación, variando la longitud de la fibra dopada. Se consideró una longitud entre 5 y 10 m; y, como se puede notar conforme crece el valor de la longitud de la fibra dopada, la figura de ruido (NF) se incrementa, la ganancia disminuye y el BER aumenta drásticamente.

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL EDFA PARA LA ELECCIÓN DE LA LONGITUD DE FIBRA DOPADA PARA BANDA C

| | Erbium Doped Fiber Length (m) | Gain (dB) | Noise Figure (dB) | Min. BER |
|---|-------------------------------|-----------|-------------------|----------|
| 1 | 5 | 38,1867 | 3,37582 | 5,36E-25 |
| 2 | 6,7 | 37,245 | 3,75789 | 7,31E-21 |
| 3 | 7,6 | 36,3831 | 3,99239 | 1,18E-17 |
| 4 | 10 | 31,5702 | 4,71994 | 2,60E-04 |

Por tanto, para las simulaciones en banda C posteriores, se eligió una longitud de 6,7 m con la que se consigue un BER excelente, del orden de 10^{-21} .

2) Visualización de resultados

Utilizando los valores dados en las especificaciones técnicas de la Tabla I, en las simulaciones se varió la longitud de onda de operación y, en la Tabla III se presentan los resultados obtenidos de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para longitudes de onda en el rango de 1530 a 1560 nm correspondientes a banda C.

RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL EDFA EN BANDA C CON BOMBEO CODIRECCIONAL

| | Wavelength (nm) | Gain (dB) | NF(dB) | OSNR (dB) | Out. Power (dBm) | BER |
|---|-----------------|-----------|---------|-----------|------------------|----------|
| 1 | 1530 | 37,9094 | 3,49317 | 34,3983 | 17,9036 | 2,38E-19 |
| 2 | 1540 | 35,1797 | 4,39077 | 33,5292 | 15,1738 | 1,33E-08 |
| 3 | 1550 | 35,8113 | 4,02531 | 33,9227 | 15,8054 | 6,03E-15 |
| 4 | 1560 | 34,524 | 4,07025 | 33,9059 | 14,5181 | 2,27E-16 |

En la Fig. 3 se muestra el espectro de potencia de salida del EDFA, en el que se observa una potencia de 17,90 dBm a una longitud de onda de 1530 nm, y un BER del orden de 10^{-19} .

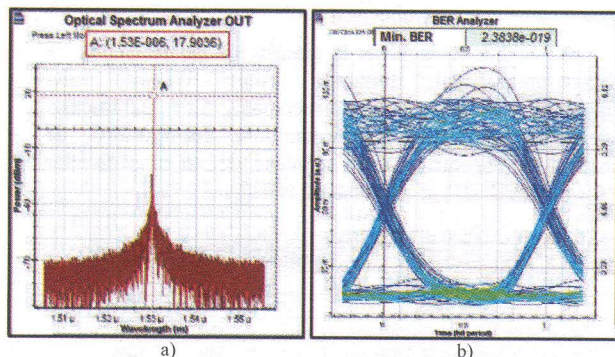


Fig. 3. a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo codireccional

B. Raman en sistemas monocanal

En esta sección se analiza un sistema monocanal con un amplificador Raman considerando una configuración de bombeo codireccional. Para las simulaciones, se toma como referencia las especificaciones técnicas de un amplificador Raman comercial dadas en la Tabla IV.

PARÁMETROS TOMADOS DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RAMAN

| Parámetros | Mín | Máx | Unidad |
|-----------------------------|--------------|------|--------|
| Bandas de operación | S, C y L | | - |
| Potencia de entrada | -40 | 5 | dBm |
| Potencia de bombeo @ S band | 300 | 600 | mW |
| Potencia de bombeo @ C band | 430 | 800 | mW |
| Potencia de bombeo @ L band | 1000 | 1200 | mW |
| Ganancia | 10 | 40 | dB |
| Figura de ruido (NF) | 3 | 6 | dB |
| Velocidad de transmisión | 10, 40 y 100 | | Gbps |

1) Elección de la fibra no lineal

La longitud de la fibra no lineal se elige de acuerdo con los parámetros de ganancia, figura de ruido (NF) y tasa de bits errados (BER) que se espera tenga la señal amplificada.

En la Tabla V se muestran los resultados obtenidos para banda C, mediante simulación, variando la longitud de la fibra no lineal entre 10 y 100 km, y como se puede notar conforme el valor de dicha longitud crece, tanto la figura de ruido NF como el BER aumentan, mientras que la ganancia se incrementa hasta un cierto valor (35,77 dB) y posteriormente disminuye; esto ocurre debido al agotamiento excesivo de la fuente de bombeo, que ocasiona que no exista suficiente inversión de la población, fenómeno necesario para la amplificación.

COMPARACIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL AMPLIFICADOR RAMAN PARA LA ELECCIÓN DE LA FIBRA NO LINEAL EN BANDA C

| | Length (Km) | Gain (dB) | Noise Figure (dB) | Min BER |
|---|-------------|-----------|-------------------|----------|
| 1 | 10 | 17,958 | 4,044 | 2,18E-26 |
| 2 | 25 | 31,334 | 4,562 | 1,25E-24 |
| 3 | 50 | 35,776 | 6,333 | 1,22E-16 |
| 4 | 75 | 34,192 | 9,519 | 3,99E-08 |
| 5 | 100 | 30,656 | 13,769 | 2,41E-03 |

2) Visualización de resultados

En la Tabla VI se presentan los resultados obtenidos mediante simulación para la ganancia, NF, OSNR, potencia de salida y BER, para diferentes longitudes de onda de trabajo en el rango de 1535 a 1565 nm, correspondientes a banda C.

RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL RAMAN EN BANDA C Y BOMBEO CODIRECCIONAL

| | Wavelength (NM) | GAIN (DB) | Nf (DB) | OSNR (DB) | OUTPUT: POWER (DBM) | BER |
|---|-----------------|-----------|---------|-----------|---------------------|----------|
| 1 | 1535 | 24,25 | 4,205 | 33,707 | 4,253 | 3,07E-23 |
| 2 | 1545 | 28,13 | 4,065 | 33,871 | 8,131 | 3,75E-25 |
| 3 | 1555 | 31,47 | 3,955 | 34,008 | 11,466 | 2,20E-17 |
| 4 | 1565 | 29,04 | 3,904 | 34,087 | 9,041 | 5,28E-20 |

En la Fig. 4 se observa el espectro de potencia de la señal de salida, identificándose un valor de 11,46 dBm a una longitud

de onda de 1555 nm; así como el correspondiente diagrama del ojo con un BER excelente del orden de 10^{-17} .

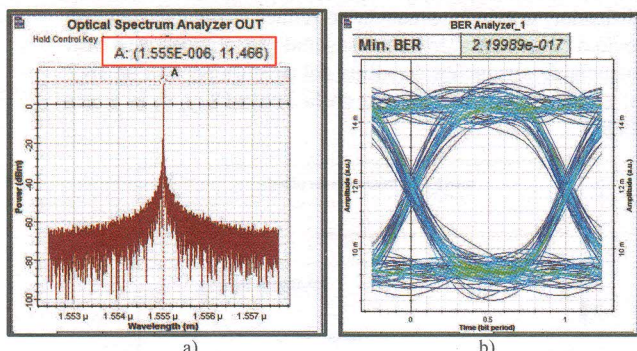


Fig. 4. a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo codireccional

C. SOA en sistemas monocanal

El SOA a diferencia de los amplificadores de fibra EDFA y Raman, tiene un medio activo constituido por material semiconductor y un sistema de bombeo que es dependiente de la corriente inyectada. Para la configuración de los parámetros característicos del SOA se toma como referencia las especificaciones técnicas de un amplificador SOA comercial, de acuerdo a la Tabla VII.

PARÁMETROS TOMADOS DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SOA

| Parámetros | Mín | Máx | Unidad |
|----------------------------------|---|------|--------|
| Banda de operación | O, C | | - |
| Potencia de entrada | -15 | 3 | dBm |
| Corriente de operación | 450 | 600 | mA |
| Ganancia | 15 | 30 | dB |
| Figura de ruido (NF) | 7 a 11,5 @ Banda C 12 a 14 @ Banda O | | dB |
| Potencia de salida de saturación | 10 | 16 | dBm |
| Velocidad de transmisión | 155 M | 10 G | bps |

2) Visualización de resultados

En la Tabla VIII se presentan los resultados obtenidos de la simulación para banda C, de los parámetros de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida del SOA para longitudes de onda en el rango de 1530 a 1560 nm, correspondientes a dicha banda.

RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SOA EN BANDA C

| | Wavelength (nm) | Gain (dB) | NF (dB) | OSNR (dB) | Output Power (dBm) | BER |
|---|-----------------|-----------|---------|-----------|--------------------|----------|
| 1 | 1530 | 26,53 | 10,45 | 38,39 | 12,52 | 4,72E-27 |
| 2 | 1540 | 27,05 | 10,35 | 39,46 | 13,04 | 8,48E-20 |
| 3 | 1550 | 27,18 | 10,13 | 39,63 | 13,17 | 1,62E-24 |
| 4 | 1560 | 27,08 | 9,49 | 39,19 | 13,07 | 2,08E-36 |

En la Fig. 5 se muestra el espectro de potencia de la señal de salida del SOA, que presenta un valor de 13,17 dBm a una longitud de onda de 1550 nm; así como también el respectivo diagrama del ojo donde se observa que el BER alcanzado es del orden de 10^{-24} .

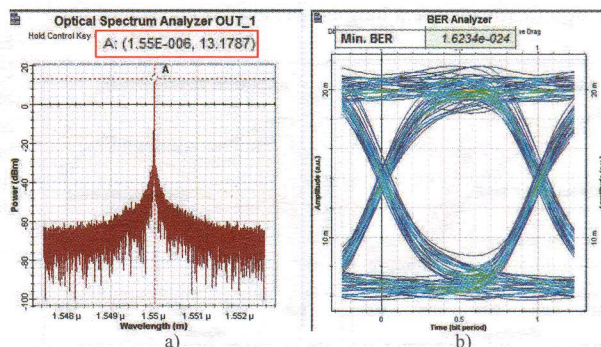


Fig. 5. a) Espectro de potencia de señal de salida y b) Diagrama del ojo para el SOA en banda C

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se contrastan los resultados obtenidos mediante simulación con lo que señala la teoría de los amplificadores ópticos, la recomendación ITU-T G661 y las especificaciones técnicas de amplificadores comerciales, tomando como referencia algunos de los parámetros de la Tabla IX.

