ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA MEDIANTE SIMULACIÓN

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

PADILLA TITUAÑA YESSENIA VERÓNICA
yessenia.padilla@epn.edu.ec

PAVÓN AVILA ANDREA CATERINE
andrea.pavon@epn.edu.ec

DIRECTORA: ING. MARÍA SOLEDAD JIMÉNEZ JIMÉNEZ, MSc
maria.jimenez@epn.edu.ec

Quito, agosto 2018

DECLARACIÓN

Nosotras, Yessenia Verónica Padilla Tituaña y Andrea Caterine Pavón Avila, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Yessenia Verónica Padilla Tituaña	Andrea Caterine Pavón Avila

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Yessenia Verónica Padilla Tituaña y Andrea Caterine Pavón Avila, bajo mi supervisión.

Ing. María Soledad Jiménez Jiménez, MSc.
DIRECTORA DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por todas las bendiciones recibidas y por permitirme culminar mis estudios universitarios.

A mis queridos padres Angel y Mariana, por todo su esfuerzo y dedicación; ustedes han sido mi pilar fundamental para no desmayar durante estos años de estudio y junto con su amor infinito hemos conseguido una meta más. Estoy muy agradecida con Dios por tenerlos conmigo y ser unos excelentes papitos.

A Xavier, quién me enseñó que nada es imposible y que mientras exista ganas de superación todo se puede en la vida; gracias hermano por estar conmigo y por mi pequeño sobrino Emilio, juntos estamos aprendiendo lo hermoso de la vida al verlo crecer.

A la Escuela Politécnica Nacional, por haberme permitido ser parte de esta prestigiosa universidad y sobre todo por su excelente formación académica.

A la estimada Ing. María Soledad, por sus consejos y conocimientos impartidos durante el desarrollo y culminación de este proyecto de titulación.

A mi amiga y compañera Andrea, con quien decidí emprender este proyecto, porque a pesar de las adversidades, hoy lo logramos; gracias por tu paciencia y confianza. A ti mi respeto y admiración.

A mi amada familia, abuelitos, tíos y primos por todo su apoyo y palabras de aliento cuando más lo necesité, gracias por estar presentes en este caminar.

A mis apreciados amigos con quienes he compartido buenos y malos momentos, anécdotas que jamás olvidaré y que siempre permanecerán en mi corazón; sobre todo a ti, has sido uno de los mejores amigos que he tenido y que quiero mucho.

Yessenia

AGRADECIMIENTO

A Dios por sus bendiciones diarias, por darme sabiduría y las fuerzas necesarias para no decaer en los momentos difíciles de mi vida.

A mi mami Rosita, por brindarme su apoyo incondicional y enseñarme que todo esfuerzo es al final recompensa; gracias por todo su amor y consejos que han hecho de mí una mujer de bien; gracias por ser más que una buena madre una gran amiga y porque a pesar de la distancia jamás me dejas sola.

A mis pequeñas Marcelita y Sammy, quienes llenan mi vida de alegrías y han sido mi inspiración para ser mejor cada día; gracias porque sus abrazos renuevan mis fuerzas y me motivaban a seguir adelante.

A Marcelito, quien me ha apoyado en todo y siempre ha estado al pendiente de mí.

A toda mi familia querida, a mi abuelita María, mis tías y primas, por sus palabras de aliento y sus buenos deseos, en especial quiero agradecer a mis tíos Alex y Elita, por acogerme y brindarme la calidez de un hogar, por ayudarme a crecer y ser más fuerte para enfrentar la vida.

A la Escuela Politécnica Nacional en especial a la Facultad de Ingeniería Electrónica, por la formación profesional y humana brindada durante mi trayectoria estudiantil.

A todos y cada uno de los ingenieros quienes me impartieron sus conocimientos y experiencia profesional, en especial un sincero agradecimiento a la Ing. María Soledad Jiménez por su dedicada colaboración y paciencia para la elaboración de este trabajo.

A mi compañera de tesis Yesse, porque desde que emprendimos la carrera has sido una gran amiga a quien quiero mucho; gracias por permitirme vivir esta experiencia de tesis contigo.

A mis inolvidables amigos, por su cariño y grandes experiencias compartidas que nos han invadido de miles de sonrisas; sobre todo quiero agradecerte a ti, por llegar en el momento preciso a ser la persona adecuada.

A todos, infinitas gracias, por hacer posible esta realidad.

Andrea

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios por ser tan misericordioso conmigo, a mis amados padres Angel y Mariana, ya que sin su apoyo esta meta no hubiera sido posible.

A mi inolvidable abuelito Juan Manuel que, aunque ya no me acompañe físicamente, sé que espiritualmente él está aquí y su último abrazo ha sido mi aliento durante esta desafiante etapa, a mi querida abuelita María Delia que desde arriba me da sus bendiciones y me acompaña en cada momento.

A mi pequeño Alexis, porque su llegada me enseñó que los milagros existen y tú eres uno de ellos, todo mi esfuerzo es por ti mi querido travieso. A mi niña Carolina por ser como eres, he aprendido muchas cosas contigo.

A ti, donde estés, fueron muchos años compartidos.

¡Este logro es por ustedes!

Yessenia

DEDICATORIA

Con mucho amor y cariño dedico este trabajo a Dios porque su bondad y bendiciones infinitas hicieron realidad este sueño anhelado.

A mi querida mami Rosita, por enseñarme que con perseverancia los grandes sueños sí se pueden cumplir; gracias por siempre creer en mí y apoyarme en todo; te amo mamita has sido y serás siempre mi gran ejemplo.

A mi amado papito Roberto que, aunque no esté a mi lado, su bendición y fraternal amor de padre siempre prevalecerán en mi corazón.

A mis hermanitas Marcelita y Sammy, porque con su llegada cambio mi vida, ahora ustedes son mi alegría y mi razón de ser.

Este logro es por ustedes, pues se convirtieron en mi mayor motivación.

Andrea

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS XIII

ÍNDICE DE TABLAS XX

ÍNDICE DE ECUACIONES XXII

RESUMEN XXIII

PRESENTACIÓN XXIV

CAPÍTULO 1 1

INTRODUCCIÓN Y ESTUDIO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS 1

1.1 COMUNICACIONES ÓPTICAS 1

1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS 2

1.2.1 TRANSMISOR ÓPTICO 3

1.2.2 FIBRA ÓPTICA 4

1.2.3 RECEPTOR ÓPTICO 5

1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS 5

1.3.1 COMPONENTES DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS 8

1.3.1.1 Sistema de bombeo 8

1.3.1.2 Acoplador selectivo de longitud de onda 8

1.3.1.3 Aislador óptico 9

1.3.2 TIPOS DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS 9

1.3.2.1 Según su aplicación 9

1.3.2.2 Según el proceso de emisión estimulada 10

1.3.3 AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA) 10

1.3.3.1 Principio de funcionamiento 11

1.3.3.2 Características 12

1.3.3.3 Ventajas y desventajas 13

1.3.3.4 Aplicaciones 14

1.3.4 AMPLIFICADOR RAMAN 15
1.3.4.1 Principio de funcionamiento 15
1.3.4.1.1 Efecto Raman 17
1.3.4.2 Características 17
1.3.4.3 Tipos de amplificadores Raman 18
1.3.4.4 Ventajas y desventajas 19
1.3.4.5 Aplicaciones 19
1.3.5 AMPLIFICADOR ÓPTICO DE SEMICONDUTOR (SOA) 20
1.3.5.1 Principio de funcionamiento 20
1.3.5.2 Características 22
1.3.5.3 Tipos de amplificadores SOA 23
1.3.5.3.1 Según su estructura 23
1.3.5.3.2 Según sus características de realimentación 23
1.3.5.4 Ventajas y desventajas 24
1.3.5.5 Aplicaciones 25
CAPÍTULO 2 26
SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA 26
2.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN 26
2.1.2 VPI TRANSMISSION MAKER ™ 27
2.1.3 OPTSIM® 28
2.1.4 OPTISYSTEM 29
2.2 ELECCIÓN DEL SIMULADOR 31
2.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN OPTISYSTEM 31
2.3.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE HARDWARE Y SOFTWARE. 32
2.3.2 PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SIMULADOR 32
2.3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN 33

2.3.3.1 Transmitters Library 34
2.3.3.1.1 Optical Transmitter 34
2.3.3.1.2 WDM Transmitter 35
2.3.3.1.3 Pump Laser and Pump Laser Array 35
2.3.3.2 Receivers Library 36
2.3.3.2.1 Optical Receiver 36
2.3.3.3 Amplifier Library 37
2.3.3.3.1 Erbium Doped Fiber 37
2.3.3.3.2 Raman Amplifier Average Power Model 37
2.3.3.3.3 Wideband Traveling Wave SOA 38
2.3.3.4 WDM Multiplexers Library 39
2.3.3.4.1 WDM Mux and Ideal Mux 39
2.3.3.4.2 Ideal Demux and WDM Demux 40
2.3.3.5 Passives and Fibers Library 40
2.3.3.5.1 Coupler 40
2.3.3.5.2 Ideal Isolator 41
2.3.3.6 Visualizer Library 41
2.3.3.6.1 Optical Spectrum Analyzer 41
2.3.3.6.2 Dual Port WDM Analyzer 42
2.3.3.6.3 BER Analyzer 42
2.4 SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS 43
2.4.1 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA) 44
2.4.1.1 Escenario de Simulación I: EDFA en sistemas monocanal 44
2.4.1.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación 44
2.4.1.1.2 Características generales del esquema de simulación 45
2.4.1.1.3 Visualización de Resultados 47

2.4.1.2 Escenario de Simulación II: EDFA en sistemas multicanal WDM.52

2.4.1.2.1 Esquema general para la implementación de la simulación .. 52

2.4.1.2.2 Características generales del esquema de simulación 53

2.4.1.2.3 Visualización de Resultados 55

2.4.2 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR RAMAN 62

2.4.2.1 Escenario de Simulación I: Raman en sistemas monocanal..... 62

2.4.2.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación .. 62

2.4.2.1.2 Características generales del esquema de simulación 63

2.4.2.1.3 Visualización de Resultados 65

2.4.2.2 Escenario de Simulación II: Raman en sistemas multicanal WDM 70

2.4.2.2.1 Esquema general para la implementación de la simulación .. 70

2.4.2.2.2 Características generales del esquema de simulación 71

2.4.2.2.3 Visualización de Resultados 73

2.4.3 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE SEMICONDUCTOR SOA. 80

2.4.3.1 Escenario de Simulación I: SOA en sistemas monocanal..... 80

2.4.3.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación .. 81

2.4.3.1.2 Características generales del esquema de simulación 81

2.4.3.1.3 Visualización de Resultados 83

2.4.3.2 Escenario de Simulación II: SOA en sistemas multicanal WDM 84

2.4.3.2.1 Esquema general para la implementación del sistema 84

2.4.3.2.2 Características generales del esquema de simulación 85

2.4.3.2.3 Visualización de Resultados 86

CAPÍTULO 3 88

ANÁLISIS DE RESULTADOS……88

3.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS……...88

3.1.1 COMPARACIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN I: EDFA, RAMAN Y SOA EN SISTEMAS MONOCANAL 89

3.1.1.1 Análisis comparativo del amplificador EDFA en sistemas monocanal 89

3.1.1.1.1 Longitud de onda de operación para el EDFA 89

3.1.1.1.2 Potencia de entrada al amplificador para el EDFA 93

3.1.1.1.3 Longitud de onda de bombeo para el EDFA 97

3.1.1.1.4 Potencia de bombeo para el EDFA 98

3.1.1.2 Análisis comparativo del amplificador Raman en sistemas monocanal 99

3.1.1.2.1 Longitud de onda de operación para el amplificador Raman 100

3.1.1.2.2 Variación de potencia de entrada para el amplificador Raman 103

3.1.1.2.3 Sistema de bombeo para el Raman 106

3.1.1.3 Análisis comparativo del amplificador SOA en sistemas monocanal 109

3.1.1.3.1 Longitud de onda de operación para el SOA 109

3.1.1.3.2 Potencia de entrada al amplificador para el SOA 113

3.1.1.3.3 Corriente de bombeo para el SOA 115

3.1.2 COMPARACIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN II: EDFA Y RAMAN EN SISTEMAS MULTICANAL WDM 117

3.1.2.1 Análisis comparativo del amplificador EDFA en sistemas multicanal 118

3.1.2.1.1 Espaciamiento entre canales ópticos 118

3.1.2.1.2 Múltiples fuentes de bombeo 120

3.1.2.2 Análisis comparativo del amplificador Raman en sistemas multicanal 122

3.1.2.2.1 Espaciamiento entre canales ópticos 122

3.1.2.2.2 Múltiples fuentes de bombeo 124

3.1.3 COMPARACIÓN SEGÚN LA CONFIGURACIÓN DE BOMBEO PARA EDFA Y RAMAN 126

3.1.3.1 Ganancia del EDFA y Raman en función de la longitud de onda... 126

3.1.3.2 Figura de ruido del EDFA y Raman en función de la longitud de onda 127

3.1.3.3 OSNR del EDFA y Raman en función de la longitud de onda.. 127

3.1.3.4 Tasa de bits errados (BER) del EDFA y Raman con velocidades de transmisión de 10 y 100 Gbps. 127

CAPÍTULO 4 129

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 129

4.1 CONCLUSIONES……129

4.2 RECOMENDACIONES……...132

BIBLIOGRAFÍA……..135

ANEXOS 142

ANEXO A: RECOMENDACIONES ITU-T G.661 .....A-1

ANEXO B: AMPLIFICADOR BOOSTER.....A-1

ANEXO C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EDFA C-2

ANEXO D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RAMAN D-1

ANEXO E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOA E-1

ANEXO F: SIMULACIONES DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS F-1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes fundamentales de un sistema de comunicaciones óptico. 3
Figura 1.2 Tipos de fibra óptica según el número de modos de propagación. 4
Figura 1.3 Acoplador (combinador) selectivo de longitud de onda. 9
Figura 1.4 Espectro de ganancia del EDFA en banda C. 11
Figura 1.5 Esquema del amplificador EDFA. 11
Figura 1.6 Espectro de ganancia de Raman. 16
Figura 1.7 Esquema del amplificador Raman. 16
Figura 1.8 Espectro de ganancia de Raman con el uso de múltiples longitudes de onda de bombeo. 18
Figura 1.9 Estructura de un Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA). 21
Figura 1.10 Procesos Radiativos en los niveles de energía 22
Figura 2.1 Interfaz gráfica VPITransmissionMaker™ 28
Figura 2.2 Interfaz gráfica OptSim. 29
Figura 2.3 Interfaz gráfica OptiSystem 30
Figura 2.4 Visualización de la página web para descarga. 32
Figura 2.5 Creación de usuario para acceso. 33
Figura 2.6 Presentación de OptiSystem una vez instalado. 33
Figura 2.7 Definición de valor inicial y final para el barrido (*Sweep*). 34
Figura 2.8 Componente *Optical Transmitter.* 34
Figura 2.9 Parámetros del componente *Optical Transmitter.* 34
Figura 2.10 Componente *WDM Transmitter.* 35
Figura 2.11 Parámetros del componente *WDM Transmitter.* 35
Figura 2.12 Componentes a) *Pump Laser* y *b) Pump Laser Array.* 35
Figura 2.13 Parámetros del componente *Pump Laser Array* y *Pump Laser*. 36
Figura 2.14 Componente *Optical Receiver*. 36
Figura 2.15 Componente *Erbium Doped Fiber.* 37
Figura 2.16 Parámetros del componente *Erbium Doped Fiber*. 37
Figura 2.17 Componente *Raman Amplifier*. 37
Figura 2.18 Parámetros del componente *Raman Amplifier.* 38
Figura 2.19 Componente *Wideband Traveling Wave SOA*. 38

Figura 2.20 Parámetros del componente *Wideband Traveling Wave SOA*. 39
Figura 2.21 Componente Multiplexor WDM. 39
Figura 2.22 Parámetros del componente Multiplexor. 39
Figura 2.23 Componente Demultiplexor WDM. 40
Figura 2.24 Parámetros del componente Demultiplexor. 40
Figura 2.25 Componente *Pump Coupler Co-Propagating*. 40
Figura 2.26 Componente *Ideal Isolator.* 41
Figura 2.27 Componente *Optical Spectrum Analyzer.* 41
Figura 2.28 Imagen obtenida mediante el visualizador de espectro óptico. 42
Figura 2.29 Componente *Dual Port WDM Analyzer.* 42
Figura 2.30 Componente *BER Analyzer*. 42
Figura 2.31 Diagrama del ojo que se obtiene del componente *BER Analyzer*. 43
Figura 2.32 Esquema de simulación EDFA en sistemas monocanal con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional. 44
Figura 2.33 Espectro de potencia de la señal de entrada al amplificador utilizada en el escenario de simulación del EDFA en sistemas monocanal. 46
Figura 2.34 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo codireccional. 48
Figura 2.35 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo contradireccional. 49
Figura 2.36 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo bidireccional. 50
Figura 2.37 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal. 50
Figura 2.38 Figura de ruido del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal. 51
Figura 2.39 OSNR del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal. 51
Figura 2.40 Esquema de simulación EDFA en un sistema WDM de 8 canales con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional. 52
Figura 2.41 Esquema de simulación EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 53

Figura 2.42 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del EDFA en un sistema WDM de: a) 8 y b) 16 canales. 54
Figura 2.43 Espectro de potencia de las señales de salida del EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional. 56
Figura 2.44 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 8 del EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional. 57
Figura 2.45 Ganancia de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales. 57
Figura 2.46 Figura de ruido de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales. 58
Figura 2.47 OSNR de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales. 58
Figura 2.48 Espectro de potencia de las señales de salida del EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 59
Figura 2.49 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 16 del EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 60
Figura 2.50 Ganancia de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 60
Figura 2.51 NF de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 61
Figura 2.52 OSNR de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional. 61
Figura 2.53 Esquema de simulación Raman en sistemas monocanal con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional. . 62
Figura 2.54 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal. 64
Figura 2.55 Ganancia del Raman en función de la longitud de fibra de no lineal. 65
Figura 2.56 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo codireccional. 66

Figura 2.57 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo contradireccional. 67
Figura 2.58 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo bidireccional. 68
Figura 2.59 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal..... 69
Figura 2.60 Figura de ruido del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal. 69
Figura 2.61 OSNR del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal..... 70
Figura 2.62 Esquema de simulación Raman en un sistema WDM de 4 canales con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional. 71
Figura 2.63 Esquema de simulación Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional. 71
Figura 2.64 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del Raman en un sistema WDM de: a) 4 y b) 16 canales..... 73
Figura 2.65 Espectro de potencia de la señal de salida del Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional..... 74
Figura 2.66 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 4 del Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional..... 75
Figura 2.67 Ganancia de cada canal del Raman en función de su longitud de onda en banda C para un sistema WDM de 4 canales. 75
Figura 2.68 Figura de ruido de cada canal del Raman en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 4 canales..... 76
Figura 2.69 OSNR de cada canal del Raman en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 4 canales. 76
Figura 2.70 Espectros de potencia de: a) señal de salida y b) fuentes de bombeo del Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.. 78
Figura 2.71 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 16 del Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional. 78

Figura 2.72 Ganancia de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional. 79
Figura 2.73 Figura de ruido de cada canal en función de su longitud de onda central para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional. 79
Figura 2.74 OSNR de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional. 80
Figura 2.75 Esquema de simulación del amplificador SOA en sistemas monocanal. 81
Figura 2.76 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del SOA en sistemas monocanal..... 82
Figura 2.77 a) Espectro de potencia de señal de salida y b) Diagrama del ojo para el SOA en banda C. 83
Figura 2.78 a) Ganancia, b) Figura de ruido y c) OSNR del SOA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal..... 84
Figura 2.79 Esquema de simulación SOA en un sistema WDM de 4 canales. 85
Figura 2.80 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del SOA en un sistema WDM de 4 canales..... 86
Figura 2.81 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 4 del SOA en un sistema WDM. 87
Figura 3.1 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda con diferentes longitudes del tramo de fibra dopada para a) banda C y b) banda L..... 90
Figura 3.2 a) Figura de ruido y b) OSNR del EDFA en función de la longitud de onda a diferentes longitudes del tramo de fibra dopada..... 91
Figura 3.3 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada..... 94
Figura 3.4 Ganancia del EDFA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1540 nm con bombeo codireccional. 95
Figura 3.5 a) Figura de ruido y b) OSNR del EDFA en función de la longitud de onda en banda C a diferentes potencias de entrada..... 96

Figura 3.6 a) Ganancia y b) Figura de ruido del EDFA en banda C con longitudes de onda de bombeo de: a) 980 nm y b)1480 nm. 97
Figura 3.7 a) Ganancia y b) Figura de ruido en función de la potencia de bombeo con longitudes de onda de 1550 y 1560 nm. 99
Figura 3.8 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda con bombeo bidireccional. 101
Figura 3.9 a) Figura de ruido y b) OSNR del Raman en función de la longitud de onda con bombeo bidireccional. 102
Figura 3.10 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada. 103
Figura 3.11 Ganancia del Raman en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1587 nm con bombeo contradireccional. 104
Figura 3.12 a) Figura de ruido y b) OSNR del Raman en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada. 105
Figura 3.13 Ganancia del Raman en función de la potencia de bombeo a una longitud de onda de 1587 nm. 107
Figura 3.14 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda con diferentes potencias y longitudes de onda de bombeo. 108
Figura 3.15 Ganancia del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C. 110
Figura 3.16 Figura de ruido del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C. 111
Figura 3.17 OSNR del SOA en función de la longitud de onda en banda a) O y b) C. 112
Figura 3.18 Ganancia del SOA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada. 114
Figura 3.19 Ganancia del SOA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1550 nm. 115
Figura 3.20 Ganancia de SOA en función de la corriente aplicada en bandas O y C. 116
Figura 3.21 a) Figura de ruido y b) OSNR para el SOA en función de la corriente inyectada en las bandas O y C. 117

Figura 3.22 Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del EDFA en un sistema DWDM de 8 canales con espaciamientos entre canal de: a) 0,2 nm; b) 0,4 nm y c) 0,8 nm..... 119
Figura 3.23 a) Ganancia y b) Figura de ruido en función de longitud de onda central con 1 y 4 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 16 canales. 121
Figura 3.24 Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del Raman en un sistema DWDM de 8 canales con espaciamientos entre canal de: a) 0,2 nm; b) 0,4 nm y c) 0,8 nm..... 123
Figura 3.25 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda central con 1, 8 y 12 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 64 canales. 125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Bandas del espectro electromagnético 10
Tabla 2.1 Cuadro comparativo de los softwares de simulación..... 31
Tabla 2.2 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del EDFA 45
Tabla 2.3 Comparación de parámetros característicos del EDFA para la elección de la longitud de fibra dopada para banda C. 47
Tabla 2.4 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo codireccional. 47
Tabla 2.5 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo contradireccional. 48
Tabla 2.6 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo bidireccional. 49
Tabla 2.7 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema WDM de 8 y 16 canales respectivamente. 55
Tabla 2.8 Resultados obtenidos para el EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional en banda C. 56
Tabla 2.9 Resultados obtenidos para un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional en banda C. 59
Tabla 2.10 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del RAMAN (Anexo D). 63
Tabla 2.11 Comparación de parámetros característicos del amplificador Raman para la elección de la fibra no lineal en banda C. 65
Tabla 2.12 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo codireccional. 66
Tabla 2.13 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo contradireccional. 67
Tabla 2.14 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo bidireccional. 67
Tabla 2.15 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el Raman en un sistema WDM de 4 y 16 canales respectivamente. 73
Tabla 2.16 Resultados obtenidos para el Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional en banda C. 74

Tabla 2.17 Resultados obtenidos para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional en banda C. 77
Tabla 2.18 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del SOA 82
Tabla 2.19 Resultados obtenidos para el SOA en banda C. 83
Tabla 2.20 Valores de la longitud de onda de cada canal para el SOA en un sistema WDM de 4 canales. 86
Tabla 2.21 Resultados obtenidos para el SOA en un sistema WDM de 4 canales en banda C. 87
Tabla 3.1 Parámetros tomados como referencia para el análisis comparativo de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA. 88
Tabla 3.2 Resultados obtenidos para el EDFA en una porción de longitudes de onda de banda S. 92
Tabla 3.3 Resultados obtenidos para el SOA en una porción de longitudes de onda en las bandas S y L. 113
Tabla 3.4 Espaciamiento entre canales ópticos utilizados en las diferentes simulaciones de los amplificadores ópticos en sistemas muticanal (DWDM). 118
Tabla 3.5 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema DWDM de 8 canales y una sola fuente de bombeo. 119
Tabla 3.6 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema DWDM de 16 canales con múltiples fuentes de bombeo. 120
Tabla 3.7 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el Raman en un sistema DWDM de 8 canales y una sola fuente de bombeo. 122
Tabla 3.8 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el Raman en un sistema DWDM de 64 canales con múltiples fuentes de bombeo. 124
Tabla 3.9 Longitudes de onda de bombeo para un sistema Raman con múltiples fuentes de bombeo. 125
Tabla 3.10 BER en función de las configuraciones de bombeo para los amplificadores EDFA y Raman. 127

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Cálculo de la OSNR en amplificadores ópticos…….6

RESUMEN

En este proyecto se realiza un análisis comparativo entre los amplificadores ópticos de fibra dopada con erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier,* EDFA), Raman y de semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier,* SOA), mediante simulación.

En el Capítulo 1 se describe de manera general los componentes de los sistemas de comunicación óptica y los amplificadores ópticos. Además, se presenta para cada uno de ellos, el principio de funcionamiento, características principales, ventajas, desventajas de su uso y las diferentes aplicaciones.

En el Capítulo 2 se revisan algunos simuladores de comunicaciones ópticas, de los cuales, posteriormente se selecciona el software que presenta mejores características y prestaciones para el desarrollo del trabajo. Conjuntamente, se incluye los escenarios de simulación de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA, en los que se muestra 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).

En el Capítulo 3 mediante la contrastación de la parte teórica y las simulaciones realizadas, se analizan los resultados obtenidos; por ello la variación de parámetros de longitud de onda de operación, potencia de entrada de la señal, longitud de onda de bombeo, potencia de bombeo (para EDFA y Raman) y corriente para el SOA, es indispensable en esta sección.

En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de la realización de este trabajo en base a la teoría expuesta y a los resultados de las simulaciones ejecutadas para cada uno de los amplificadores ópticos estudiados.

Finalmente, en el Anexo A se incluye la recomendación ITU-T G.661 sobre la definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos de los dispositivos y subsistemas de los amplificadores ópticos; en los Anexos B, C, D se presentan las especificaciones técnicas de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA respectivamente; y, en el Anexo F se adjunta en formato digital los resultados obtenidos de las simulaciones efectuadas mediante tablas y gráficas exportados a un documento de apoyo en Excel.

PRESENTACIÓN

Este proyecto de titulación se orienta al estudio de los amplificadores ópticos de fibra dopada con Erbio (EDFA), Raman y de semiconductor (SOA), ya que son un componente clave en el despliegue de las comunicaciones ópticas y han hecho posible la transmisión de información a altas velocidades, permitiendo enlaces desde cientos de kilómetros hasta distancias transoceánicas, proporcionando la capacidad necesaria para su implementación en redes de comunicaciones futuras; es así que surge la necesidad de analizar su comportamiento y principio de funcionamiento.

Los amplificadores ópticos remplazaron a los amplificadores electro–ópticos debido a su alta confiabilidad, bajo nivel de ruido y la utilización de pocos componentes para su implementación. La creciente demanda en cuanto a su uso, comercialización y producción masiva evidenciada en los últimos años ha permitido actualmente bajar los costos de estos dispositivos.

Cabe señalar que dentro de los aspectos importantes a considerarse en los amplificadores ópticos son las ventanas de operación, ya que cada amplificador presenta diferente comportamiento de acuerdo con la longitud de onda de trabajo, la cual determina la compatibilidad con los sistemas existentes y la posible adaptación en sistemas de comunicaciones ópticas futuras.

El objetivo principal de este trabajo de titulación consiste en realizar un análisis comparativo entre los amplificadores ópticos de fibra EDFA, Raman y de semiconductor (SOA), mediante el contraste de su fundamento teórico y los resultados alcanzados en las diferentes simulaciones.

Así mismo, este proyecto puede servir como base para investigaciones futuras relacionadas con el desarrollo de nuevas tecnologías con el uso de los amplificadores ópticos híbridos; el cual combina las propiedades de los amplificadores ópticos en estudio, lo que conlleva a mejorar sus prestaciones en los sistemas de comunicaciones ópticas.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y ESTUDIO DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS

En este capítulo, se describirá brevemente el fundamento teórico de las comunicaciones ópticas [1] y sus principales componentes.

Posteriormente, se realizará el estudio de los amplificadores ópticos de Fibra Dopada con Erbio (*Erbium Doped Fiber Amplifier,* EDFA), Raman y de semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier,* SOA); abordando su desempeño, comportamiento, principio de funcionamiento, bandas de operación y características.

1.1 COMUNICACIONES ÓPTICAS [2] [3]

La permanente evolución tecnológica y el desarrollo incesante de dispositivos móviles como *smartphones*, tabletas y ordenadores portátiles, da como resultado un incremento de información en las redes de comunicaciones, que a su vez conlleva a la necesidad de una mayor capacidad en los medios de transmisión. Así pues, la tecnología óptica constituye una alternativa dominante para satisfacer la demanda de un mayor ancho de banda a menor precio, desembocando sistemas capaces de soportar y transportar grandes volúmenes de datos.

A finales de los años 50 se presentó una decena de desarrollos e invenciones que contribuyeron al avance de las comunicaciones y consecuentemente a una mayor inversión en las redes implementadas sobre infraestructuras de fibra óptica.

A continuación, se presentan los cuatros hitos principales que marcan el progreso de las comunicaciones por fibra.

- Invención del LÁSER (1950): conlleva a que los canales de comunicaciones puedan extenderse en el espectro electromagnético.
- Fabricación de fibra óptica de baja atenuación (1970): marca el comienzo de la era de la fibra óptica en las telecomunicaciones.

- Invención de los amplificadores ópticos (1980): aumentan los niveles de señales ópticas en enlaces de corto y largo alcance.
- Invención de las rejillas de Bragg en fibra óptica (1990): reducen el costo de los dispositivos que permiten la separación de las diferentes longitudes de onda (Demultiplexores WDM).

A partir de estos grandes acontecimientos, las redes de fibra óptica se posicionaron como la principal opción de transmisión. Durante los últimos 20 años, según datos de la corporación KMI[1] se presenta un crecimiento exponencial en dichas redes; así, a finales del año 1997 el tendido de fibra óptica soterrada tenía una longitud de 69 millones de Km en todo Norte América, 35 millones de Km en Europa, 59 millones de Km en Asia y el Pacífico, 8 millones de Km en el resto del mundo y, alrededor de 366.000 Km de fibra óptica submarina fue instalada en 1996 [4].

Cabe destacar que, desde los años 80 los sistemas de comunicaciones por fibra óptica se presentan como predominantes en el mercado, ocasionando que sea uno de los campos de mayor interés y estudio, para el cual se desarrollan múltiples experimentos y trabajos de investigación sobre diferentes tipos de fibra óptica que incluyan sistemas de comunicaciones de altas velocidades y grandes distancias.

1.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE COMUNICACIONES ÓPTICAS [5]

Un sistema de comunicaciones por fibra óptica no es más que un caso particular de un sistema de comunicación genérico y por tanto se encuentra formado por tres bloques principales: un transmisor óptico, un canal de transmisión de fibra óptica y un receptor óptico.

En la Figura 1.1 se visualiza el diagrama de bloques general de un sistema de comunicaciones, considerando que los componentes del sistema varían dependiendo de la aplicación que se vaya a implementar, tal es el caso de las transmisiones de largo alcance que incorporan amplificadores ópticos.

[1] Corporación KMI (Kessler Marketing Intelligence): Ofrece investigación de mercado y consultoría de sectores de las comunicaciones por fibra óptica [61].

Figura 1.1 Componentes fundamentales de un sistema de comunicaciones óptico [5].

Los sistemas de largo alcance implementados con fibra óptica, al igual que los sistemas de baja capacidad, operan bajo el mismo esquema presentado, sobre el cual se acoplarán diferentes componentes y técnicas a fin de alcanzar grandes distancias a altas velocidades.

1.2.1 TRANSMISOR ÓPTICO [6]

El transmisor óptico incluye la fuente óptica, la cual se encarga de emitir luz que permite la transmisión de información a través de la fibra óptica. Para su elección se deberá considerar las siguientes características principales [7]:

- La potencia de salida debe considerar todas las pérdidas del trayecto.
- Deberá emitir luz en las ventanas de operación de la fibra óptica (850 nm, 1300 nm, 1550 nm y 1625 nm).
- Presentar un comportamiento estable con la temperatura.

Se tienen dos tipos de fuentes: el diodo emisor de luz (*Light-Emitting Diode*, LED) y el diodo de inyección láser (*Injection Laser Diode,* ILD); en ambos la potencia de luz emitida es dependiente de la corriente de excitación.

- La fuente de emisión LED es de bajo costo, trabaja en longitudes de onda infrarroja (850 nm y 1310 nm), se utiliza en fibras multimodo, tiene frecuencias de modulación de hasta 50 MHz y corriente de excitación de 50 a 100 mA. Es por ello que, debido al rendimiento que presentan las fuentes LED se utilizan típicamente para aplicaciones de red de área local, donde la demanda de velocidad de transmisión está en el orden de cientos de Mbps y distancias no superiores a 2 Km [8].
- El diodo de inyección láser ILD, por el contrario, emite una luz intensa infrarroja típicamente entre 1310 nm y 1625 nm, se emplea en fibras monomodo, tiene una frecuencia de modulación típica de hasta 10 GHz y una corriente de excitación de 5 a 40 mA; características que permiten

alcances de hasta 100 Km sin repetidores y velocidades superiores a las usadas por el LED [8].

1.2.2 FIBRA ÓPTICA [9]

La fibra óptica como canal de transmisión es un filamento de material dieléctrico, vidrio, sílice o polímero, que consta de un núcleo con índice de refracción n_1, rodeado de un revestimiento de índice de refracción menor que el del núcleo n_2.

La diferencia de los índices de refracción permite que la luz que viaja por el núcleo experimente la condición de reflexión interna total (TIR[2]) en el límite entre el núcleo y revestimiento, este fenómeno es necesario para que la luz contenida dentro del núcleo pueda transmitirse a lo largo de la fibra.

En la Figura 1.2 se visualiza los tipos de fibra óptica que se puede tener dependiendo de número de modos que puede propagar, así:

- Fibras monomodo, poseen un diámetro del hilo de fibra más reducido, con un núcleo que mide entre 8 y 10 µm y, un solo modo de transmisión que se propaga de manera directa, permitiendo mayores alcances respecto a la fibra multimodo con una atenuación típica de 0,1 a 0,5 dB/Km [10].
- Fibras multimodo, poseen un diámetro de núcleo amplio de entre 50 y 62,5 µm, propagan varios modos de transmisión simultáneamente y el acoplamiento de las fuentes de luz resulta más sencillo. La atenuación típica de este tipo de fibra está entre 0,3 a 1 dB/Km, por lo que es recomendable utilizarla en enlaces de cientos de metros [11].

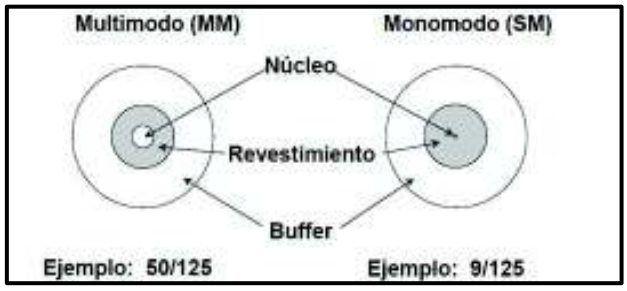


Figura 1.2 Tipos de fibra óptica según el número de modos de propagación [12].

[2] Reflexión interna total (TIR): Fenómeno que experimenta la luz al cambiar de un medio óptico con mayor índice de refracción a uno de menor, ocasionando que la luz incidente no pueda atravesar el medio reflejándose completamente.

1.2.3 RECEPTOR ÓPTICO

En el lado del receptor óptico del sistema de comunicaciones se tiene esencialmente el filtro óptico y el detector fotoeléctrico.

Los filtros ópticos son dispositivos que están colocados al extremo de un sistema de comunicación óptica antes de la detección, además son capaces de seleccionar y dejar pasar una banda de longitudes de onda y eliminar el resto.

Los fotodetectores de luz son un diodo tipo P-N intrínseco, (*Positive Intrisec Negative*, PIN), o un fotodiodo de avalancha (*Avalanche Photodiode,* APD).

- El fotodetector PIN basa su funcionamiento en la intercalación de una zona con material intrínseco (I) entre la unión P-N, tiene una mayor eficacia, fabricación sencilla, generación de bajo ruido, gran ancho de banda, baja sensibilidad; características que conllevan a que su utilización sea en transmisiones de corto alcance.
- El fotodetector APD tiene una sensibilidad 10 veces mayor que los fotodiodos PIN, presentan el efecto de ganancia por el fenómeno de avalancha, generan mayor ruido y requieren de menor amplificación adicional, también, tienen un costo más elevado y se utilizan en sistemas de transmisión con altas velocidades en fibras monomodo y fuentes láser.

1.3 AMPLIFICADORES ÓPTICOS

La introducción en el mercado de los amplificadores ópticos a finales de los años 80 revolucionó los sistemas de comunicaciones ópticas, que junto con la tecnología de multiplexación por longitud de onda (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM) ha logrado la transmisión de múltiples canales sobre un mismo hilo de fibra, con velocidades de cientos de Tbps y distancias desde miles de kilómetros hasta distancias transoceánicas, proporcionando altas capacidades que son requeridas en las redes de comunicación actuales y futuras.

Un amplificador óptico es un dispositivo que aumenta los niveles de señal débiles en enlaces de largo alcance y provee al receptor óptico de una señal con suficiente potencia para ser reconocida y procesada.

En la sección 5.1 de la recomendación ITU–T G.661 (Definición y métodos de prueba de los parámetros genéricos de los dispositivos y subsistemas de amplificadores ópticos), se especifica el significado de los principales parámetros que caracterizan a los amplificadores ópticos (ver Anexo A). A continuación, se muestran los siguientes:

- **Ganancia:** En un amplificador óptico representa la relación entre la potencia óptica de señal de salida y entrada, expresada en dB.
- **Figura de ruido (*Noise Figure*, NF):** Es un parámetro que 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):** Nivel de potencia del ruido existente en los amplificadores ópticos debido al proceso de emisión espontánea, expresada en dBm.
- **Potencia de salida de saturación:** Potencia óptica asociada a la señal de salida, en donde la ganancia se reduce 3 dB con respecto a la ganancia de pequeña señal[3].
- **Relación señal a ruido óptica (*Optical Signal Noise Ratio*, OSNR)** [13] [14]: Es un parámetro que representa la relación entre la potencia de señal y ruido óptico; define de cierta manera el rendimiento y comportamiento de un sistema, es así como al obtener valores bajos de OSNR probablemente en la recepción no se detectará ni recuperará la señal. Teniendo valores mínimos de OSNR entre 10 y 15 dB.