TABLA IX
PARÁMETROS TOMADOS COMO REFERENCIA PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA

| Parámetro | EDFA | Raman | SOA |
|--|--|---|---|
| Banda de operación | C y L | S, C, y L | O y C |
| Longitud de la fibra dopada con Erblio (m) | 5 a 10 @ Banda C 30 a 100 @ Banda L | N/A | N/A |
| Ganancia(dB) | 30 a 50 | 5 a 40 | 15 a 25 |
| Figura de ruido (dB) | 5-6 dB@980nm 6-7 dB@1480nm | 3 a 6 | 7 a 11,5 @ Banda C 12 a 14 @ Banda O |
| Pin (dBm) | -30 a 5 | -40 a 5 | -15 a 3 |
| Psat (dBm) | 10 a 20 | >15 | 14 a 17 |
| Sistema de bombeo | Longitud de onda de bombeo | | Corriente (mA) |
| | 980 y 1480 (nm) | 100 nm bajo la longitud de onda de operación. | 400 a 600 |
| | Potencia de bombeo (mW) | | |
| Velocidad de transmisión | 10, 40 y 100 (Gbps) | 155 Mbps a 10 Gbps | |

A. EDFA, Raman y SOA en sistemas monocanal

1) Análisis comparativo del EDFA en sistemas monocanal

A continuación, se contrasta los resultados obtenidos mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla IX y en la fundamentación teórica del EDFA.

a) Bandas de operación para el EDFA

En las simulaciones realizadas se varió la longitud de la fibra dopada con erbio de 5 a 10 m, obteniéndose para dichas longitudes amplificación en banda C para el EDFA; así, en la Fig. 6a se observa que la ganancia en las longitudes de onda de 1530 a 1565 nm es superior a 25 dB, sin embargo, ésta

decae significativamente a longitudes de onda mayores a 1565 nm.

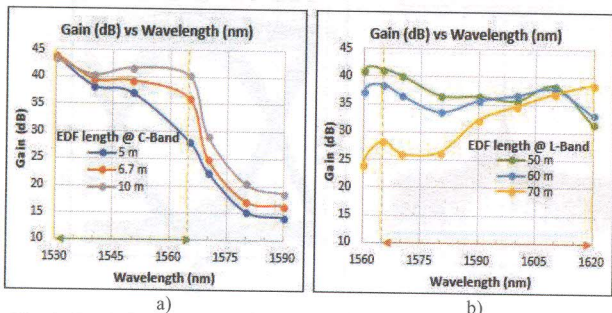


Fig. 6. Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda con diferentes longitudes de fibra dopada para a) banda C y b) banda L

Posteriormente se varió la longitud de la fibra dopada entre 30 y 100 m, verificando que con valores de 50, 60 y 70 m se tiene amplificación con ganancias superiores a 25 dB en una porción de banda L, ver Fig. 6b.

Adicionalmente, se probó al amplificador EDFA en banda S, observándose que en longitudes de onda menores a 1500 nm no existe amplificación, tal como se registran los valores de ganancia 0 en la Tabla X, corroborando lo señalado en la teoría de que el EDFA no opera en banda S.

TABLA X

RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL EDFA EN UNA PORCIÓN DE LONGITUDES DE ONDA DE BANDA S

| | Wavelength (nm) | Gain (dB) | Noise Figure (dB) | Output: OSNR (dB) | Output Power (dBm) |
|---|-----------------|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|
| 1 | 1480 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 1490 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1500 | 4,69748 | 8,78544 | 29,2177 | -15,3097 |
| 5 | 1520 | 23,6177 | 6,89903 | 30,9662 | 3,6105 |
| 6 | 1530 | 41,4672 | 3,80881 | 34,0812 | 21,46 |

b) Potencia de entrada al amplificador EDFA

En la Fig. 7 se presenta la curva de ganancia del EDFA obtenida en función de la longitud de onda de banda C, para diferentes valores de potencia de entrada al amplificador, considerando un rango de pequeña señal de -30 a 5 dBm. De la figura se desprende que a medida que se va incrementando el valor de la potencia de entrada al amplificador, la ganancia toma valores más bajos, pero presenta una curva más plana a lo largo de la longitud de onda en banda C, tal como lo señala la teoría del EDFA.

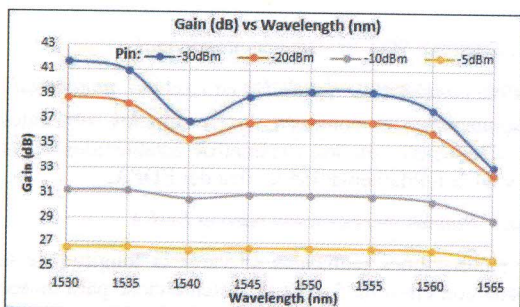


Fig. 7. Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada

Para el análisis de la potencia de salida de saturación del EDFA, se consideró una longitud de onda de 1540 nm. En la Fig. 8 el punto A marca la potencia de saturación de salida del amplificador, donde la ganancia se reduce 3 dB (31 dB) con respecto a la ganancia de pequeña señal (34 dB). En este caso la potencia de saturación de salida del amplificador es de 16,2 dBm; corroborando lo expuesto en la Tabla IX y en la teoría del EDFA.