  Cabe mencionar que la OSNR en los amplificadores ópticos viene expresada por la Ecuación 1.1

$$OSNR_{dB} = 58 + P_{in} - \Gamma(dB) - NF_{dB} - 10\log N$$

NF= *figura de ruido* Pin= *potencia de entrada*

Γ = *pérdidas del enlace* N= *número de pérdidas*

Ecuación 1.1 Cálculo de la OSNR en amplificadores ópticos

[3] Ganancia de pequeña señal: Es la ganancia obtenida para una señal de entrada pequeña que no causa saturación de ganancia, manteniendo al amplificador funcionando en régimen lineal.

- **Tasa de bits errados (*Bit error rate*, BER):** Se define como el número de bits errados respecto al total de bits transmitidos en un intervalo de tiempo; este parámetro evalúa la calidad de los sistemas de comunicación óptica, estableciendo los siguientes rangos [15]:

  Sistemas muy buenos: BER = 10^{-9} a 10^{-16}.

  Sistemas buenos: BER = 10^{-6}.

  Sistemas degradados: BER = 10^{-3} a 10^{-5}.

  Sistemas dañados: BER > 10^{-3}.

A continuación, se detallan las principales ventajas de los amplificadores ópticos con respecto a los amplificadores electro - ópticos:

- **Fiabilidad:** El uso de los amplificadores ópticos permite la amplificación de la señal luminosa, evitando el proceso de conversión de señal óptica a señal eléctrica y viceversa; logrando de esta manera limitar las fallas que se producen con el uso de un amplificador electro – óptico e incrementar la fiabilidad en el enlace.
- **Flexibilidad:** Un amplificador óptico realiza la amplificación de la señal de entrada sin considerar el código de línea que sea utilizado para la transmisión; por esta razón, de ser necesario un cambio en la velocidad o el formato de código se modifica únicamente estos parámetros en el transmisor o receptor, sin tener que realizar cambio alguno en el amplificador; a diferencia de un regenerador electro-óptico, el cual está diseñado para el uso de una señal en particular con características propias de código y velocidad; esta propiedad hace más flexible a los amplificadores ópticos para enlaces de largas distancias, tales como la transmisión por cables submarinos.
- **Multiplexación por división de longitud de onda (WDM):** Esta multiplexación permite la transmisión de múltiples canales sobre un único hilo de fibra óptica. Al utilizarlo con un amplificador óptico, el conjunto de canales transmitidos es amplificado de manera directa; por otra parte, al utilizarlo con un amplificador electro – óptico se debería demultiplexar el conjunto de canales transmitidos y posteriormente amplificar cada uno. Es

decir, mediante el desarrollo del amplificador óptico se ha hecho necesaria la inclusión de éstos en los sistemas de comunicación de múltiples canales.

- **Costo:** A medida que los amplificadores ópticos se introdujeron en el mercado, bajaron considerablemente su costo; de manera que pueden ser asequibles y permiten su uso en los sistemas de comunicación.

1.3.1 COMPONENTES DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS [16]

1.3.1.1 Sistema de bombeo

En los amplificadores EDFA y Raman se utiliza 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.

En los amplificadores ópticos EDFA y Raman se puede acoplar las fuentes de bombeo en las siguientes configuraciones:

- **Bombeo Codireccional:** La señal de bombeo se propaga en el mismo sentido de la señal a transmitirse.
- **Bombeo Contradireccional:** La señal de bombeo se propaga en sentido contrario a la señal a transmitirse con la finalidad de evitar la amplificación de los componentes no lineales.
- **Bombeo Bidireccional:** La señal de bombeo se propaga tanto en el mismo sentido como en el opuesto y, al utilizar más de una fuente de bombeo genera una mayor ganancia y bajas figuras de ruido.

En cuanto a los amplificadores ópticos de semiconductor SOA, se tiene un sistema de bombeo diferente, el cual consiste en inyectar corriente eléctrica en la zona activa del semiconductor generando amplificación.

1.3.1.2 Acoplador selectivo de longitud de onda [17]

Dentro de los componentes principales de un amplificador óptico se tiene el acoplador selectivo de longitud de onda, también conocido como acoplador WDM; estos dispositivos se utilizan para combinar o separar la potencia óptica de la fuente de bombeo y la señal óptica a ser amplificada, por lo que se dispone de un

acoplador WDM dependiendo de la configuración de bombeo que se emplee, ver Figura 1.3.

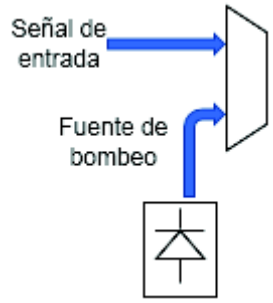


Figura 1.3 Acoplador (combinador) selectivo de longitud de onda.

1.3.1.3 Aislador óptico

Son dispositivos que transmiten la luz en una única dirección con la finalidad de evitar la inserción de señales de ruido interno del amplificador en las entradas y salidas; es decir el aislador permite que la luz pase en una sola dirección, incrementando el rendimiento del sistema.

1.3.2 TIPOS DE AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Los amplificadores ópticos se clasifican según su aplicación y proceso de emisión estimulada. A continuación, se describen los siguientes:

1.3.2.1 Según su aplicación [18]

Se destacan los siguientes amplificadores principales:

- Amplificador de potencia[4].
- Preamplificador[5].
- Amplificador de línea[6].

[4] Amplificador de potencia: Se sitúa luego del bloque transmisor seguido de la fuente óptica para elevar su nivel de potencia, logrando el incremento de la distancia de transmisión (ver Anexo B).
[5] Preamplificador: Se ubica justo antes del receptor óptico para mejorar su sensibilidad, generalmente es un dispositivo de muy bajo ruido.
[6] Amplificador de línea: Se ubican en los puntos intermedios de un enlace de fibra óptica con el fin de compensar las pérdidas por la atenuación que presentan las señales al propagarse por el medio de transmisión.

1.3.2.2 Según el proceso de emisión estimulada [19]

Los amplificadores de este tipo se caracterizan porque tienen una fuente de bombeo externa que inyecta energía en su zona activa[7], la misma que es absorbida por los electrones del medio a fin de que incrementen sus niveles de energía para producir la inversión de población que es necesaria para tener amplificación. Por consiguiente, el flujo inicial de fotones representa el número de átomos excitados que se encuentran en la cavidad amplificadora en mayor proporción que el número de átomos que se encuentran en su estado fundamental. Dentro de este grupo están los amplificadores de semiconductor (SOA), los de fibra dopada con erbio (EDFA) y Raman, cuyas características y principio de funcionamiento se describen a continuación.

Cabe mencionar que en la sección 5.3 de la recomendación ITU-T G.696.1 [20], se especifica el rango de longitudes de onda comprendidas en cada banda de operación, así:

Banda	Ventana	Intervalo
Banda O	Segunda Ventana	de 1260 a 1360
Banda S	Quinta Ventana	de 1460 a 1530
Banda C	Tercera Ventana	de 1530 a 1565
Banda L	Cuarta Ventana	de 1565 a 1625

Tabla 1.1 Bandas del espectro electromagnético [20].

1.3.3 AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA) [21]

En la Universidad de Southampton (*United Kingdom*, UK) y los laboratorios Bell se desarrolló el primer amplificador EDFA para una longitud de onda de operación de 1550 nm, demostrando exitosamente su funcionamiento en el año de 1987.

Las altas ganancias obtenidas con las fibras dopadas de erbio constituyen al EDFA como el primer amplificador óptico exitoso que revolucionó la industria de las comunicaciones a principios de los años noventa y, hasta la actualidad es utilizado en la mayoría de los sistemas de comunicaciones por fibra, especialmente en los sistemas multiplexados por longitud de onda (WDM).

[7] Zona Activa: Región donde se manifiestan las propiedades de amplificación.

1.3.3.1 Principio de funcionamiento [22]

Un amplificador de fibra dopada con erbio consta de una sección corta de fibra que contiene en su núcleo una pequeña cantidad controlada del elemento de tierra rara (erbio) añadido al vidrio en forma de un ion (Er^{+3}).

La amplificación ocurre por el mecanismo de emisión estimulada, donde una señal de bombeo externa excita los iones de erbio y consigue ganancia en las longitudes de onda de las bandas C y L.

De manera general en la Figura 1.4 se presenta el espectro de ganancia del amplificador EDFA en banda C.

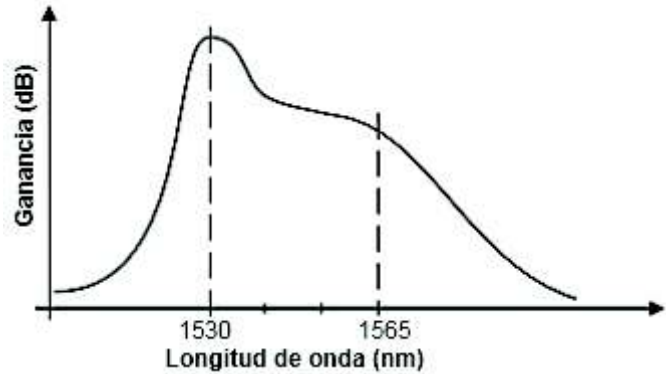


Figura 1.4 Espectro de ganancia del EDFA en banda C [5].

Finalmente, en la Figura 1.5 se presenta el esquema básico de un amplificador EDFA, el cual tiene como elementos principales el tramo de fibra dopada con erbio, una o varias fuentes de bombeo, acopladores selectivos de longitud de onda y aisladores.

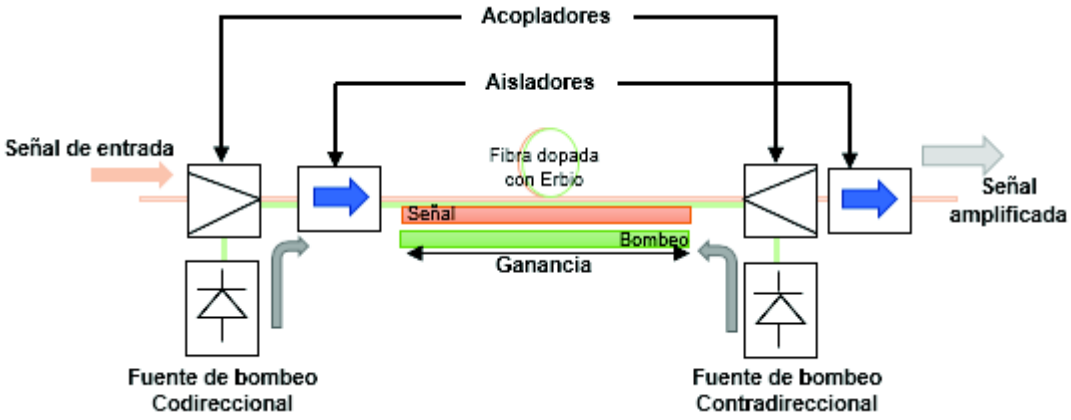


Figura 1.5 Esquema del amplificador EDFA [14].

En base al esquema de la Figura 1.5, se emite una señal de entrada que mediante el acoplador selectivo de longitud de onda se combina con la fuente de bombeo y posteriormente se inyecta al EDFA, en donde se produce la amplificación.

A la entrada y salida del amplificador se dispone de aisladores, los cuales cumplen la función de impedir la propagación del ruido de emisión espontánea ASE y señales reflejadas hacia el EDFA.

1.3.3.2 Características [17]

Los amplificadores EDFA presentan las siguientes características:

- El EDFA amplifica principalmente en la banda de transmisión C, en el intervalo de 1530 a 1565 nm, en donde la longitud de la fibra dopada con erbio varía usualmente entre 5 y 10 m; en tanto que para cubrir una porción de las longitudes de onda de banda L es necesario incrementar la longitud de la fibra dopada entre 30 y 100 m, a fin de amplificar en el rango de 1565 a 1620 nm.
- Los EDFA tienen ganancias típicamente desde los 15 a 45 dB.
- El EDFA emplea dos longitudes de onda de bombeo de 980 y 1480 nm, siendo el bombeo a 980 nm el que presenta mejores prestaciones en cuanto a figura de ruido, pero tiene menores niveles de ganancias y potencias de salida; con el bombeo a una longitud de onda de 1480 nm se consiguen mayores niveles de ganancia y altas potencias de salida; sin embargo, los valores de figura de ruido son más altos que los conseguidos a una longitud de onda de bombeo de 980 nm.
- El EDFA acorde las especificaciones de la ITU G.661 (Anexo A) indica que la figura de ruido (NF) está influenciada por la longitud de onda de bombeo; así, a 980 nm la NF varía entre 5 y 6 dB y, para 1480 nm la NF está entre 6 y 7 dB típicamente.
- Las potencias de bombeo están acorde a las longitudes de onda de bombeo (Anexo C-3): para 980 nm se utilizan potencias entre 100 y 350 mW y para 1480 nm las potencias varían entre 120 y 350 mW.

- La potencia de saturación se encuentra en el rango de +10/+20 dBm (Anexo A).
- En cuanto a la potencia de entrada, se consideran valores comprendidos entre -40 y 10 dBm, bajo los cuales se obtienen ganancias más altas cuando la potencia de la señal de entrada es menor (Anexo C).

En cuanto a la configuración de bombeo se destacan las siguientes características:

- Los valores de figura de ruido y potencia de salida del EDFA son menores en la configuración de bombeo codireccional que con un bombeo contradireccional. Por lo tanto, al combinar la baja figura de ruido del bombeo codireccional, y las altas potencias de salida del bombeo contradireccional, permiten que la configuración de bombeo bidireccional obtenga mejores prestaciones del amplificador.
- Para la configuración de bombeo bidireccional, la ganancia es superior a los valores obtenidos en las configuraciones de bombeo codireccional y contradireccional.
- Desde el punto de vista de ruido se tiene una notable diferencia ya que se alcanzan figuras de ruido (NF) superiores con el uso de un bombeo contradireccional que cuando se tiene fuentes de bombeo en configuración de bombeo codireccional y bidireccional.

1.3.3.3 Ventajas y desventajas [23]

A continuación, se señalan las siguientes:

- Gran ancho de banda óptico, suficientemente amplio como para introducir y amplificar al mismo tiempo un alto número de longitudes de onda, sin *crosstalk*[8] entre los canales.
- Dispositivo completamente de fibra y de fácil acoplamiento en los sistemas de transmisión, permitiendo la compensación de los problemas de pérdida

[8] *Crosstalk*: Transferencia de potencia de un canal a una longitud de onda a otro canal, dentro de un mismo sistema de comunicaciones.

por inserción y reducción de los efectos de la dispersión cromática[9] de la fibra.

En cuanto a sus limitaciones se presentan las siguientes:

- Al utilizar un amplificador en los sistemas multicanal se presenta un espectro de ganancia no perfectamente plano puesto que, varios de los canales se amplifican más que otros, lo que genera inconvenientes en los enlaces de largo alcance con varias etapas de amplificación.
- El EDFA amplifica el ruido recibido con la señal, éste puede ser insignificante en comparación con el ruido en entornos eléctricos, pero puede ser significativo si se tiene un gran número de amplificadores conectados en cascada sobre un mismo enlace de largo alcance.

1.3.3.4 Aplicaciones [5]

Los amplificadores de fibra dopada con erbio cumplen varias funciones en los sistemas de comunicaciones por fibra óptica; teniendo las siguientes:

- En los sistemas de largo alcance (*Dense* Wavelength *Division Multiplexing*, DWDM[10]), donde su inclusión incrementa la distancia de transmisión y reduce el costo de implementación en redes de comunicación por fibra óptica.
- El uso del EDFA en enlaces de gran capacidad y sistemas de comunicación óptica de alta velocidad disminuyen en parte los problemas de baja sensibilidad de los receptores.
- El EDFA se puede emplear como amplificador de línea en redes de acceso de abonado de fibra óptica de largo alcance, ya que compensa las pérdidas por atenuación en la fibra de transmisión y de esta manera incrementa el número de suscriptores.

---

[9] Dispersión cromática: Tiene un alto impacto en las fibras monomodo, es causada por la variación de velocidad que experimenta un haz de luz al propagarse a través de una fibra con una determinada longitud de onda [19].

[10] DWDM: Multiplexación por longitud de onda densa, son sistemas que cubren distancias de 300 – 1600 Km, con velocidades típicas de 10 a 40 Gbps por canal y permiten la multiplexación de 80 a 640 canales con espaciamiento de 6.25 GHz [53].

- En sistemas de televisión por cable (Community Antenna Television, CATV[11]), el EDFA actúa como amplificador de potencia con la finalidad de mejorar en gran medida la potencia de salida del transmisor óptico, lo que compensa las pérdidas de inserción, amplía considerablemente la red de distribución y aumenta el número de suscriptores.

1.3.4 AMPLIFICADOR RAMAN [24]

El estudio de los amplificadores Raman comenzó en los años 80 por Stolen e Ippen[12], quienes demostraron la amplificación de Raman en fibras ópticas altamente no lineales; aunque estas investigaciones permanecieron únicamente a nivel de laboratorio.

Para finales de los 90 resurge el interés de su investigación y es cuando empieza el despliegue en casi todos los nuevos sistemas de transmisión de fibra óptica en largas y ultra largas distancias, constituyéndolos como uno de los dispositivos ópticos no lineales ampliamente comercializados en telecomunicaciones.

Dentro de sus principales características está el mejoramiento de la figura de ruido (NF) y reducción de la penalización no lineal de los sistemas de fibra, permitiendo transmisiones de largo alcance, mayores velocidades de transmisión y espaciamiento de canal más estrecho.

1.3.4.1 Principio de funcionamiento [25] [26] [27]

Los amplificadores Raman se basan en el fenómeno físico no lineal de scattering estimulado de Raman (*Stimulated Raman Scattering,* SRS), conocido también como efecto Raman, que tiene lugar cuando un bombeo de alta intensidad atraviesa un medio (en este caso la fibra óptica altamente no lineal es el medio amplificador), 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. Es decir, se caracteriza por extraer energía de un láser de bombeo para amplificar una señal óptica débil.

---

[11] CATV: Se refiere a la aplicación de televisión por cable, para distribuir las señales de TV a zonas donde no se reciben las ondas de manera adecuada. Las longitudes de onda de operación comprenden entre 1540 y 1560 nm [19].

[12] Stolen e Ippen: Científicos que demostraron la amplificación de Raman en fibras ópticas.

Los amplificadores Raman mayormente comercializados son los de banda C y L; aunque, hoy en día varios estudios muestran que se está trabajando con estos amplificadores en una porción de banda S comprendiendo las longitudes de onda entre 1498 nm y 1529 nm.

En la Figura 1.6, se observa que el espectro de ganancia del amplificador Raman es dependiente de la longitud de onda de bombeo, con un valor pico de ganancia que se produce aproximadamente a 100 nm (13 THz) por encima de la longitud de onda de bombeo, permitiendo que se genere amplificación en las bandas S, C y L; siempre y cuando se utilice longitudes de onda de bombeo apropiadas.