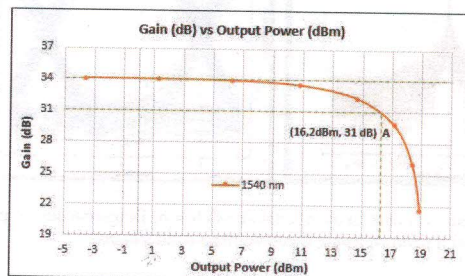


Fig. 8. Ganancia del EDFA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1540 nm con bombeo codireccional

c) Longitud de onda de bombeo para el EDFA

A continuación, se simula el comportamiento del EDFA en banda C en función de las dos alternativas de longitud de onda de bombeo, 980 y 1480 nm.

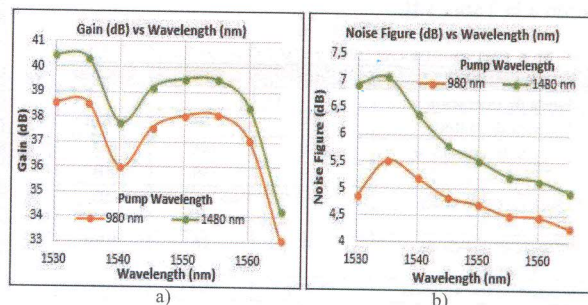


Fig. 9. a) Ganancia y b) Figura de ruido del EDFA en banda C con longitudes de onda de bombeo de 980 nm y 1480 nm

De acuerdo a la Fig. 9a, con una longitud de onda de bombeo de 1480 nm se obtienen ganancias más altas (34 a 41 dB) que con una longitud de onda de bombeo de 980 nm (33 a 38,5 dB); lo que valida lo señalado en la teoría del EDFA que con un bombeo a 1480 nm se consigue una mayor ganancia que con un bombeo de 980 nm.

Así también en la Fig. 9b se puede notar que la figura de ruido a una longitud de onda de bombeo de 980 nm está en un rango de 4 a 5,5 dB; en tanto que para una longitud de onda de bombeo de 1480 nm la NF alcanza valores entre 5,5 y 7 dB; así pues, la simulación ratifica que los valores de NF están acorde a los dados en la Tabla IX.

d) Potencia de bombeo para el EDFA

En la Fig. 10 se muestra las curvas de ganancia en función de la potencia de bombeo aplicada, operando en las longitudes de onda de 1550 y 1560 nm. En dicha figura se aprecia que conforme se va incrementando la potencia de bombeo la ganancia crece, así utilizando potencias mayores a los 100 mW se obtienen ganancias superiores a los 30 dB.

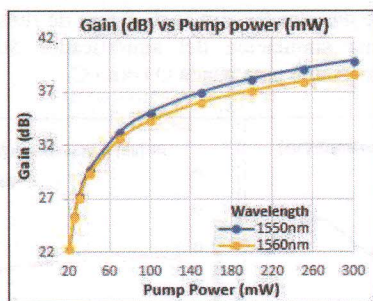


Fig. 10. Ganancia en función de la potencia de bombeo con longitudes de onda de 1550 y 1560 nm

2) Análisis comparativo del Raman en sistemas monocanal

Se procede a contrastar para el amplificador Raman los resultados obtenidos mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla IX, trabajando en este caso con un bombeo bidireccional.

a) Bandas de operación para el Raman

Se hizo la simulación para obtener la respuesta de frecuencia del amplificador Ramán, en un rango de longitudes de onda desde 1498 hasta 1615 nm, correspondiente a las bandas S, C y L.

A continuación, en la Fig. 11 se muestran las curvas de ganancia obtenidas en las respectivas bandas de operación, verificándose que el rango de longitudes de onda de operación del amplificador Raman va desde 1498 nm (banda S) hasta 1615 nm (banda L), de acuerdo a lo que establece la teoría del Raman.

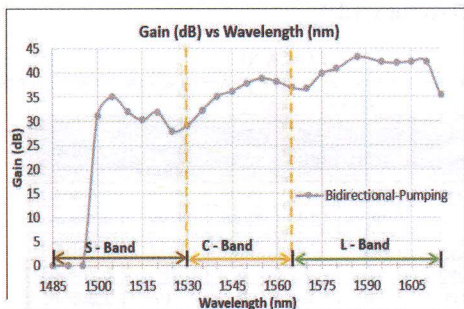


Fig. 11. Ganancia del Raman en función de la longitud de onda con bombeo bidireccional

Se confirma también que el pico de ganancia en cada una de las bandas de operación ocurre a 100 nm por encima de la longitud de onda de bombeo, por ejemplo: en banda S, con una fuente de bombeo a 1410 nm, la máxima ganancia es de 35,1 dB en 1510 nm; en banda C, con una fuente de bombeo a 1455 nm, la máxima ganancia es de 38,8 dB en 1555 nm; y, en banda L, con una fuente de bombeo a 1487 nm, la máxima ganancia es de 43,2 dB en 1587 nm.

b) Variación de potencia de entrada para el Raman

En la Fig. 12 se presenta la curva de ganancia en función de la longitud de onda de operación para diferentes valores de

potencia de entrada al amplificador Raman, considerando un rango de pequeña señal de -40 a 5 dBm.