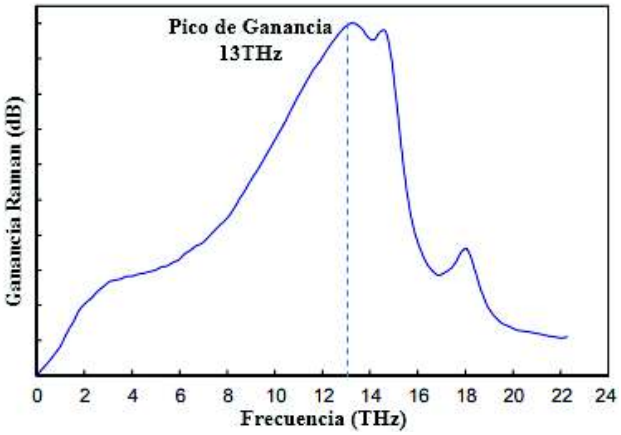


Figura 1.6 Espectro de ganancia de Raman [24].

Finalmente, en la Figura 1.7 se indica el esquema básico de un amplificador Raman constituido por componentes: acopladores selectores de longitud de onda, aisladores ópticos y una o varias fuentes de bombeo.

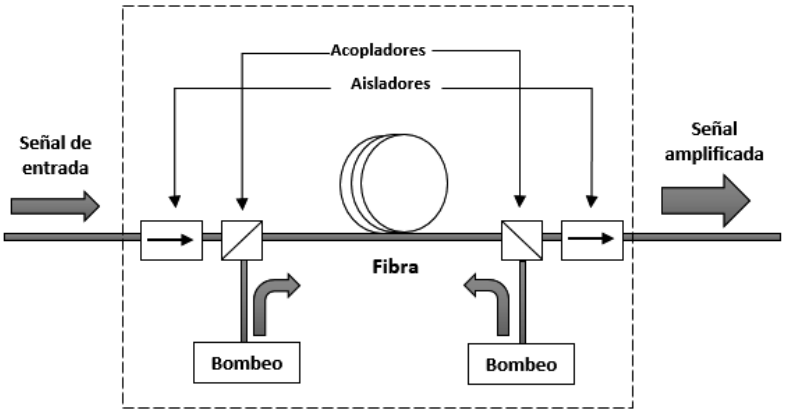


Figura 1.7 Esquema del amplificador Raman [25].

En base al esquema de la Figura 1.7, se emite una señal de entrada que mediante el acoplador selectivo de longitud de onda se combina con la señal de bombeo y posteriormente se inyectan al amplificador Raman, en donde se produce el incremento de potencia.

A la entrada y salida del amplificador se dispone de aisladores, los cuales evitan señales reflejadas hacia el Raman.

1.3.4.1.1 Efecto Raman

El físico Dr. C.V. Raman, descubrió en el año del 1926, que una pequeña fracción de la onda que es esparcida por las moléculas que forman el medio de transmisión es totalmente diferente a la onda incidente, ya que los desplazamientos de frecuencias dependen de la estructura química de las moléculas. Razón por la cual esta teoría del efecto Raman está relacionada directamente con los campos vibracionales que se producen en las moléculas [19].

Este efecto es conocido también como scattering estimulado de Raman, y se presenta cuando una señal en un campo óptico intenso interactúa con las moléculas componentes de la fibra óptica, provocando un desplazamiento en frecuencia en los fotones incidentes, así pues, una pequeña fracción de la luz o fotón es dispersada ópticamente a frecuencias diferentes e inferiores, que la frecuencia principal [28].

1.3.4.2 Características [19] [29] [30]

El amplificador Raman presenta las siguientes características:

- La ganancia Raman alcanza valores usualmente entre 5 y 40 dB.
- Potencias de entrada entre -40 y 5 dBm, obteniéndose ganancias más altas cuando la potencia de la señal de entrada es menor.
- Valores de figura de ruido (NF) típicamente entre 3 y 6 dB.
- La ganancia de Raman es dependiente de la longitud de fibra no lineal, ya que crece conforme aumente la longitud, pero en un punto empieza a decaer debido al agotamiento de la fuente de bombeo, por lo que se recomienda emplear longitud de fibra no lineal menores a 50 Km. [31]

- Potencias de bombeo acorde a la banda de operación, tal es el caso para:

  Banda S: potencia de bombeo entre 300 mW y 600 mW.
  Banda C: potencia de bombeo entre 430 mW y 800 mW.
  Banda L: potencia de bombeo entre 1 W y 1.2 W.

- Múltiples fuentes de bombeo a diferentes longitudes de onda alcanzan una ganancia plana en una gran región espectral, como se observa en la Figura 1.8.

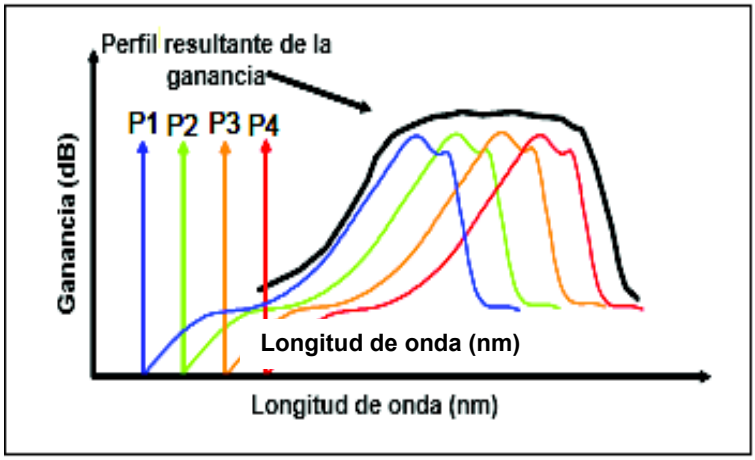


Figura 1.8 Espectro de ganancia de Raman con el uso de múltiples longitudes de onda de bombeo [32].

En cuanto a la configuración de bombeo se destacan las siguientes características:

- El nivel de ganancia es similar tanto con un bombeo codireccional como contradireccional. Mientras que, con un bombeo bidireccional se alcanza niveles superiores de ganancia.
- Desde el punto de vista de ruido se tiene una notable diferencia ya que se alcanzan figuras de ruido (NF) superiores con el uso de un bombeo contradireccional que cuando se tiene fuentes de bombeo en sentido codireccional y bidireccional.

1.3.4.3 Tipos de amplificadores Raman [30] [33]

Según la recomendación ITU-T G.665, referente a las características de los amplificadores Raman y a los subsistemas con amplificación Raman, establece entre sus términos y definiciones lo siguiente:

- **Amplificadores Raman Distribuidos:** Son aquellos cuyo efecto de amplificación se consigue en una porción de la fibra óptica de transmisión. Se dice que son distribuidos, ya que todo o parte de la fibra de transmisión se utiliza para la amplificación.
- **Amplificadores Raman Discretos:** Son aquellos cuyo efecto de amplificación se consigue gracias a la dispersión estimulada Raman en la fibra y todos los componentes físicos del amplificador están contenidos dentro del dispositivo.

1.3.4.4 Ventajas y desventajas [23]

Los amplificadores Raman presentan las siguientes ventajas:

- Trabajan en rangos de longitudes de onda de banda S, las cuales no son asequibles para el amplificador EDFA.
- El espectro de ganancia se ajusta a la longitud de onda de bombeo, o a su vez utilizando múltiples fuentes de bombeo.

En cuanto a las desventajas se tienen las siguientes:

- En comparación a los amplificadores EDFA, tienen potencias de señal de salida más bajas, a pesar del uso de altas potencias de bombeo.
- Existe una alta dependencia del grado de polarización (*degree of Polarization,* DOP) con la ganancia Raman, lo cual se convierte en un gran desafío para estos amplificadores (Anexo A).
- Presenta un tiempo de respuesta rápido, lo cual en ocasiones genera nuevas fuentes de ruido.

1.3.4.5 Aplicaciones [23] [24]

A continuación, se mencionan algunas aplicaciones:

- Los amplificadores Raman trabajan en conjunto con los EDFA, dando origen a los amplificadores híbridos.
- El amplificador Raman presenta buen desempeño en aplicaciones CATV.

- Permite la transmisión en tramos de largo y ultra largo alcance con velocidades de 10, 40 y 100 Gbps por canal óptico (Anexo D-1).

1.3.5 AMPLIFICADOR ÓPTICO DE SEMICONDUTOR (SOA) [34] [35] [36]

Los primeros estudios realizados sobre los amplificadores ópticos de semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier,* SOA) a nivel de laboratorio surgieron en 1960 con la invención del láser de semiconductor.

Fue entre 1970 y 1980 que tomó importancia el estudio del SOA como amplificador en sistemas de comunicaciones ópticas, consiguiendo avances notables en cuanto a la construcción y diseño como tal del dispositivo físico, para que puedan operar en las regiones de 1300 y 1550 nm (bandas O y C respectivamente).

Desde ese periodo, los desarrollos en el diseño del SOA han sido progresivos, con los avances en materiales semiconductores, mejoras en tecnología, circuitos integrados, entre otros; los que han permitido que el SOA tenga un costo competitivo (bajo) con los otros amplificadores ópticos en el mercado.

1.3.5.1 Principio de funcionamiento [34] [36] [37]

Un SOA, también conocido como amplificador laser de semiconductor (*Semiconductor Laser Amplifier,* SLA[13]), es un dispositivo optoelectrónico capaz de amplificar una señal fotónica que atraviesa el medio activo, bajo condiciones de operación específicas.

En la Figura 1.9 se observa la estructura en forma de guía de onda, en la cual una señal débil atraviesa de la fibra a la guía de onda de semiconductor y después regresa a la fibra como una señal amplificada; esto sucede mientras el SOA se encuentra en la región activa y está polarizado de manera adecuada.

De esta manera, para que el SOA funcione como amplificador se debe aplicar una corriente eléctrica que permita disponer de una gran concentración de portadores en la cavidad activa y con ello una ganancia óptica debido a la emisión estimulada.

[13] SLA: Amplificadores diseñados para instalaciones fijas que requieran alta calidad de amplificación.

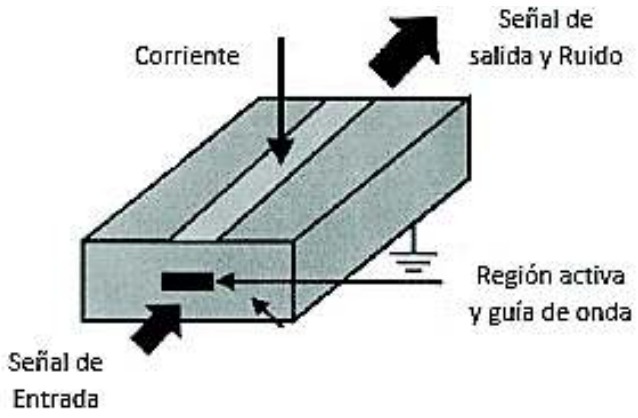


Figura 1.9 Estructura de un Amplificador Óptico de Semiconductor (SOA) [36].

En un SOA los electrones se inyectan desde una fuente de corriente externa, que conlleva a que el SOA trabaje en la zona activa; permitiendo que los electrones ocupen la banda de conducción (BC) que tiene un nivel de energía E_2, dejando una serie de huecos en la banda de valencia (BV) con un nivel menor E_1.

En el semiconductor son posibles tres mecanismos de radiación, ver Figura 1.10:

- **Absorción estimulada (*Stimulated Absortion*):** Sucede cuando el fotón que incide en el semiconductor provoca una recombinación estimulada llevando un electrón de la BV a la BC.
- **Emisión estimulada (*Stimulated Emission*):** Sucede cuando un fotón que incide en el semiconductor provoca una recombinación estimulada llevando un electrón de la BC a la BV, proceso que genera un nuevo fotón y por el cual se produce la amplificación.
- **Emisión espontánea (*Spontaneous Emission*):** Es el proceso donde los electrones excitados que se encuentran en la BC pierden energía y saltan a la BV, liberando un fotón que puede a su vez estimular otros electrones.

  Este proceso está relacionado a las pérdidas ya se considera como el ruido que produce el propio dispositivo (*Amplified Stimulated Emission,* ASE).

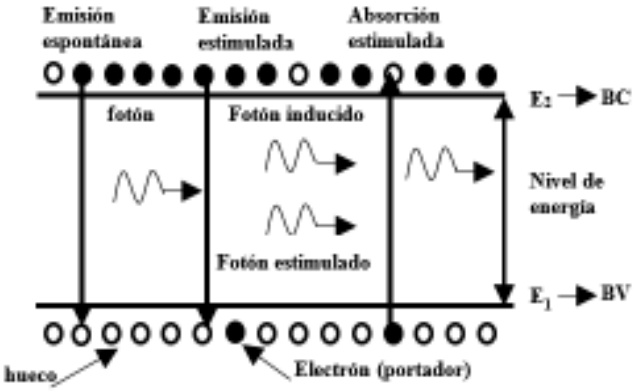


Figura 1.10 Procesos Radiativos en los niveles de energía [36].

1.3.5.2 Características [38]

El amplificador SOA presenta las siguientes características:

- Ganancias usualmente mayores a 15 dB, pero no superiores a las ganancias obtenidas en EDFA y Raman (menores a 30 dB).
- Niveles altos de figura de ruido (NF) comparado a los de los amplificadores de fibra EDFA y Raman, que según las especificaciones técnicas del Anexo E comprenden los siguientes rangos:

  12 a 14 dB para banda O.

  7 a 11,5 dB para banda C.
- El sistema de bombeo es de tipo eléctrico, ya que se inyecta una corriente, que según las especificaciones técnicas del Anexo E tiene un valor típico de 500 mA.
- El tamaño del dispositivo es pequeño en el orden de los milímetros (mm), a diferencia de los amplificadores de fibra EDFA y Raman, que están en el orden de los centímetros (cm).
- Potencia de salida de saturación usualmente alta con valores entre 14 y 17 dBm, pero no superiores a las que se alcanzan con el EDFA.
- Introduce muy alto *crosstalk* cuando se utiliza al SOA en sistemas multicanal WDM [39] [40].

1.3.5.3 Tipos de amplificadores SOA

El amplificador de semiconductor SOA se clasifica por su estructura y por sus características de realimentación.

1.3.5.3.1 Según su estructura [34]

Diseñados acorde a su cavidad activa, con la finalidad de obtener dispositivos más rápidos, con características como: aumento de ganancia, estabilidad de temperatura, alta potencia de saturación.

A continuación, se distinguen los siguientes:

- **SOA con estructura *bulk*:** Es la estructura más sencilla, en la que la cavidad activa está formada por un semiconductor masivo (*bulk*), es decir que la totalidad de la guía de onda está compuesta por un solo tipo de semiconductor.
- **SOA de pozos cuánticos:** Definido así, ya que se reduce las dimensiones de la cavidad activa a un espesor menor de 20 nm, donde los estados de energía pasan de ser continuos a ser discretos; proceso que conlleva a una disminución de la ganancia.

1.3.5.3.2 Según sus características de realimentación [36] [41]

Estos dispositivos son capaces de amplificar la señal óptica con poco consumo de potencia y son adecuados para uso en fibras monomodo. Según se evite la realimentación en sus cavidades, se clasifican en:

- **Amplificadores de enganche por inyección:** Consisten en láseres de semiconductor polarizados por encima del umbral, que son empleados para la amplificación de la señal óptica.
- **Amplificador Fabry-Perot (FP):** Este amplificador tiene reflexiones bastante significativas y variantes en sus caras; por lo que presentan alto rizado de ganancia, ancho de banda estrecho, sensibilidad a las variaciones de temperatura, corriente y polarización de la señal.

- **Amplificador de onda viajera (*Traveling Wave SLA*, TWSLA):** Este amplificador tiene reflexiones que son despreciables; por lo que presentan bajo rizado de ganancia, ancho de banda considerablemente mayor y corriente de polarización alta.

1.3.5.4 Ventajas y desventajas [23] [36]

A continuación, se destacan las siguientes ventajas del amplificador SOA:

- Son amplificadores compactos, por lo que puede ser integrado con otros dispositivos.
- Opera en segunda ventana, cuyo rango es inaccesible para los amplificadores EDFA y Raman.
- Factibilidad de construcción a diferentes longitudes de onda, variando la composición del material.

En la actualidad, el amplificador SOA en comparación a los amplificadores EDFA y Raman presentan algunas desventajas como:

- Las caras del amplificador pueden producir reflexión y con esto causar un rizado en el espectro de ganancia.
- Mayor factor de ruido a la salida del dispositivo, además que el SOA, como tal, introduce su propio ruido.
- Son sensibles a la polarización, por lo que se debe aplicar la corriente eléctrica de manera adecuada.
- Son muy no lineales cuando se opera a velocidades altas, lo que deteriora la capacidad de transmisión de los sistemas y puede generar intermodulación y distorsión, por lo que en las especificaciones del Anexo E se establece una velocidad de transmisión de hasta 10 Gbps.
- Al no tener un confinamiento óptico[14] fuerte ocasiona fugas de señal, por lo que se tiene altas pérdidas de inserción y un difícil acoplamiento entre la fibra y el semiconductor.

[14] Confinamiento óptico: Fenómeno por el cual la radiación óptica permanece en una determinada región (zona activa) y por tanto experimenta ganancia.

1.3.5.5 Aplicaciones [19] [34] [36] [41]

Además de las aplicaciones típicas del SOA como amplificador de potencia, preamplificador y amplificador de línea, se encuentra al SOA en otras aplicaciones como:

- **Conversor de longitud de onda totalmente óptico:** Este proceso consiste en trasladar la información de una señal que modula una portadora óptica a una señal continua cuando ambas atraviesan el amplificador con diferentes longitudes de onda.

  Dentro de esta aplicación se mencionan los fenómenos no lineales existentes en el SOA como la modulación cruzada de ganancia (*Cross Gain Modulation*, XGM[15]), modulación de cruzada de fase (*Cross Phase Modulation*, XPM[16]) y mezcla de cuatro ondas (*Four Wave Mixing*, FWM[17]); estos fenómenos aprovechan la no linealidad de la ganancia del amplificador saturado para realizar el proceso de conversión de longitud de onda.

- **Conmutadores Ópticos:** Han sido objeto de importantes investigaciones en todo el mundo. Es una arquitectura que incorpora las funcionalidades para enrutar paquetes de información únicamente en el dominio óptico sin necesidad de la conversión electro/óptica. El SOA, como tal, se convierte en un elemento importante en esta aplicación, ya que proporciona tres funcionalidades clave: en una etapa inicial como convertidor de longitud de onda, en una etapa intermedia como una puerta selectiva (On/Off) y en una etapa final para la ecualización de la potencia rápida con velocidades de hasta 10 Gbps.

---

[15]XGM: Es un fenómeno no lineal que se da como resultado de la saturación de la ganancia en el SOA. Cuando la potencia de entrada al SOA alcanza una cierta potencia de saturación la ganancia del amplificador disminuye e indica el límite superior de operación lineal [34].

[16]XPM: Es un fenómeno no lineal que involucra dos o más canales ópticos propagándose simultáneamente a diferentes longitudes de onda. En XPM la modulación de intensidad de uno de los canales provoca una modulación de fase de los otros canales que se están propagando en el mismo medio [50].

[17]FWM: Es un efecto no lineal de cuatro longitudes de onda que tiene lugar cuando dos ondas (señal y bomba) o más señales ópticas a diferentes longitudes de onda se inyectan en un SOA y puede generarse nuevos componentes dependientes de las potencias transmitidas con una longitud de onda diferente que combina las frecuencias de las señales ingresadas [34].

CAPÍTULO 2

SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS EDFA, RAMAN Y SOA

En este capítulo se presentan los diferentes simuladores utilizados en comunicaciones ópticas, de los que, posteriormente se seleccionará aquel que tenga mejores características y prestaciones para el desarrollo de este proyecto.

Además, se realiza las diferentes simulaciones de cada uno de los escenarios de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA, en los que se muestra los parámetros de ganancia, figura de ruido (*Noise Figure,* NF), relación señal a ruido óptica (*Optical Signal to Noise Relation,* OSNR), tasa de bits errados (*Bit Error Rate,* BER) y sistema de bombeo para las diferentes bandas de operación.

De esta manera se puede realizar las distintas comparaciones entre la parte teórica previamente expuesta y los resultados de las simulaciones en un capítulo posterior.

2.1 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Un software de simulación constituye una herramienta esencial para entender y comprender de mejor manera el funcionamiento de varias tecnologías previo a ser implementadas; éste permite la simulación de escenarios de aplicación bajo diferentes condiciones y parámetros, por ejemplo, en el campo de la fibra óptica se puede encontrar programas computacionales que simulen el tipo de fibra con varios índices de refracción, el comportamiento de componentes pasivos como conectores, spliters, empalmes, entre otros, con la finalidad de asegurar su funcionamiento adecuado antes de ser fabricados.

En cuanto al diseño y simulación de redes ópticas, se presentan a continuación tres de los simuladores más conocidos; además se describen sus principales características y diferentes aplicaciones, a fin de elegir el software que permita cumplir con los alcances planteados en el presente proyecto. Los simuladores considerados son:

- VPI Transmission Maker^{TM}: perteneciente a la empresa *VPI Photonics Design Automation*, que a su vez es parte de *VPISystems*.

- OptSim®: desarrollado por la empresa *Synopsys*.
- OptiSystem: creado por la empresa *Optiwave*.

2.1.2 VPI TRANSMISSION MAKER ™

El programa VPI Transmission Maker™ es un entorno de diseño de nuevos sistemas de comunicaciones ópticas para aplicaciones de acceso de corto y largo alcance, también combina una potente interfaz de usuario y una amplia gama de módulos ópticos, obteniendo una simulación avanzada y eficiente [42].

Este simulador presenta los diferentes componentes y dispositivos mediante módulos, en los cuales se puede modificar desde el tipo de fibra óptica hasta la inclusión de diversos amplificadores [43].

Posee excelentes características y prototipado virtual, así:

- Diseño de sistemas multicanal WDM de alta capacidad en el orden de los Tbps por segundo, utilizando bandas S, C y L con varias técnicas de amplificación.
- Simulación interactiva que permite el barrido, optimización y secuencia de comandos.
- Evaluación rápida del diseño y validación de sistemas ópticos mediante varias funciones de análisis y bloques de simulación.
- Identificación de parámetros críticos de diseño incluyendo: el láser, amplificador de ganancia, ruido del amplificador, pérdida de trayectoria y rendimiento del sistema.
- Interfaz de simulación que puede trabajar en conjunto con Matlab, Python, C++, ADS de Agilent, entre otros.

El software tiene licencia y su versión de prueba no es de fácil descarga y proceso de instalación. La Figura 2.1 muestra la interfaz gráfica del simulador con las librerías disponibles, área de trabajo y varias herramientas interactivas.

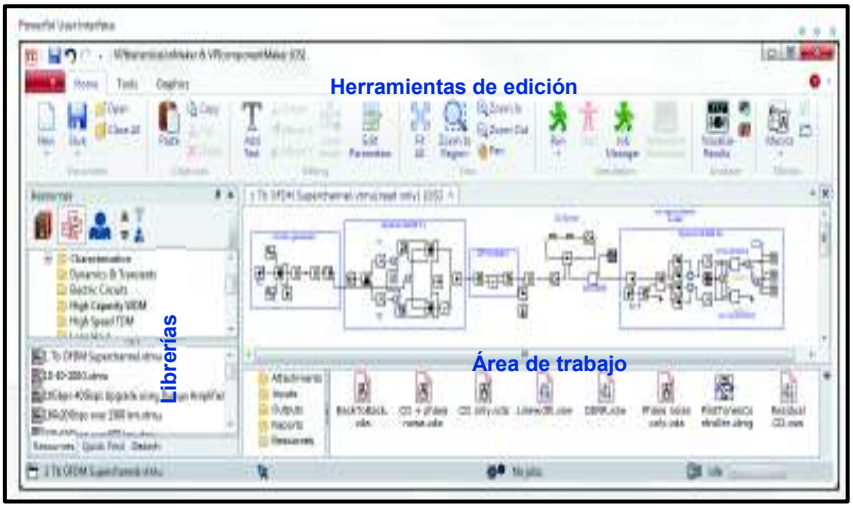


Figura 2.1 Interfaz gráfica VPITransmissionMaker™ [42].

2.1.3 OPTSIM® [44] [45]

OptSim® es una de las herramientas de diseño y simulación de sistemas de comunicaciones ópticas actuales y de próxima generación. Posee técnicas avanzadas de simulación, poderosas herramientas de procesamiento de datos, algoritmos de simulación, una gran biblioteca de arquitectura abierta que incluye más de 400 componentes ópticos y una interfaz gráfica de fácil manejo y comprensión.

Los usuarios finales de OptSim® son típicamente personal de investigación que basa su desarrollo en las comunicaciones de datos e implementación de infraestructura clave para las redes de acceso, metro y larga distancia.

Dentro de las características principales que posee este simulador, se puede detallar lo siguiente:

- Visualizadores tanto en el dominio del tiempo como la frecuencia.
- Interfaz con herramientas de cálculo y simulación como Matlab, que permite el desarrollo de modelos personalizados en Simulink.
- Interacción entre los equipos de prueba de laboratorio Agilent y Luna con la simulación.
- Simulación de varios sistemas ópticos:

    Sistemas DWDM/CWDM.

Sistemas FTTH/PON: BPON, GPON, WDM-PON, PON, etc.

Redes LAN ópticas, etc.

Este simulador es licenciado y su proceso de descarga es complejo. En la Figura 2.2 se muestra la interfaz gráfica del simulador, área de trabajo y parámetros varios.

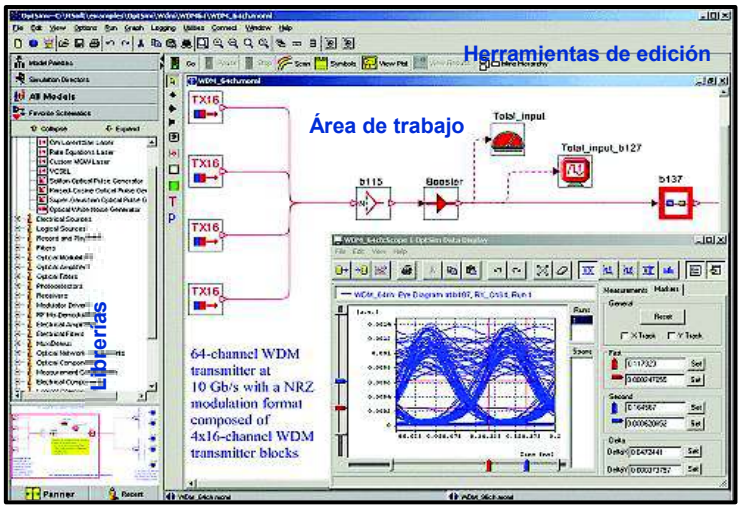


Figura 2.2 Interfaz gráfica OptSim [46].

2.1.4 OPTISYSTEM [44] [47] [48]

OptiSystem es un software de simulación que realiza diseños de sistemas de comunicaciones ópticas, posibilita la configuración de características esenciales y ejecuta diferentes tipos de esquemas acorde a las necesidades del usuario. Incluye una amplia biblioteca que supera los 300 componentes personalizados en función de la longitud de onda [49].

Posee potentes herramientas de visualización y una interfaz de post-procesamiento que brinda un ambiente interactivo y tiene gran similitud a la de Simulink en Matlab, ya que muestra a detalle los componentes gráficos, lista de conexiones, entre otras herramientas necesarias para la simulación.

Dentro de las características relevantes del software se tiene:

- Incorporación de herramientas de análisis que permiten la visualización de: diversos tipos de diagramas en el dominio del tiempo y frecuencia, factor de calidad (Q), nivel de señal, BER, figura de ruido, etc.

- Acceso directo a la base de datos del sistema y visión global del *perfomance* del esquema implementado con opciones de diseño y posibles escenarios de aplicación.
- Software interactivo que importa o exporta datos hacia otros programas de simulación como Matlab.
- Diseño de arquitecturas de redes existentes y de nueva generación, entre las cuales se mencionan [50]:

  CATV o diseño de redes TDM / WDM.

  Redes ópticas pasivas (PON) basada en FTTx.
- Implementación de nuevos dispositivos ópticos como amplificadores, receptores, transmisores, etc.
- Automatización del diseño de cualquier tipo de enlace óptico en la capa física, desde sistemas *Ultra Long Haul* hasta redes (*Local Area Network*, LAN[18]) y (*Metropolitan Area Network*, MAN[19]).

El software de simulación tiene licencia y su versión de evaluación de 30 días es de fácil descarga y comprensión. En la Figura 2.3 se observa la interfaz gráfica del simulador y el entorno de trabajo.

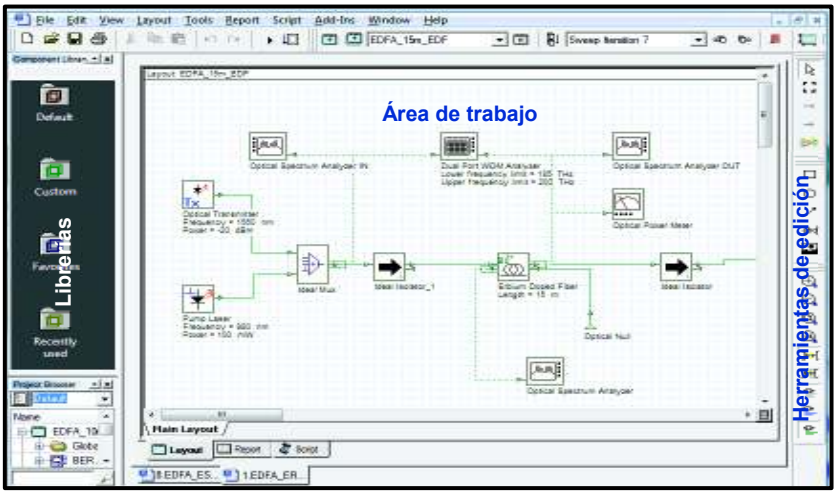


Figura 2.3 Interfaz gráfica OptiSystem [51].

[18] LAN: Estas redes se utilizan para conectar equipos que están en una misma organización dentro de una pequeña área geográfica.
[19] MAN: Estas redes sirven para conectar varias redes LAN que no estén separadas a más de 50 kilómetros de distancia.

2.2 ELECCIÓN DEL SIMULADOR

En la sección anterior se detalló las características, beneficios y aplicaciones de cada uno de los simuladores mayormente utilizados en los sistemas de comunicaciones ópticas.

En la Tabla 2.1 se muestra un cuadro comparativo de las principales características de los softwares de simulación: VPI Transmission Maker™, Optsim® y OptiSystem; a fin de establecer diferencias entre ellos y seleccionar el más adecuado para este proyecto.

Características	VPI Transmission Maker™	OptSim®	OptiSystem
Interfaz de usuario	Gráfica	Gráfica	Gráfica
Lenguajes de programación	Básico	Alto	No es necesario
Librerías de Amplificadores ópticos	EDFA y SOA	EDFA, RAMAN y SOA.	EDFA, RAMAN y SOA.
Parámetros de configuración	Alto	Alto	Alto
Complejidad de manejo	Alto	Medio	Medio
Integración con otras Herramientas	Si	Si	Si
Tipo de Software	Licenciado, sin versión de prueba	Licenciado, sin versión de prueba	Licenciado, con versión de prueba por 30 días.

Tabla 2.1 Cuadro comparativo de los softwares de simulación.

Acorde a los parámetros expuestos previamente, se optó por el software de simulación OptiSystem debido a su baja complejidad de manejo y variedad de librerías para los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA. Además, la búsqueda y descarga del software fue más sencilla que para Optsim® y VPI Transmission Maker™.

2.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN OPTISYSTEM [52]

Una vez seleccionado el software, se procede a analizar los requerimientos para su descarga, proceso de instalación, descripción de los diferentes componentes y

parámetros de configuración empleados en los escenarios de simulación de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA.

2.3.1 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS DE HARDWARE Y SOFTWARE

OptiSystem tiene los siguientes requerimientos mínimos para garantizar su correcto funcionamiento:

- PC con procesador Pentium 4 con 2 GB de memoria RAM.
- PC con velocidad mayor a 2 GHz, 2-4 núcleos es decir procesamiento Intel Core i7, AMD Athlon.
- Sistemas operativos: Microsoft Windows 7/8.1/10 (64 bits).
- 400 MB de espacio libre de disco duro.
- Resolución gráfica de 1024 x 768 píxeles.
- Internet Explorer 5.5 o superior.

2.3.2 PROCESO DE INSTALACIÓN DEL SIMULADOR

Se debe acceder a la página web oficial de OptiSystem, buscar la pestaña de *DOWNLOAD*, acceder a la opción *OptiSystem 14.2.1 – Install* y proceder con la descarga de la versión de prueba del programa. Además, en esta página se encuentra disponible un manual de instalación en formato .pdf (*OptiSystem 14.2.1 Release Notes*), ver Figura 2.4.

Figura 2.4 Visualización de la página web para descarga.

Luego de ello, se solicita que se complete un cuestionario con información personal y un correo institucional válido para que se proporcione una clave de acceso con la cual se registra un usuario, ver Figura 2.5.

Figura 2.5 Creación de usuario para acceso.

Una vez en la página de descarga, se debe seleccionar la versión del sistema operativo ya sea de 32 bits o 64 bits y, a partir de su instalación comienza el período de 30 días de validez, ver Figura 2.6.

Figura 2.6 Presentación de OptiSystem una vez instalado.

2.3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES NECESARIOS PARA LA SIMULACIÓN

En esta sección se detalla brevemente las funcionalidades y principales parámetros de configuración de cada uno de los componentes utilizados en los diferentes escenarios de simulación de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA.

En el presente caso de estudio se utilizará el modo de barrido (*Sweep*) para la variación del rango de valores de algunos de los componentes, permitiendo de esta manera establecer el número de iteraciones con un valor inicial y final, tal como se muestra en la Figura 2.7.

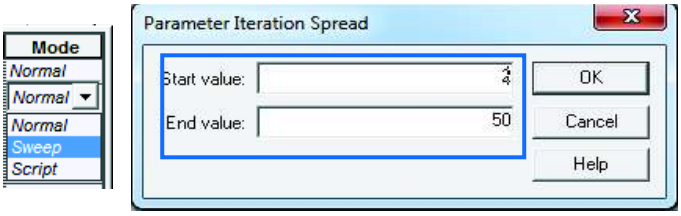


Figura 2.7 Definición de valor inicial y final para el barrido (*Sweep*).

2.3.3.1 Transmitters Library

Esta librería contiene varios componentes funcionales de comunicaciones ópticas, que controlan una señal de entrada y analiza su comportamiento luego de que la misma sea amplificada.

2.3.3.1.1 Optical Transmitter

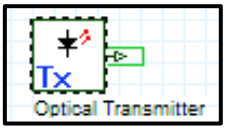


Figura 2.8 Componente *Optical Transmitter.*

El transmisor óptico de la Figura 2.8 es una versión de un solo canal del componente transmisor WDM con un puerto de salida de señal óptica. Este bloque genera una señal láser, en donde el usuario puede modificar su esquema de modulación tanto: externamente (*External Modulated Laser*, EML[20]) o directamente (*Directly Modulated Laser*, DML[21]).

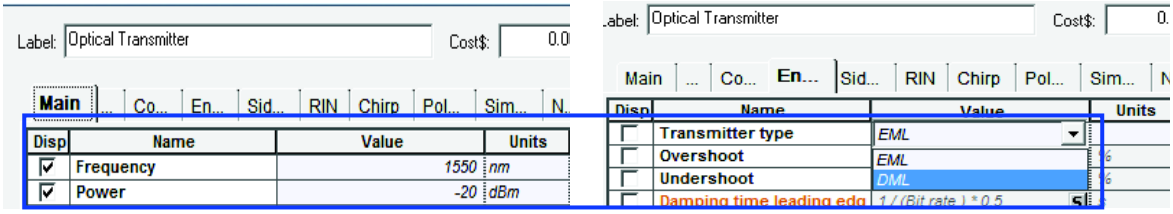


Figura 2.9 Parámetros del componente *Optical Transmitter.*

En la Figura 2.9 se muestran los diferentes parámetros de interés, de los cuales se enuncian los siguientes:

[20] EML: Esquema de láser modulado externamente, opera bajo una condición de onda continua, utilizado para largos alcances (10-40 Km) y velocidades altas (>25 Gpbs).
[21] DML: Esquema de láser modulado directamente, utilizado para aplicaciones de baja potencia y alcances cortos (<10 Km) [58].

- *Frequency:* es la longitud de onda central de un sistema de transmisión monocanal, expresada en nm.
- *Power:* es la potencia de la señal de entrada.

2.3.3.1.2 WDM Transmitter

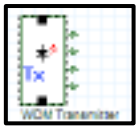


Figura 2.10 Componente *WDM Transmitter.*

El bloque transmisor WDM de la Figura 2.10 permite que el usuario seleccione el número de canales a transmitirse, generando una señal láser para cada canal óptico.

En la Figura 2.11 se muestran los diferentes parámetros de interés, de los cuales se enuncian los siguientes:

- *Frequency:* es la longitud de onda central de cada canal, expresada en nm.
- *Number of output ports:* puertos de salida de señal óptica, con un rango comprendido entre [1,1000].
- *Frequency spacing:* corresponde al espaciamiento entre canales ópticos.
- *Power:* es la potencia de la señal de entrada de cada canal.

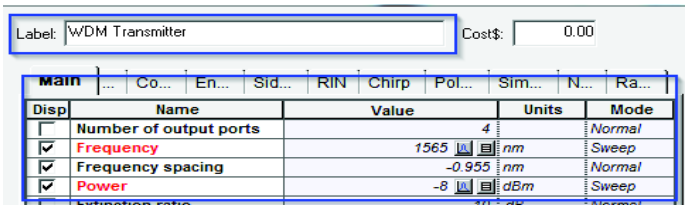


Figura 2.11 Parámetros del componente *WDM Transmitter.*

2.3.3.1.3 Pump Laser and Pump Laser Array

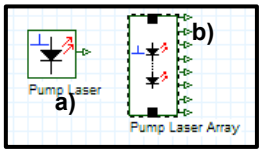


Figura 2.12 Componentes a) *Pump Laser* y *b) Pump Laser Array*.

Los componentes mostrados en la Figura 2.12 generan una señal óptica utilizada como fuente de bombeo en los amplificadores EDFA y Raman; la diferencia entre *Pump Laser* y *Pump Laser Array* radica en el número de puertos de salida de señal óptica.

El componente *Pump Laser Array* será empleado para el análisis de sistemas de comunicaciones ópticas con múltiples fuentes de bombeo.

Entre los parámetros de interés se encuentran los siguientes, ver Figura 2.13:

- *Frequency:* es la longitud de onda de bombeo, expresada en nm.
- *Power:* es la potencia en mW de la fuente de bombeo.
- *Number of output ports*: representa el número de fuentes de bombeo en un rango comprendido entre [1-1000].