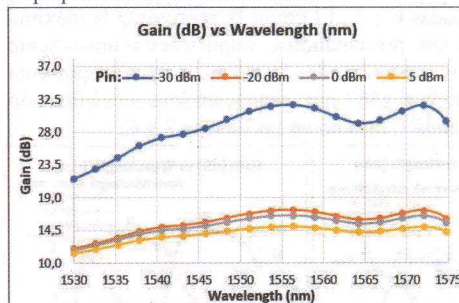


Fig. 12. Ganancia del Raman en función de la longitud de onda para diferentes potencias de entrada

De la figura se desprende que a medida que se incrementa el valor de la potencia de entrada al amplificador, la ganancia disminuye y presenta una curva más plana a lo largo de banda C y porción de banda L. Por ejemplo, a una potencia de entrada de -30 dBm se obtiene ganancias desde 21 hasta 32,5 dB; en tanto que a una potencia de entrada de 5 dBm la ganancia en todo el rango de longitudes de onda es de 13 dB aproximadamente.

Adicionalmente, para el análisis de la potencia de salida de saturación, a manera de ejemplo se consideró una longitud de onda de 1587 nm que está dentro del rango de operación del amplificador Raman. Así en la Fig. 13, el punto A indica la potencia de saturación de salida donde la ganancia se reduce 3 dB (37,6 dB) con respecto a la ganancia de pequeña señal (40,6 dB). En este caso la potencia de saturación de salida es de 18 dBm, que permitió corroborar que la potencia de saturación de salida del Raman es superior a 15 dBm, como se afirma en la teoría de este amplificador.

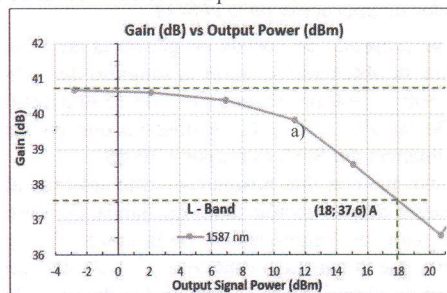


Fig. 13. Ganancia del Raman en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1587 nm con bombeo contradireccional

c) Sistema de bombeo para el Raman

Se consideró longitudes de onda de bombeo a 100 nm bajo la longitud de onda en las respectivas bandas de operación, así: banda S, 1422 nm; banda C, 1455 nm; y, banda L, 1487 nm. En la Fig. 14 a y b se muestran las curvas de ganancia en función de la longitud de onda de operación para una potencia de bombeo de 300 mW y 1200 mW respectivamente.

Como se puede observar en las Fig. 14, con potencias de bombeo de 300 mW y 1200 mW, existe amplificación siempre y cuando se utilice una longitud de onda de bombeo adecuada; por ejemplo: el punto A, representa la máxima ganancia a una

longitud de onda de 1522 nm (100 nm por arriba de la de bombeo), observándose amplificación únicamente en banda S más no en las bandas C y L. El punto B, representa la máxima ganancia a 1555 nm, presentándose amplificación únicamente en banda C más no en las bandas S y L. El punto C, representa la máxima ganancia a 1587 nm, produciéndose amplificación únicamente en banda L más no en las bandas S y C.

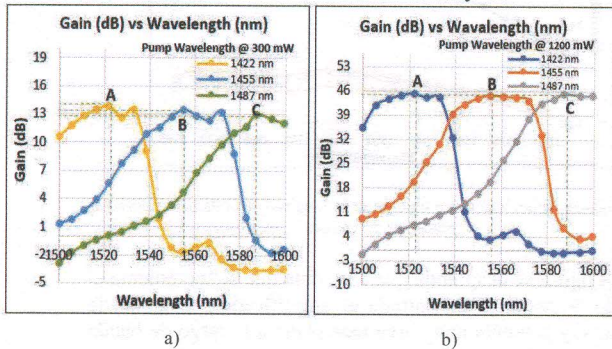


Fig. 14. Ganancia del Raman vs la longitud de onda con diferentes longitudes de onda de bombeo a una potencia de bombeo de a) 300 mW y b) 1200 mW

Comprobándose de esta forma que el comportamiento del amplificador Raman para obtener una máxima ganancia depende de la longitud de onda de bombeo; por tanto, se deberá elegir una longitud de onda de bombeo acorde a la banda de operación deseada.

3) Análisis comparativo del SOA en sistemas monocanal

En esta sección se procede a contrastar los resultados obtenidos mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla IX y el desarrollo teórico del SOA.

a) Bandas de operación para el SOA

En la Fig. 15 se presenta las curvas de ganancia para las bandas O y C. Para su obtención se varió la longitud de onda de operación de 1300 a 1360 nm (banda O) y de 1530 a 1560 nm (banda C). De las Fig. 15a y b, se observa que en las bandas O y C la ganancia del SOA es mayor a 20 dB.