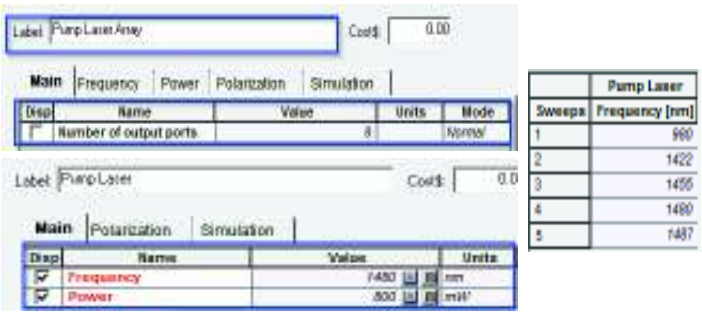


Figura 2.13 Parámetros del componente *Pump Laser Array* y *Pump Laser*.

2.3.3.2 Receivers Library

Esta librería contiene los bloques funcionales en el extremo receptor, los mismos que se detallan a continuación.

2.3.3.2.1 Optical Receiver

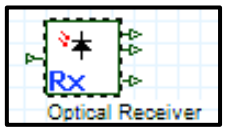


Figura 2.14 Componente *Optical Receiver*.

El componente presentado en la Figura 2.14 es un receptor óptico que recupera la señal transmitida. Tiene un puerto de entrada de señal óptica y tres puertos de

salida que se conectan al componente *Ber Analyzer* con la finalidad de visualizar el diagrama del ojo.

2.3.3.3 Amplifier Library

En esta librería se puede encontrar un sin número de amplificadores ópticos utilizados en las telecomunicaciones, de los que, dado los alcances del presente proyecto se cita los siguientes.

2.3.3.3.1 Erbium Doped Fiber

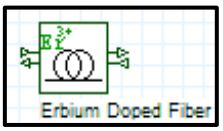


Figura 2.15 Componente *Erbium Doped Fiber*.

El componente de la Figura 2.15 simula la fibra dopada con erbio; tiene 4 puertos: 2 de entrada y 2 de salida de señal óptica, los cuales permiten el acoplamiento de las diferentes configuraciones de bombeo externas. En este caso se realiza la variación del parámetro *length*, con un rango comprendido entre [0-10000] m que especifica la longitud de la fibra dopada con erbio, ver Figura 2.16.

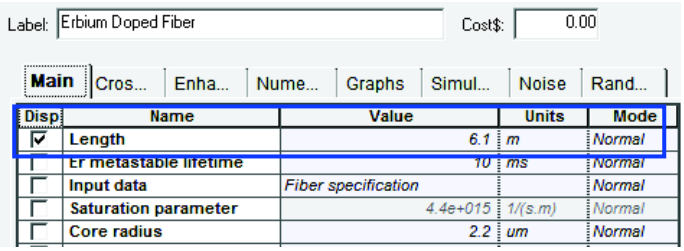


Figura 2.16 Parámetros del componente *Erbium Doped Fiber*.

2.3.3.3.2 Raman Amplifier Average Power Model

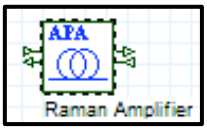


Figura 2.17 Componente *Raman Amplifier*.

El componente de la Figura 2.17 simula un amplificador Raman; tiene 4 puertos: 2 de entrada y 2 de salida de señal óptica, los cuales permiten el acoplamiento de las

diferentes configuraciones de bombeo externas. Para los diferentes escenarios de simulación se toman en cuenta los siguientes parámetros, ver Figura 2.18:

- Factor de polarización (*Polarization factor):* Este parámetro se mantiene por defecto, dado por el simulador con valor igual a 1.
- Longitud de la fibra no lineal *(length*): permite la variación de la longitud de la fibra no lineal con un rango comprendido permitido entre [0-1000000] Km. Este parámetro se utiliza por defecto con un valor igual a 25 Km.

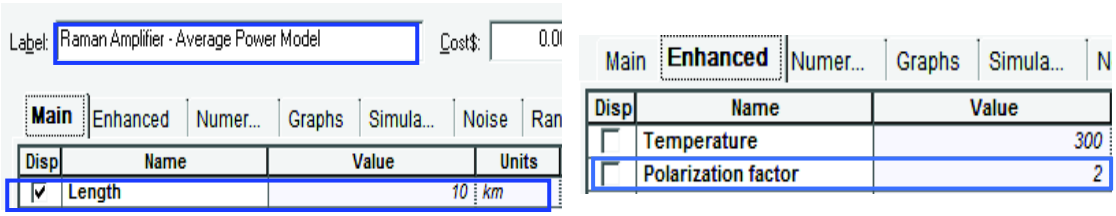


Figura 2.18 Parámetros del componente *Raman Amplifier.*

2.3.3.3.3 Wideband Traveling Wave SOA

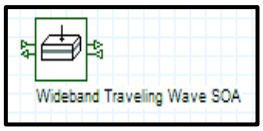


Figura 2.19 Componente *Wideband Traveling Wave SOA*.

El componente de la Figura 2.19 simula un modelo de amplificador óptico de semiconductor de banda ancha y onda viajera, con la capacidad de fácil integración con la fibra de transmisión; funciona en el rango de operación de bandas O, S y C. Tiene 4 puertos de señal óptica: 2 entradas y 2 salidas, de los cuales se utiliza 1 entrada y 1 salida, ya que el SOA no tiene un sistema de bombeo externo.

Para los diferentes escenarios de simulación se toman en cuenta los siguientes parámetros, ver Figura 2.20:

- Corriente aplicada (*Injection current*): se refiere a la corriente que se inyecta a la zona activa del semiconductor para producir amplificación. Toma valores entre 0 y 10 A.
- Factor de confinamiento óptico (*Optical Confinement factor):* Este parámetro se mantiene por defecto, dado por el simulador con valor igual a 0,44.

Figura 2.20 Parámetros del componente *Wideband Traveling Wave SOA*.

2.3.3.4 WDM Multiplexers Library

Esta sección contiene información sobre los multiplexores y demultiplexores utilizados en los diferentes escenarios de simulación de los sistemas multicanal.

2.3.3.4.1 WDM Mux and Ideal Mux

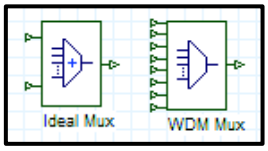


Figura 2.21 Componente Multiplexor WDM.

Los componentes mostrados en la Figura 2.21 se detallan a continuación:

Ideal Mux: es un combinador de las señales ingresadas a la entrada del amplificador.

WDM Mux: multiplexa un número de canales definidos por el usuario.

Ambos dispositivos tienen varios puertos de entrada y uno de salida de señal óptica, teniendo como parámetro de interés el número de puertos de entrada (*number of input ports)*, ver Figura 2.22.

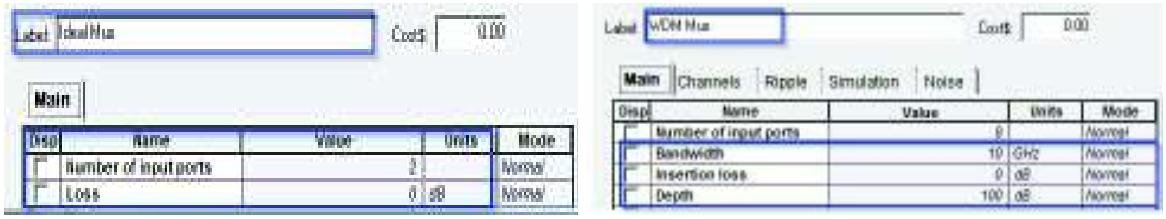


Figura 2.22 Parámetros del componente Multiplexor.

2.3.3.4.2 Ideal Demux and WDM Demux

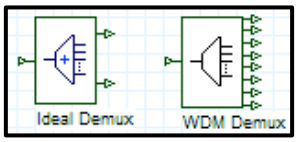


Figura 2.23 Componente Demultiplexor WDM.

Los componentes mostrados en la Figura 2.23 se detallan a continuación:

Ideal Demux: permite la separación de las señales ingresadas a la entrada.

WDM Demux: demultiplexa un número de canales definidos por el usuario.

Ambos dispositivos tienen un puerto de entrada y varios puertos de salida de señal óptica, teniendo como parámetro de variación el número de puertos de salida (*number of outpout ports),* ver Figura 2.24.

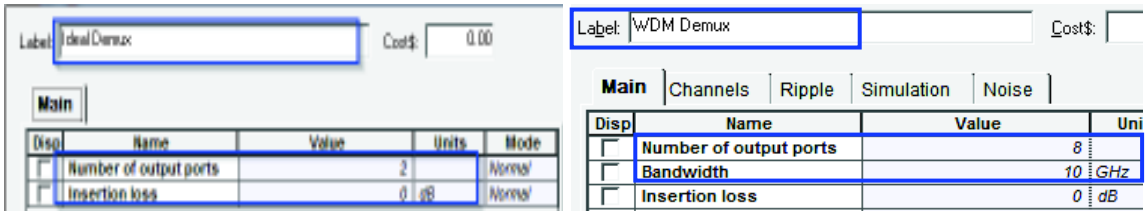


Figura 2.24 Parámetros del componente Demultiplexor.

2.3.3.5 Passives and Fibers Library

En la librería de componentes pasivos se presentan los elementos más utilizados en cada uno de los escenarios, entre los principales se tiene el acoplador de bombeo de co-propagación y los aisladores; así mismo en el caso de la librería de fibras ópticas se tiene únicamente el componente de fibra de transmisión.

2.3.3.5.1 Coupler

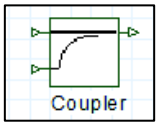


Figura 2.25 Componente *Pump Coupler Co-Propagating*.

El componente *coupler* de la Figura 2.25, es equivalente a tener un subsistema de un acoplador selectivo de longitud de onda, el cual combina la señal de entrada con

la fuente de bombeo. Tiene dos puertos de entrada de señal óptica y uno de salida que ingresa al amplificador.

2.3.3.5.2 Ideal Isolator

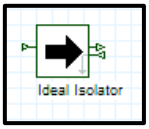


Figura 2.26 Componente *Ideal Isolator.*

El componente aislador de la Figura 2.26 controla las pérdidas por inserción, retorno y aislamiento dentro del enlace que se encuentra incorporado.

2.3.3.6 Visualizer Library

Esta librería contiene los diferentes tipos de componentes de visualización que se utilizan para el desarrollo de los escenarios de simulación, a fin de mostrar las características de la señal de entrada y señal de salida.

2.3.3.6.1 Optical Spectrum Analyzer

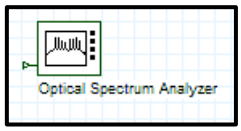


Figura 2.27 Componente *Optical Spectrum Analyzer.*

El componente analizador de espectro óptico de la Figura 2.27 permite la visualización de las señales ópticas en el dominio de la frecuencia.

En la Figura 2.28 se muestra a manera de ejemplo el espectro de potencia de una señal óptica; esta ventana de trabajo posee herramientas de selección, marcación de puntos, edición de etiquetas y ampliación del espectro para obtener información relevante sobre los sistemas simulados.

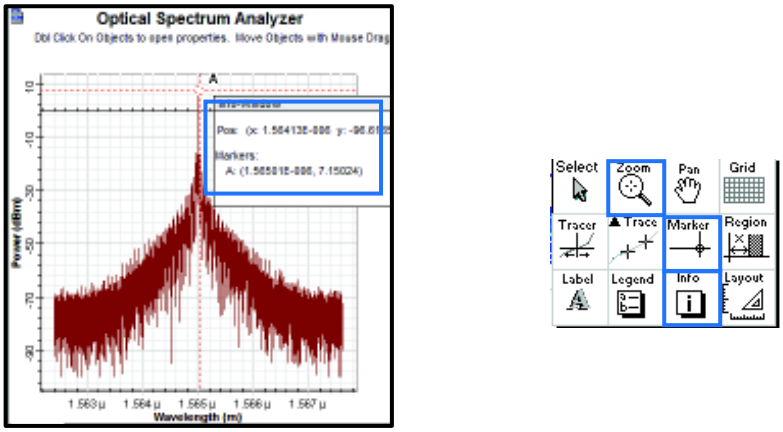


Figura 2.28 Imagen obtenida mediante el visualizador de espectro óptico.

2.3.3.6.2 Dual Port WDM Analyzer

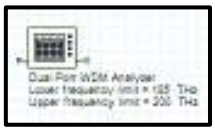


Figura 2.29 Componente *Dual Port WDM Analyzer.*

El componente *Dual Port WDM Analyzer* de la Figura 2.29 detecta, calcula y muestra automáticamente la frecuencia o longitud de onda, ganancia, figura de ruido (NF), potencia y OSNR tanto de la señal de entrada como de salida de cada canal transmitido.

2.3.3.6.3 BER Analyzer

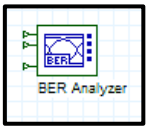


Figura 2.30 Componente *BER Analyzer*.

El componente visualizador de la Figura 2.30 permite al usuario visualizar la tasa de bits errados (BER) y el diagrama del ojo. En la Figura 2.31 se muestra un ejemplo, donde un ojo abierto representa una distorsión de señal mínima; por lo que mientras más cerrado sea, se tendrá mayor distorsión y *crosstalk.*

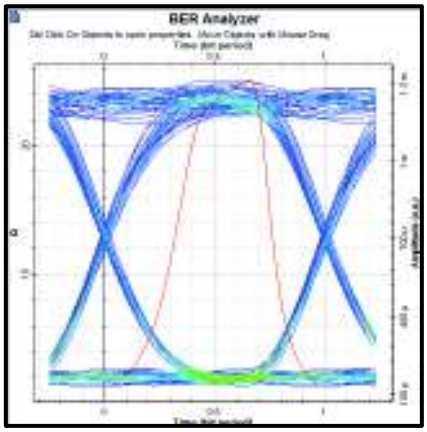


Figura 2.31 Diagrama del ojo que se obtiene del componente *BER Analyzer*.

2.4 SIMULACIÓN DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Una vez que se han indicado los componentes del simulador que formarán parte de los amplificadores ópticos de interés, se procede a definir los escenarios propicios para cada simulación.

Se tendrán dos escenarios que permitirán analizar el comportamiento de los amplificadores EDFA, Raman y SOA en sistemas monocanal y multicanal (WDM).

En dichos escenarios se considerará la variación de los siguientes parámetros:

- Longitud de onda de operación.
- Potencia de la señal de entrada.
- Sistema de bombeo: configuración, longitud de onda, potencia (para EDFA y Raman) y corriente de bombeo para el SOA.
- Velocidad de transmisión: en sistemas monocanal se trabaja con una velocidad intermedia de 100 Gbps (EDFA y Raman) y 10 Gbps (SOA); mientras que para los sistemas multicanal se trabaja con una velocidad de 10 Gbps por canal óptico.
- Espaciamiento entre canales ópticos para los sistemas multicanal (WDM).

De modo que, con los parámetros antes mencionados, se puedan apreciar las diferentes características de comportamiento de los amplificadores en cada escenario.

Cabe recalcar que en la presente sección se mostrarán gráficas y tablas de los resultados de ganancia, NF, OSNR y BER obtenidos mediante simulación.

El análisis de estos resultados se realizará posteriormente en el capítulo 3.

2.4.1 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADA CON ERBIO (EDFA)

Los diferentes escenarios de simulación del amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) permitirán identificar sus principales características y limitaciones de uso.

2.4.1.1 Escenario de Simulación I: EDFA en sistemas monocanal

En esta sección se presenta el esquema básico para la simulación de los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA) en sistemas monocanal; los diferentes escenarios simulados son parte primordial del presente estudio técnico, puesto que las gráficas resultantes de cada parámetro de estudio permitirán validar la teoría expuesta sobre este amplificador óptico.

2.4.1.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación

El esquema de simulación del escenario planteado para el estudio del EDFA en sistemas monocanal, considera como parámetro de variación la posición de la fuente de bombeo, teniendo así las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional.

En la Figura 2.32 se muestra el escenario de simulación empleado en las tres configuraciones de bombeo.

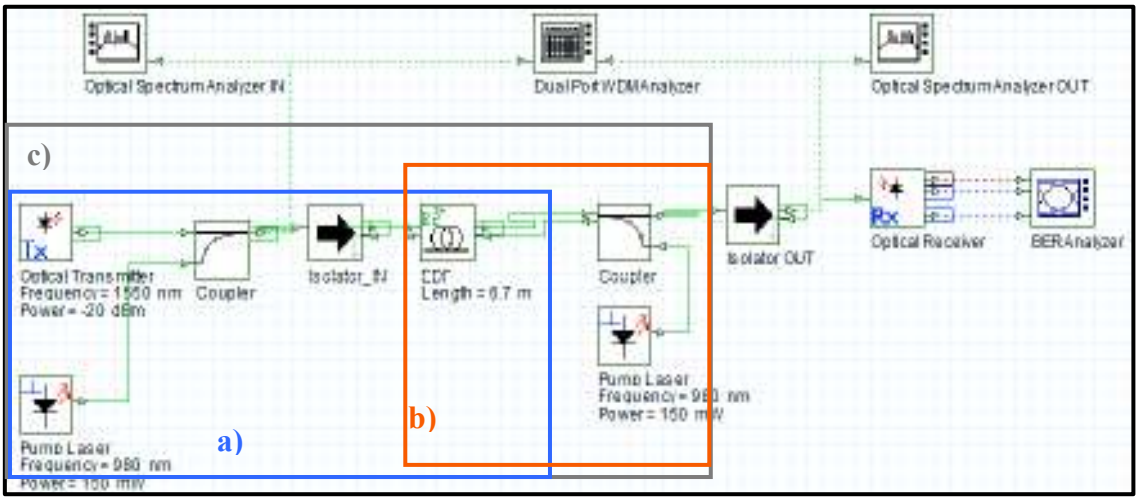


Figura 2.32 Esquema de simulación EDFA en sistemas monocanal con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional.

2.4.1.1.2 Características generales del esquema de simulación

En el escenario general de simulación del amplificador EDFA mostrado en la Figura 2.32, en el bloque de transmisión, el componente *Optical Transmitter* emite una señal a amplificar, la misma que se combina con la señal de bombeo mediante el acoplador selectivo de longitud de onda (*Coupler*) y se inyectan al EDFA.

El componente aislador (*Ideal Isolator*) ubicado a la entrada y salida del amplificador, cumple la función de impedir la propagación del ruido de emisión espontánea ASE y señales reflejadas hacia el EDFA; evitando que al inyectar estas señales el componente *Erbium Dopped Fiber* las amplifique.

A la salida del componente *Erbium Dopped Fiber*, se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de la señal amplificada.

Finalmente, en el bloque receptor se utilizan los componentes *Optical Receiver* y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo.

Una vez detallado el esquema de simulación a implementar, se procede con la configuración de parámetros característicos en cada uno de los componentes. Para ello, se considera las especificaciones técnicas del amplificador EDFA comercial, cuyos datasheets constan en los Anexos C-1 y C-2, de los cuales se toman los valores necesarios y principales para el desarrollo de este proyecto, ver Tabla 2.2.

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

Tabla 2.2 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del EDFA (Anexo C).

Por tanto, acorde a las especificaciones detalladas previamente de un amplificador EDFA comercial, se elige los siguientes parámetros de entrada requeridos para la simulación, en las tres configuraciones de bombeo:

- Longitud de onda de operación: rango comprendido entre 1530 y 1565 nm.

- Longitud de onda de la fuente de bombeo: 980 y 1480 nm.
- Potencia de la señal de bombeo: 150 mW.
- Potencia de la señal de entrada: -20 dBm; en la Figura 2.33 se muestra el espectro de potencia de la señal de entrada al amplificador, resaltándose el punto A el cual indica el valor de esta potencia.

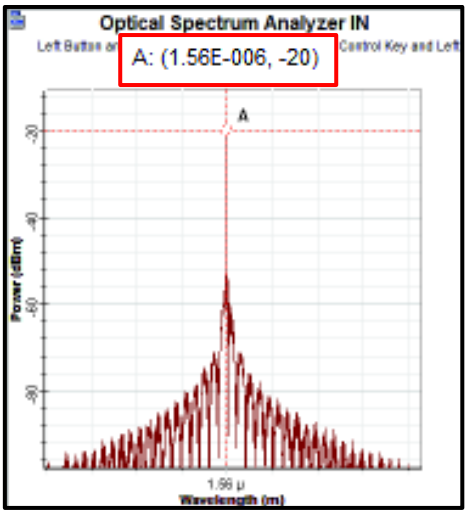


Figura 2.33 Espectro de potencia de la señal de entrada al amplificador utilizada en el escenario de simulación del EDFA en sistemas monocanal.

Finalmente, la longitud de la fibra dopada con erbio es uno de los parámetros a considerarse en el componente amplificador EDFA, éste se elegirá 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 2.3 se muestran los resultados obtenidos frente a la variación de la longitud de la fibra dopada en banda C. Así pues, acorde a las características citadas en la sección 1.3.3.2 se toma una longitud entre 5 y 10 m; y, como se puede notar conforme el valor de la longitud de la fibra dopada crece, la figura de ruido (NF) también incrementa su valor, a diferencia de la ganancia, la cual se va decrementando conforme crece la longitud de la fibra dopada y, al no existir una alta variación de ganancia y NF, se consideró el parámetro BER para la elección de la longitud de la fibra dopada. Por tanto, para las simulaciones en banda C se elige una longitud de 6,7 m con un BER en el orden de 10^{-21}, el cual es un valor aceptable en el campo de las telecomunicaciones.

	Erbium Dopped Fiber Length (m)	Gain (dB)	Noise Figure (dB)	Min. BER
1	5	38,1867	3,37582	5,36E-25
2	5,8	37,8457	3,54712	2,99E-23
3	6,7	37,245	3,75789	7,31E-21
4	7,6	36,3831	3,99239	1,18E-17
5	8,5	35,1379	4,25331	4,87E-13
6	9,4	33,2905	4,5335	2,11E-07
7	10	31,5702	4,71994	2,60E-04

Tabla 2.3 Comparación de parámetros característicos del EDFA para la elección de la longitud de fibra dopada para banda C.

2.4.1.1.3 Visualización de Resultados

Bajo los parámetros requeridos en la simulación antes mencionados y en base a los valores dados en las especificaciones técnicas del EDFA del Anexo C-1 y C-2 mostrados en la Tabla 2.2, se presentan los resultados obtenidos mediante simulación de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para cada una de las longitudes de onda en el rango de 1530 a 1565 nm, considerando pasos de 5 nm, en las tres configuraciones de bombeo (codireccional, contradireccional y bidireccional)

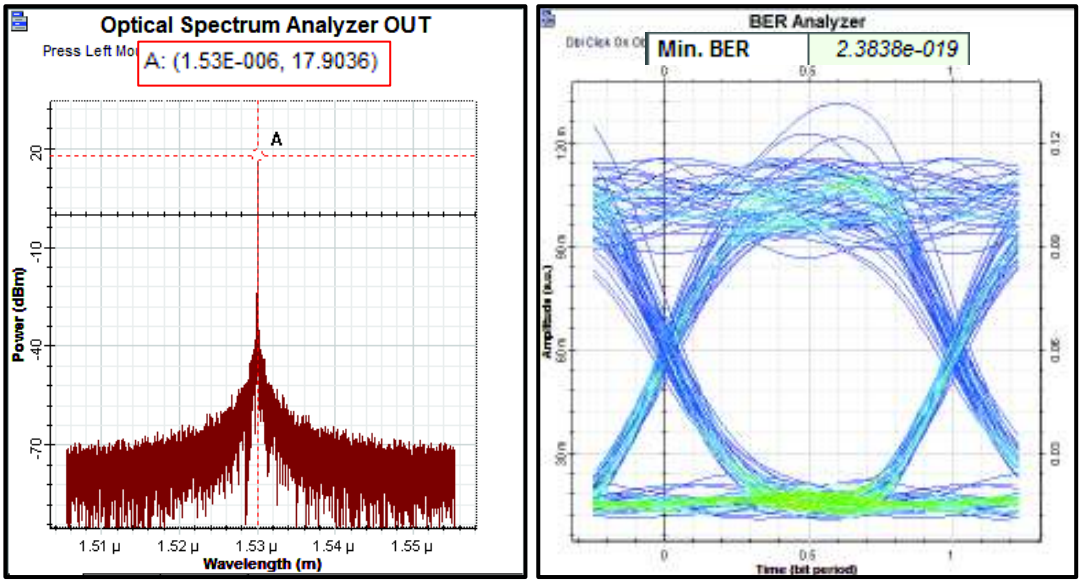
a) EDFA con bombeo codireccional

En la Tabla 2.4 se muestran los resultados obtenidos mediante simulación del EDFA en sistemas monocanal y en configuración de bombeo codireccional.

	Wavelength (nm)	Gain (dB)	Noise Figure (dB)	Output: OSNR (dB)	Output Power (dBm)	Min. BER
1	1530	37,9094	3,49317	34,3983	17,9036	2,38E-19
2	1535	37,4499	4,27301	33,6327	17,4441	5,34E-14
3	1540	35,1797	4,39077	33,5292	15,1738	1,33E-08
4	1545	35,8598	4,06325	33,8708	15,854	9,91E-15
5	1550	35,8113	4,02531	33,9227	15,8054	6,03E-15
6	1555	35,5345	3,94301	34,0191	15,5287	8,50E-15
7	1560	34,524	4,07025	33,9059	14,5181	2,27E-16
8	1565	31,0391	4,07246	33,9183	11,0333	1,65E-08

Tabla 2.4 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo codireccional.

La Figura 2.34 muestra el espectro de potencia de la señal de salida del amplificador con un valor de potencia de 17,90 dBm a una longitud de onda de 1530 nm; así también el diagrama del ojo con un BER excelente en el orden de 10^{-19}.



a) b)

Figura 2.34 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo codireccional.

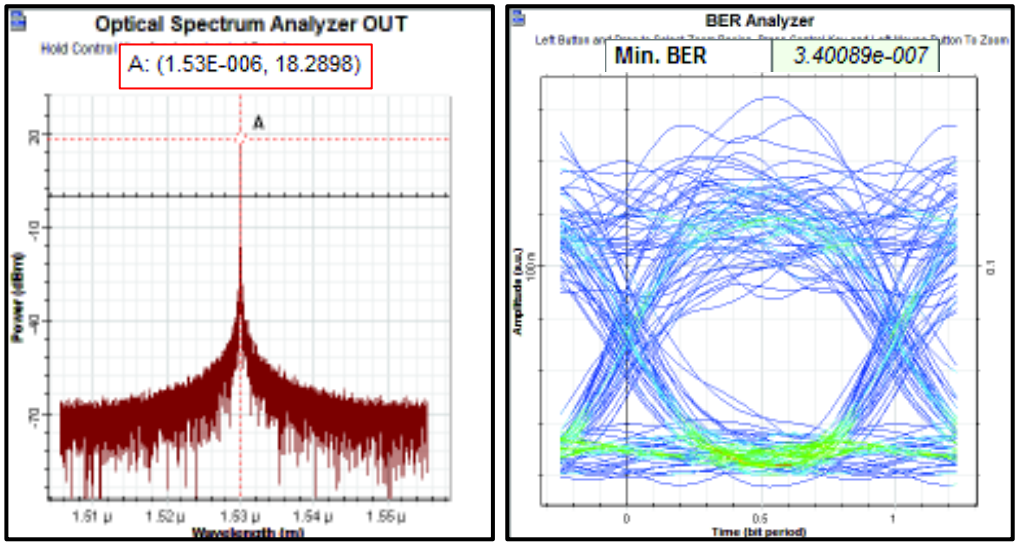
a) EDFA con bombeo contradireccional

En la Tabla 2.5 se resaltan los resultados obtenidos mediante simulación del EDFA en sistemas monocanal y en configuración de bombeo contradireccional.

	Wavelength (nm)	Gain (dB)	Noise Figure (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	38,2972	4,63067	33,2592	18,2898	3,40E-07
2	1535	37,8031	5,27381	32,6302	17,7956	6,43E-07
3	1540	35,3375	5,05707	32,8612	15,3301	3,81E-03
4	1545	35,6214	4,73357	33,1988	15,614	3,41E-03
5	1550	35,1548	4,64674	33,2997	15,1474	1,97E-04
6	1555	34,3899	4,44813	33,5124	14,3825	5,13E-04
7	1560	32,6331	4,44195	33,5328	12,6257	1,82E-06
8	1565	28,2741	4,26536	33,7249	8,26667	1,35E-03

Tabla 2.5 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo contradireccional.

El espectro de potencia de la señal de salida del amplificador, así como el diagrama del ojo a una longitud de onda de 1530 nm se muestran en la Figura 2.35, en la que se tiene una potencia de salida de 18,28 dBm y un BER en el orden de 10^{-7}.



a) **b)**

Figura 2.35 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo contradireccional.

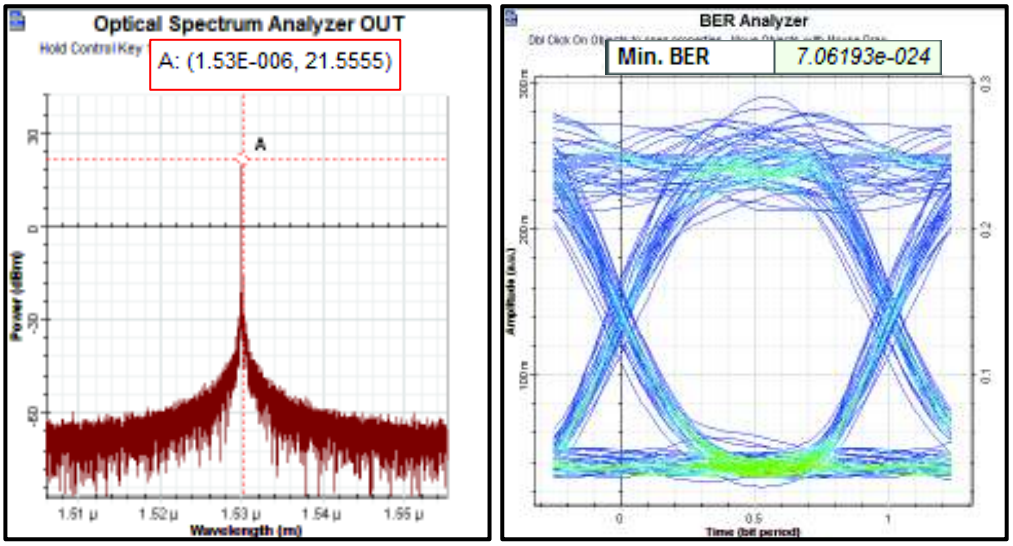
b) EDFA con bombeo bidireccional

En la Tabla 2.6 se resaltan los resultados obtenidos mediante simulación del EDFA en sistemas monocanal y en configuración de bombeo bidireccional.

	Wavelength (nm)	Gain (dB)	Noise Figure (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	41,563	3,75257	34,1371	21,5555	7,06E-24
2	1535	41,1866	4,63877	33,2651	21,1791	4,49E-14
3	1540	38,9859	4,92437	32,9937	18,9785	1,84E-04
4	1545	39,6572	4,49064	33,4415	19,6497	9,37E-08
5	1550	39,5638	4,44033	33,5058	19,5563	1,45E-06
6	1555	39,1963	4,30372	33,6565	19,1889	4,03E-06
7	1560	37,8531	4,4523	33,5219	17,8457	7,36E-08
8	1565	33,4122	4,45053	33,538	13,4047	4,24E-04

Tabla 2.6 Resultados obtenidos para el EDFA en banda C con bombeo bidireccional.

En la Figura 2.36 se muestra el espectro de potencia de la señal de salida del amplificador con un valor de 21,55 dBm a una longitud de onda de 1530 nm; así también el diagrama del ojo con un BER excelente en el orden de 10^{-24}.



a) **b)**

Figura 2.36 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el EDFA en banda C con bombeo bidireccional.

Una vez que se muestran los resultados del EDFA en sistemas monocanal y en las diferentes configuraciones de bombeo, se procede a presentar las gráficas de los parámetros de ganancia, NF y OSNR obtenidos mediante simulación.

En la Figura 2.37 se muestra la ganancia del amplificador EDFA en función de la longitud de onda, donde cada configuración de bombeo se representa con un color identificativo, observándose una misma tendencia de curva con valores de ganancia alrededor de 28 a 42 dB, los que se encuentran dentro del rango de las especificaciones ya detalladas en la Tabla 2.2.

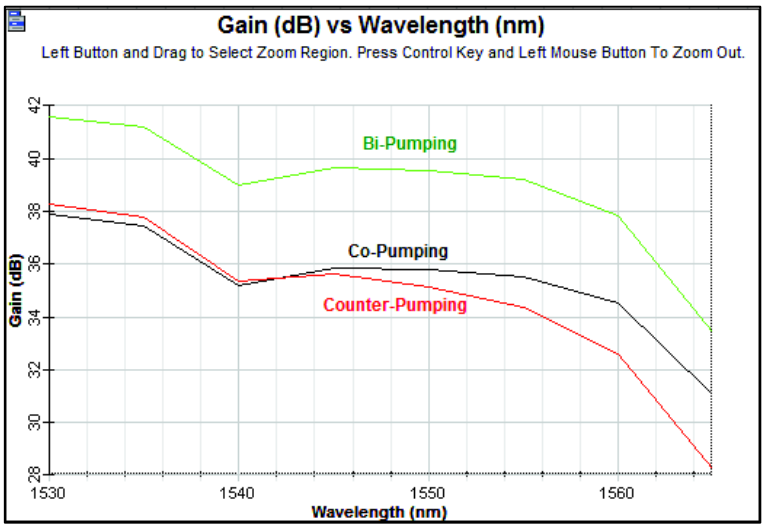


Figura 2.37 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

La Figura 2.38 muestra las curvas resultantes de la NF en función de la longitud de onda, en las cuales para las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional se mantiene la NF entre valores alrededor de 3,6 y 5,3 dB.

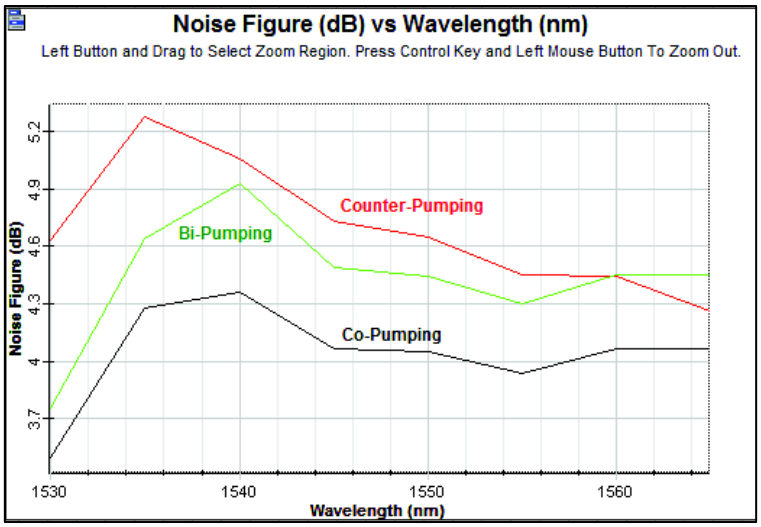


Figura 2.38 Figura de ruido del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

Finalmente, dentro de los parámetros generales se muestra en la Figura 2.39 la curva de OSNR obtenida en la simulación, verificando que para la configuración de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional se tienen valores de OSNR entre 32,5 y 34,4 dB.

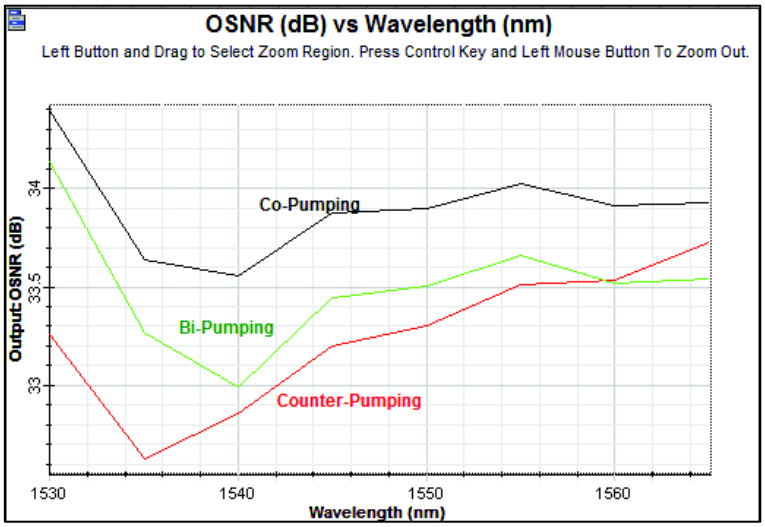


Figura 2.39 OSNR del EDFA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

Cabe señalar, que el escenario previamente detallado también se utilizó para simular el EDFA en las bandas de operación S y L, con velocidades de transmisión de 10 Gbps y 100 Gbps, cuyas simulaciones y resultados se encuentran disponibles en el Anexo digital F-1.

En los siguientes esquemas a implementarse, se exportará las tablas de valores y gráficas obtenidas a un documento de respaldo en Excel, esto debido a las limitaciones que presenta el simulador en cuanto a las herramientas disponibles de la edición de las diferentes gráficas.

2.4.1.2 Escenario de Simulación II: EDFA en sistemas multicanal WDM

El segundo escenario analiza el comportamiento del EDFA en sistemas de transmisión de múltiples canales ópticos (WDM) y una o varias fuentes de bombeo. Para este caso de estudio se toma como ejemplo un sistema WDM de 8 y 16 canales ópticos.

2.4.1.2.1 Esquema general para la implementación de la simulación

El esquema de simulación a utilizar se muestra en la Figura 2.40, que incluye al amplificador EDFA en un sistema WDM de 8 canales en las tres configuraciones de la fuente de bombeo (codireccional, contradireccional y bidireccional).

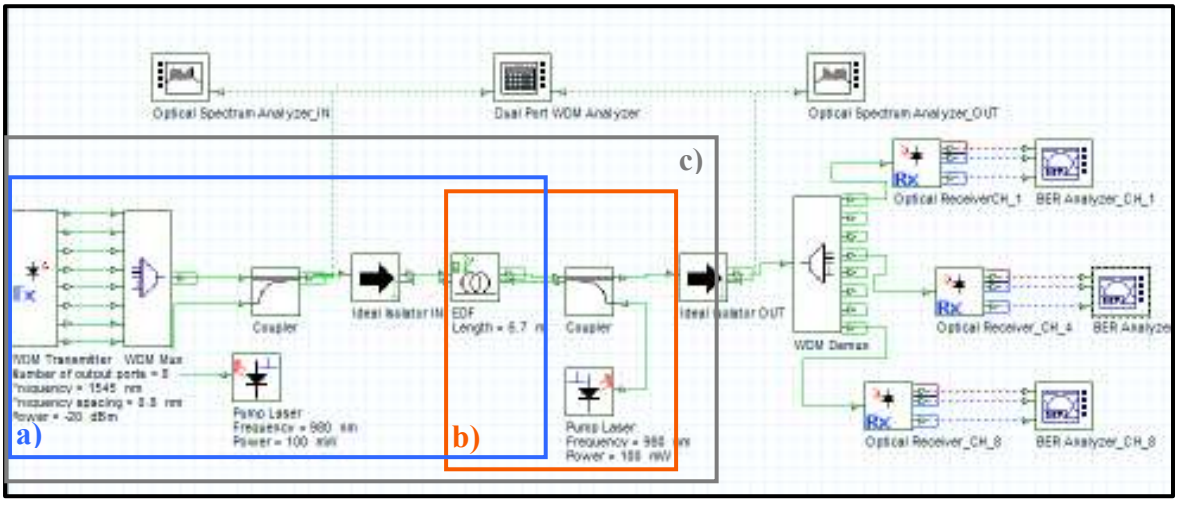


Figura 2.40 Esquema de simulación EDFA en un sistema WDM de 8 canales con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional.