Se puede verificar que con una misma corriente aplicada al SOA (500mA), existe amplificación tanto en banda O como en banda C. Así, para las longitudes de onda entre 1300 y 1360 nm se observa que la ganancia está entre 17 y 25 dB con respecto a la ganancia obtenida en las longitudes de onda de 1530 a 1560 nm, cuyos valores rodean los 26,5 y 27,5 dB.

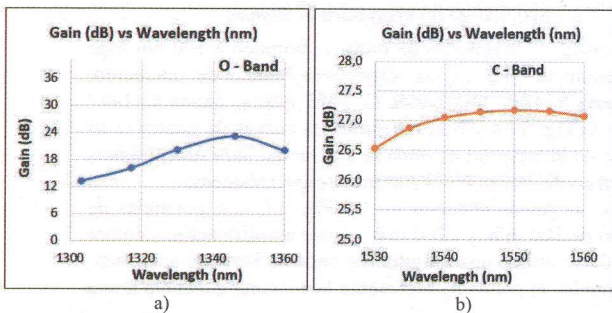


Fig. 15. Ganancia del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C

En la Fig. 16 se muestra las curvas de figura de ruido (NF) obtenidas mediante simulación del amplificador SOA en sistemas monocanal, tanto para banda O como C.

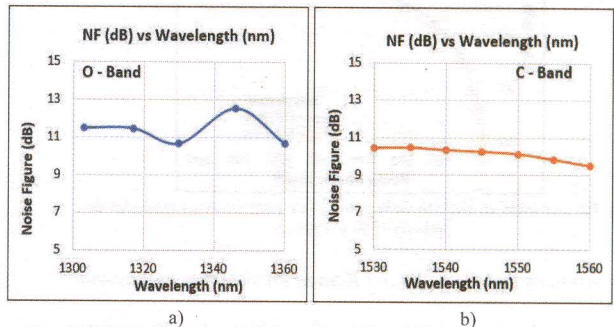


Fig. 16. Figura de ruido del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C

Para banda O se alcanza un valor máximo de NF de aproximadamente 13 dB; mientras que para banda C el valor de la NF no supera los 11 dB; ratificando lo expuesto en la teoría y en la Tabla IX, que hace referencia a los valores de NF en las bandas O (12 a 14 dB) y C (7 a 11,5 dB).

Adicionalmente, se probó al amplificador SOA en las longitudes de onda correspondientes a las bandas S y L, con las siguientes observaciones: Para la banda S, entre 1460 y 1520 nm, se comprueba que existe amplificación; sin embargo se obtiene un BER de 10^{-3} , tal como se resalta en la Tabla XI (color amarillo). Para la banda L, en el rango de longitudes de onda entre 1565 y 1625 nm, no se tiene amplificación en ninguna longitud de onda, tal como se indica en la Tabla XI (color verde).

TABLA XI

RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL SOA EN UNA PORCIÓN DE LONGITUDES DE ONDA EN LAS BANDAS S Y L

| | Wavelength (nm) | Gain (dB) | NF (dB) | OSNR (dB) | Output Power (dBm) | BER |
|---|-----------------|-----------|---------|-----------|--------------------|----------|
| 1 | 1460 | 28,53 | 14,98 | 19,93 | 5,76 | 7,60E-03 |
| 3 | 1500 | 29,75 | 12,37 | 22,66 | 6,98 | 4,48E-04 |
| 4 | 1520 | 25,94 | 12,39 | 22,57 | 3,17 | 2,65E-04 |
| 5 | 1565 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6,76E-03 |
| 7 | 1600 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2,00E-02 |
| 8 | 1625 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,26E-03 |

En efecto, se comprueba que con la utilización del amplificador SOA se puede generar amplificación en las longitudes de onda de banda O y C, como lo establece la teoría del SOA; sin embargo éste no opera en banda S y L

b) Potencia de entrada al amplificador para el SOA

En la Fig. 17 se presenta las curvas de ganancia obtenidas mediante simulación del amplificador SOA operando en las longitudes de onda entre 1530 y 1560 nm, a diferentes potencias de la señal de entrada, considerando un rango de pequeña señal de -13 a 3 dBm.

De la figura se desprende que a medida que se incrementa el valor de la potencia de entrada, la ganancia adquiere valores más bajos y presenta una curva más plana a lo largo de la longitud de onda de operación en banda C. Por ejemplo, a una potencia de entrada de -13 dBm se obtiene ganancias

alrededor de 27 hasta 32 dB; y, para una potencia de entrada de 3 dBm, las ganancias en todo el rango de longitudes de onda son de 19 dB aproximadamente.

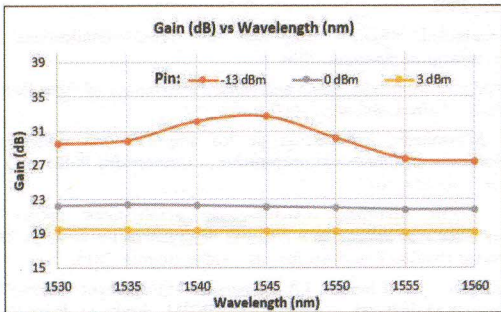


Fig. 17. Ganancia del SOA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada en banda C

Para el análisis de la potencia de salida de saturación, a manera de ejemplo se consideró una longitud de onda de 1550 nm que está dentro del rango de operación del amplificador SOA; así, en la Fig. 18 el punto A marca la potencia de saturación de salida donde la ganancia se reduce 3 dB (27,5 dB) con respecto a la ganancia de pequeña señal (30,5 dB). En este caso la potencia de saturación de salida es aproximadamente 17 dBm; esto permitió corroborar lo expuesto en la Tabla IX, la cual especifica que la potencia de saturación de salida del SOA es superior a 14 dBm.

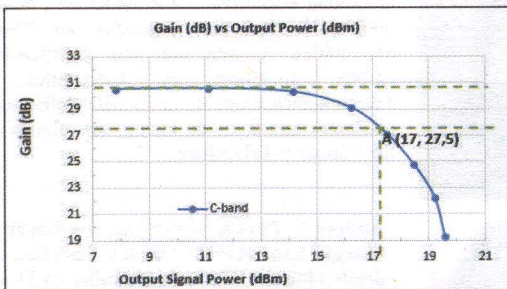


Fig. 18. Ganancia del SOA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1550 nm

c) Corriente de bombeo para el SOA

Posteriormente se procedió a obtener la curva de ganancia en función de la corriente de bombeo para el SOA, se consideró un rango entre 100 mA y 1 A; y, se trabajó con longitudes de onda tanto en banda O como C.

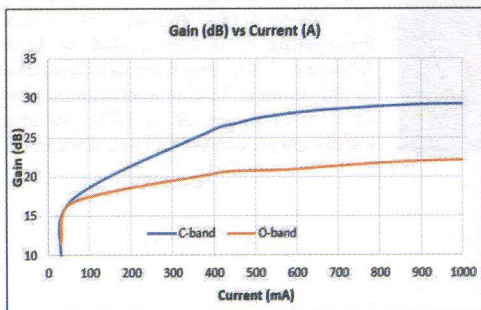


Fig. 19. Ganancia de SOA en función de la corriente en bandas O y C

De los resultados presentados en la Fig. 19, se observa que en banda C inicialmente para corrientes de hasta 400 mA hay un considerable aumento en la ganancia alrededor de 10 a 26 dB, pero más allá de este valor la ganancia aumenta a una tasa muy pequeña; cumpliendo así con las especificaciones dadas en la Tabla IX.

B. Análisis comparativo de los amplificadores de fibra (EDFA y Raman) según el tipo de bombeo [10]

En este análisis se excluye al amplificador SOA, pues éste no utiliza un láser de bombeo como lo hacen los amplificadores de fibra. Considerando las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional para los amplificadores ópticos EDFA y Raman, se presenta el siguiente análisis [10]:

Para las configuraciones de bombeo codireccional y contradireccional, se obtiene valores de ganancia muy similares, a diferencia de la configuración de bombeo bidireccional que al emplear dos fuentes de bombeo consigue un valor de ganancia superior, tanto en el amplificador EDFA como en el Raman.

Para la configuración de bombeo contradireccional se obtienen altas figuras de ruido; esto debido a que el ruido intrínseco (ASE) del amplificador EDFA y Raman al propagarse en sentido contrario a la señal transmitida también se amplifica.

Por otra parte, para las configuraciones de bombeo codireccional y bidireccional, los valores de NF son similares, pero menores a los valores de NF obtenidos con el bombeo contradireccional.

Los valores de OSNR conseguidos en las tres configuraciones de bombeo tanto en el EDFA como en el Raman son superiores a 15 dB, siendo éste un indicador para lograr un buen desempeño del enlace y garantizar la calidad del sistema.

Como se puede observar en la Tabla XII [10], al trabajar con diferentes velocidades de transmisión existe una notable diferencia en los valores de BER conseguidos en las tres configuraciones de bombeo; por ejemplo a 100 Gbps tanto el amplificador EDFA como el Raman alcanzan un BER aceptable en un rango de 10^{-7} a 10^{-13} , en tanto que al trabajar con velocidades menores de 10 Gbps, se obtiene un BER excelente en el rango de 10^{-19} a 10^{-50} , lo cual permitió corroborar que a mayor velocidad de transmisión el BER empeora.

TABLA XII
BER EN FUNCIÓN DE LAS CONFIGURACIONES DE BOMBEO PARA LOS AMPLIFICADORES EDFA Y RAMAN

| Pump Configuration @ 1545 nm | | | |
|------------------------------|------------|-----------------|------------|
| | Co-Pumping | Counter-Pumping | Bi-Pumping |
| EDFA @ 10 Gbps | 1,06E-50 | 1,23E-33 | 9,06e-45 |
| EDFA @ 100 Gbps | 1,24E-13 | 4,97E-07 | 6,55E-12 |
| Raman @ 10 Gbps | 6,96E-20 | 3,93E-19 | 3,53E-20 |
| Raman @ 100 Gbps | 2,44E-09 | 1,94E-12 | 4,99E-09 |

VI. CONCLUSIONES

En base a los resultados derivados de las simulaciones de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA, es posible evidenciar la dependencia existente entre los parámetros

como: longitud de onda de operación, sistema de bombeo y potencia de entrada con los parámetros de ganancia, NF, OSNR y BER obtenidos en cada amplificador.

Acorde a las especificaciones técnicas de cada uno de los amplificadores ópticos se pudo comprobar mediante las simulaciones realizadas que: para el EDFA se tiene un rango de operación que corresponde a la banda C y L, el amplificador Raman opera en un rango más amplio correspondiente a las bandas S, C y L, mientras que para el SOA sus bandas de operación son la O y C.

De los resultados alcanzados se concluye que el amplificador EDFA permite mayores ganancias pero opera en un rango de longitudes menor que el Raman; en tanto que las ganancias del SOA son inferiores a las de los amplificadores de fibra y no resulta adecuado para banda S y L que son de las más usadas en la actualidad, además de que tiene mayor NF, todo esto hace que el SOA en los sistemas de comunicaciones ópticas actuales no sea muy utilizado, sino más bien su uso resulta atractivo en sistemas convertidores de longitud de onda o en conmutadores ópticos.

El amplificador EDFA puede utilizar dos únicas longitudes de onda de bombeo (980 y 1480 nm), las cuales definen los parámetros característicos que delimitan su uso, tal como se evidenció en los resultados alcanzados; a diferencia del amplificador Raman que emplea múltiples longitudes de onda de bombeo acorde a la banda de operación deseada, constituyéndolo actualmente en uno de los amplificadores más utilizados en los sistemas de comunicaciones ópticas de largo alcance.

En las simulaciones desarrolladas se comprobó que la potencia de bombeo es un parámetro influyente en los amplificadores de fibra. Así, para el amplificador EDFA se consigue altas ganancias con el uso de potencias de bombeo bajas (menores a 350 mW); en tanto que para el amplificador Raman se obtiene las mismas ganancias del EDFA, pero con potencias de bombeo superiores (mayores a 430 mW), lo cual puede verse como una desventaja del Raman.

Mientras mayor es la potencia que ingresa a ser amplificada, la curva de ganancia del amplificador óptico se torna más plana, por lo que a potencias de entrada bajas siempre será necesario incorporar procesos de equalización para conseguir aplanar dicha curva, más aún en sistemas multicanal como los WDM.

Para los amplificadores de fibra se pudo comprobar la degradación del BER con mayores velocidades de transmisión, de ahí la importancia en los sistemas actuales que trabajan a altas velocidades y largos alcances de contar con amplificadores que liberen el cuello de botella que impone la conversión O/E/O de los amplificadores electroópticos y que puedan tener un buen desempeño en estas condiciones de velocidad y distancia.

VII. REFERENCIAS

- [1] G. A. Montero Cedillo, «Estudio y diseño mediante la técnica de transmisión DWDM para la red SDH del anillo central de la ciudad de Guayaquil de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones E.P, e integración a la red nacional.» EPN, Quito, 2012.
- [2] J. I. Andreotti, «Consultor de Telecomunicaciones y Electricidad (CTE - Fibertel),» 21 Agosto 2015. [En línea]. Available: http://ingenieroandreotti.blogspot.com/2015/08/que-es-el-ber-bit-error-rate_21.html.
- [3] A. Flores, «Diseño y Caracterización de un EDFA con potencia de salida de alta saturación.» Universidad Autónoma de Puebla, H. Puebla de Zaragoza, 2003.
- [4] I. Mohammed, «Raman Amplifiers for Telecommunications I,» Physical principles, Springer, 2004.
- [5] T. Ahmed y A. Moustafa, «Gain and Noise Performance of Fiber Raman Amplifiers,» Cairo University, 2009.
- [6] M. D. Manzanedo, «Aplicación de los amplificadores ópticos de semiconductor a la fotónica de microondas.» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.
- [7] V. H. Perilla Martínez, «Análisis del amplificador óptico de semiconductor y su aplicación a sistemas de regeneración de onda 2R,» Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas, Bogotá, 2015.
- [8] X. Shuangmei y J. Khurgin, «A Dispersion Management Scheme for Reducing SOA-Induced Crosstalk in WDM Links,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 22, n° 2, pp. 417-422, 2004.
- [9] A. Srivastava y S. Banerjee, «A Polarization Multiplexing Technique to Mitigate WDM Crosstalk in SOAs,» *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, n° 10, pp. 1415-1416, 2000.
- [10] Y. Padilla y A. Pavón, «Análisis comparativo entre los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA mediante simulación,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.
- [11] K. A. Gjerde, «DWDM, fiber optic high speed communication,» ABB Telecom, 2009.
- [12] I. Armstrong y I. Andonovic, «Semiconductor optical amplifiers: performance and applications in optical packet switching,» University of Strachclyde, UK, 2004.



Yessenia V. Padilla, Realizó sus estudios en la Unidad Educativa "La Providencia", donde obtuvo el título de Bachiller en Físico Matemático. Cuenta con una certificación CCNA. Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Redes de fibra óptica y Telemática.



Andrea C. Pavón, Realizó sus estudios en el Colegio Experimental "Jacinto Collahuazo", donde obtuvo el título de Bachiller en Físico Matemático. Cuenta con capacitación en los cursos de CCNA- I, II, III. Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional. Sus áreas de interés son: Redes de fibra óptica y Sistemas Celulares.



María Soledad Jiménez, M.Sc. Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional, obtuvo su título de Master of Science in Electrical Engineering en la Universidad de Texas at Arlington, USA. Profesora del Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Información de la EPN. Su área de interés son las comunicaciones ópticas.