Así también, en el esquema de la Figura 2.41 se presenta el esquema de simulación que incluye al amplificador EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo.

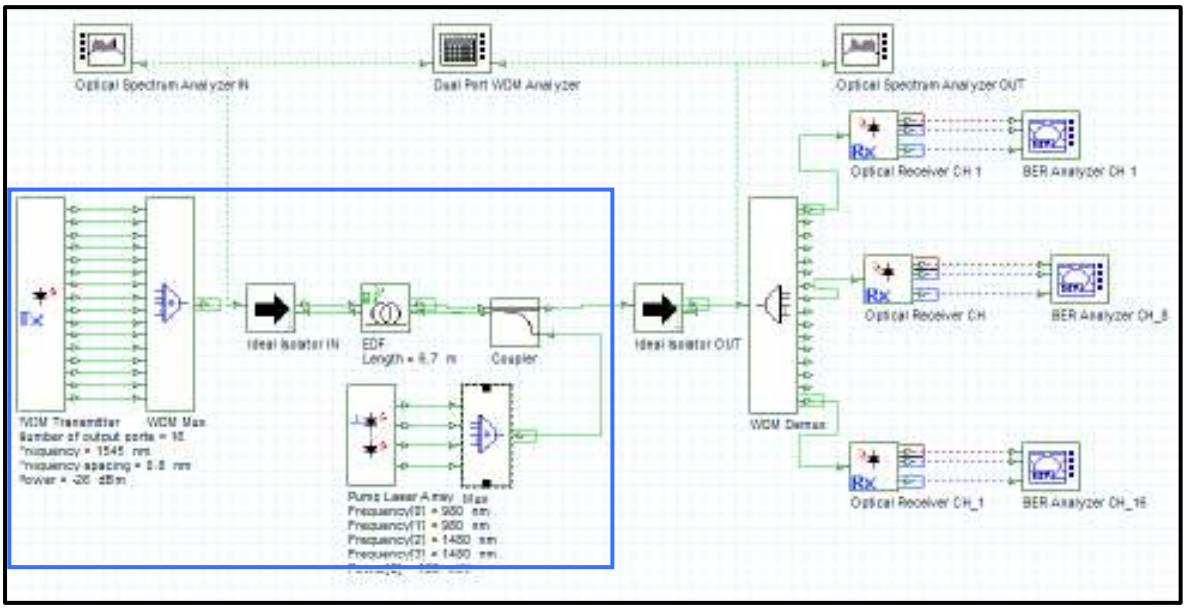


Figura 2.41 Esquema de simulación EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

2.4.1.2.2 Características generales del esquema de simulación

Los dos esquemas de simulación abarcan de manera general la inclusión del amplificador EDFA en sistemas multicanal; en el bloque de transmisión se tiene el componente *WDM Transmitter,* que genera y define el número de canales que se desea multiplexar mediante el componente *WDM Mux* que junto con la señal de la fuente de bombeo se combinan mediante el acoplador selectivo de longitud de onda (*Coupler*) y se inyectan al EDFA. Al igual que en los sistemas monocanal se incluye un aislador en la entrada y salida del amplificador.

A la salida del componente *Erbium Dopped Fiber*, se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de las señales amplificadas.

En el bloque receptor se dispone del componente *WDM Demux* que cumple la función de demultiplexar los canales transmitidos y a su vez de los componentes

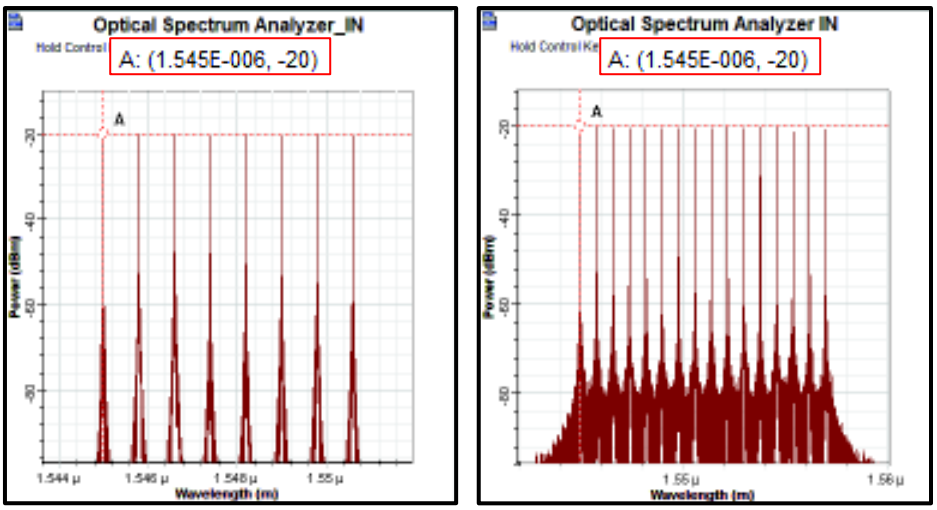
Optical Receiver y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo de cada uno de los canales del sistema WDM.

La variante para el segundo esquema de simulación es el número de fuentes de bombeo las cuales se multiplexan y se inyectan al EDFA; por lo que se dispone de los componentes *Pump Laser Array* y *WDM Mux*.

Una vez detallado el esquema de simulación a implementar, se procede con la configuración de parámetros característicos en cada uno de los componentes. Para ello, se considera las especificaciones técnicas del amplificador comercial EDFA ya mencionadas en la Tabla 2.2.

Por tanto, se elige los siguientes parámetros:

- Longitud de onda central del primer canal: 1545 nm.
- Longitud de onda de la fuente de bombeo: 980 nm y 1480 nm.
- Potencia de la señal de bombeo: 100 mW.
- Potencia de la señal de entrada por cada canal: -20 dBm; en la Figura 2.42 se muestran los espectros de potencia de las señales de entrada al amplificador, el punto A indica el valor de potencia del primer canal a una longitud de onda central[22] en los sistemas WDM de 8 y 16 canales.



a) **b)**

Figura 2.42 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del EDFA en un sistema WDM de: a) 8 y b) 16 canales.

[22] Longitud de onda central: Hace referencia a la longitud de onda central de cada uno de los canales del sistema WDM.

- Espaciamiento entre canales ópticos: 0,8 nm (100 GHz); en la Tabla 2.7 se resalta los valores de longitud de onda central de cada uno de los canales.

  Cabe señalar que el simulador por defecto trabaja únicamente con las longitudes de onda central de cada uno de los canales ópticos.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545,0	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547,0
4	1547,0	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549,0	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551,0

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547
4	1547	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551
9	1551	1551,4	1551,8
10	1551,8	1552,2	1552,6
11	1552,6	1553	1553,4
12	1553,4	1553,8	1554,2
13	1554,2	1554,6	1555
14	1555	1555,4	1555,8
15	1555,8	1556,2	1556,6
16	1556,6	1557	1557,4

Tabla 2.7 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema WDM de 8 y 16 canales respectivamente.

2.4.1.2.3 Visualización de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante simulación de los parámetros de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para cada una de las longitudes de onda central de cada canal en cada uno de los escenarios del EDFA en sistemas multicanal con una y múltiples fuentes de bombeo. Estos valores deben estar acorde al rango establecido en la Tabla 2.2, la cual contiene las especificaciones técnicas de un amplificador EDFA comercial.

a) EDFA en un sistema WDM de 8 canales con una fuente de bombeo

A manera de ejemplo para el EDFA en un sistema WDM de 8 canales y una única fuente de bombeo en configuración bidireccional, se muestra la Tabla 2.8 la que contiene los parámetros de ganancia, NF, OSNR y potencia de salida para cada uno de los canales en su respectiva longitud de onda central en banda C.

CH	Wavelength (nm)	Pump Wavelength (nm)	Gain (dB)	Noise Figure (dB)	Output OSNR (dB)	Output Signal (dBm)
1	1545	980 nm @ 100 mW	32,335397	3,35786	34,5777	12,3303
2	1545,8		32,502139	3,39831	34,5339	13,4915
3	1546,6		32,64144	3,26126	34,6686	14,6262
4	1547,4		32,73925	3,37041	34,5724	12,7348
5	1548,2		32,787757	3,33541	34,61	12,7837
6	1549		32,894438	3,31878	34,626	12,8876
7	1549,8		32,84311	3,37235	34,5743	12,8358
8	1550,6		32,87217	3,34032	34,61	12,8663

Tabla 2.8 Resultados obtenidos para el EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional en banda C.

En la Figura 2.43 se muestra el espectro de potencia de las señales de salida del amplificador EDFA en un sistema WDM de 8 canales, donde el punto A representa la potencia del cuarto canal con un valor de 12,73 dBm a una longitud de onda central de dicho canal.

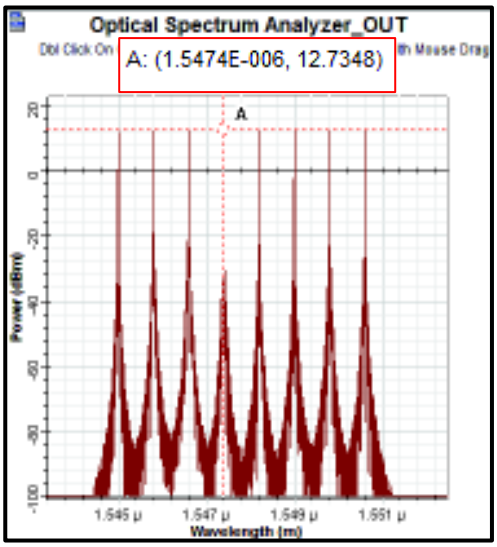
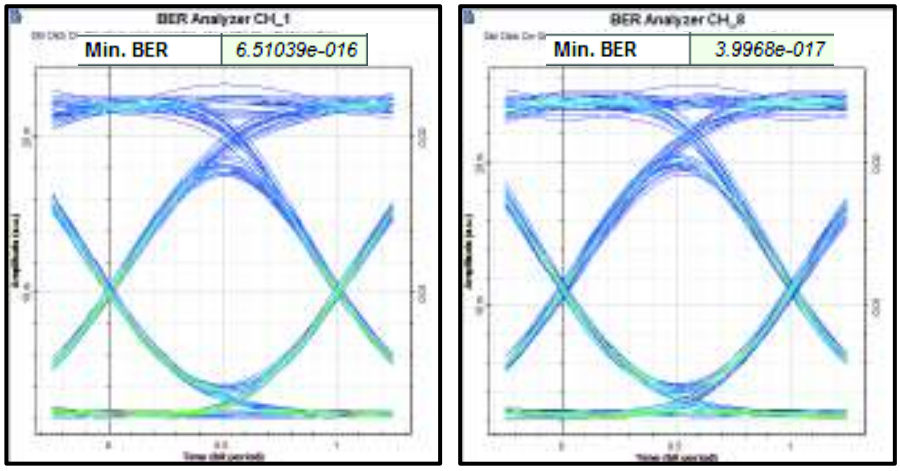


Figura 2.43 Espectro de potencia de las señales de salida del EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional.

En la Figura 2.44 se muestran los diagramas del ojo de los canales 1 y 8, con valores de BER en el orden de 10^{-16} y 10^{-17} respectivamente.



a) b)

Figura 2.44 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 8 del EDFA en un sistema WDM de 8 canales con bombeo bidireccional.

En la Figura 2.45 se muestra la ganancia de cada canal en la respectiva longitud de onda central a partir de 1545 nm. Teniendo que, para las tres configuraciones de bombeo se observa que la ganancia está alrededor de 29,5 y 32,8 dB por cada canal, los que se encuentran dentro del rango de las especificaciones ya detalladas en la Tabla 2.2.

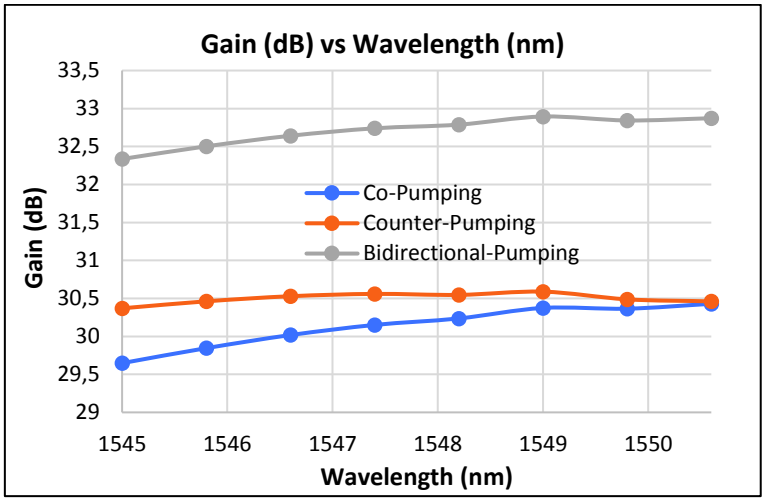


Figura 2.45 Ganancia de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales.

La NF de cada uno de los canales amplificados en la respectiva longitud de onda central se muestran en la Figura 2.46, en las que, para las configuraciones de bombeo codireccional contradireccional y bidireccional la NF está en un rango alrededor de 3,2 a 5,5 dB.

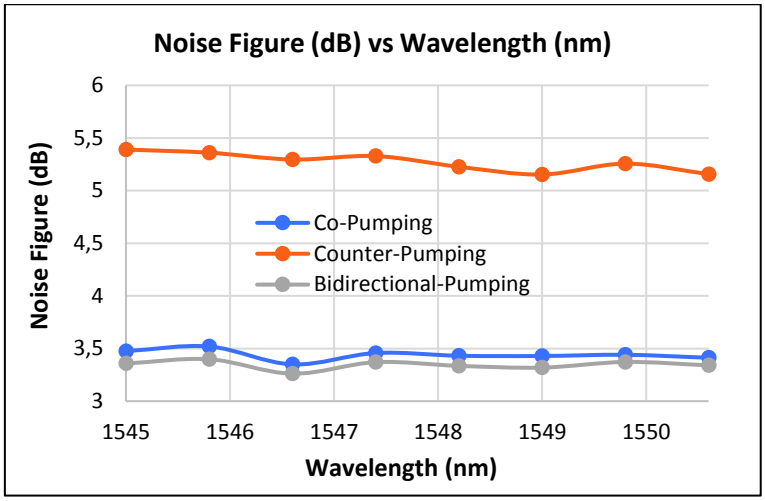


Figura 2.46 Figura de ruido de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales.

En la Figura 2.47 se muestra la OSNR de cada canal a la salida del amplificador en la respectiva longitud de onda central, verificando que para la configuración de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional se consiguen valores alrededor de 29,5 y 34,5 dB.

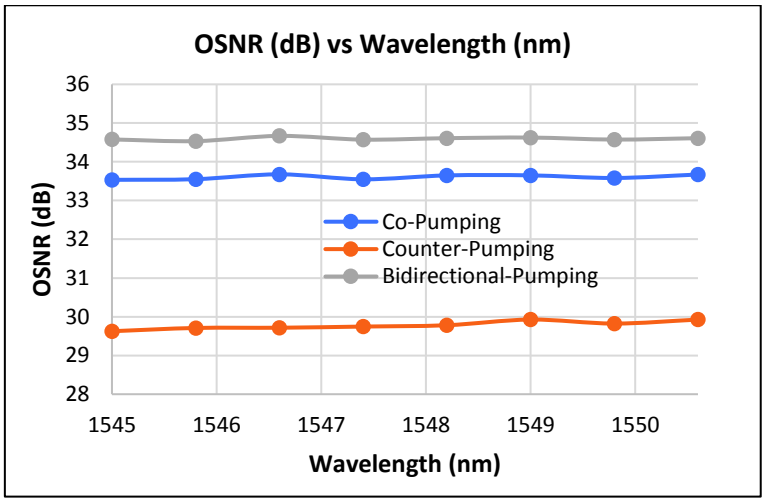


Figura 2.47 OSNR de cada canal del EDFA en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 8 canales.

b) EDFA en un sistema WDM de 16 canales con múltiples fuentes de bombeo

En cuanto al escenario de simulación del EDFA actuando en un sistema WDM de 16 canales con 1 y 4 fuentes de bombeo, se toma como ejemplo la configuración de bombeo contradireccional para este estudio.

En la Tabla 2.9 se muestran los parámetros de ganancia, NF, OSNR, y potencia de salida de cada canal en su respectiva longitud de onda central. Adicionalmente se indican las longitudes de onda de bombeo (980 y 1480 nm).

CH	Wavelength (nm)	Pump Wavelength (nm)	Gain (dB)	NF (dB)	Output OSNR (dB)	Output Signal (dBm)
1	1545	4 pump 2 @ 980 nm and 2 @ 1480 nm	31,350489	4,55228	34,3787	11,3409
2	1545,8		31,528837	4,56576	34,3734	11,5252
3	1546,6		31,680266	4,41658	34,44183	11,6702
4	1547,4		31,790926	4,49758	34,4494	11,7908
5	1548,2		31,852868	4,43648	34,5134	11,8534
6	1549		31,971172	4,40413	34,5149	11,9686
7	1549,8		31,935103	4,44244	34,5104	11,9341
8	1550,6		31,976991	4,38333	34,5698	11,974
9	1551,4		32,037359	4,34045	34,6161	12,0355
10	1552,2		31,998796	4,35235	34,6175	11,998
11	1553		31,988362	4,37792	34,63842	11,9876
12	1553,8		32,050979	4,31754	34,6486	12,052
13	1554,6		32,029279	4,31789	34,6463	12,0262
14	1555,4		31,940031	4,30339	34,66	11,9338
15	1556,2		31,870917	4,30887	34,6586	11,8666
16	1557		31,893744	4,2382	34,65329	11,8907

Tabla 2.9 Resultados obtenidos para un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional en banda C.

Así mismo, en la Figura 2.48 se observa el espectro de potencia de las señales de salida del amplificador EDFA en un sistema WDM de 16 canales con 4 fuentes de bombeo contradireccionales, donde el punto A representa la potencia del sexto canal con un valor de 11,96 dBm a una longitud de onda central de dicho canal.

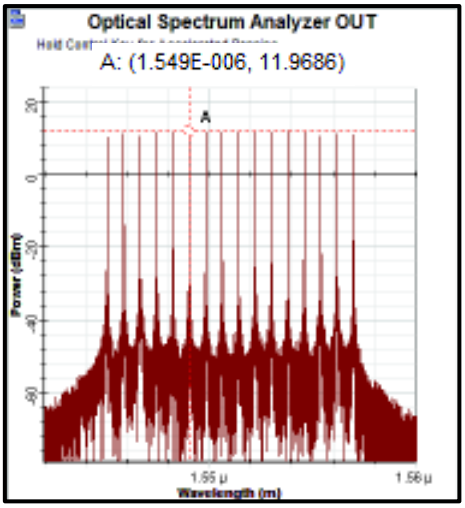
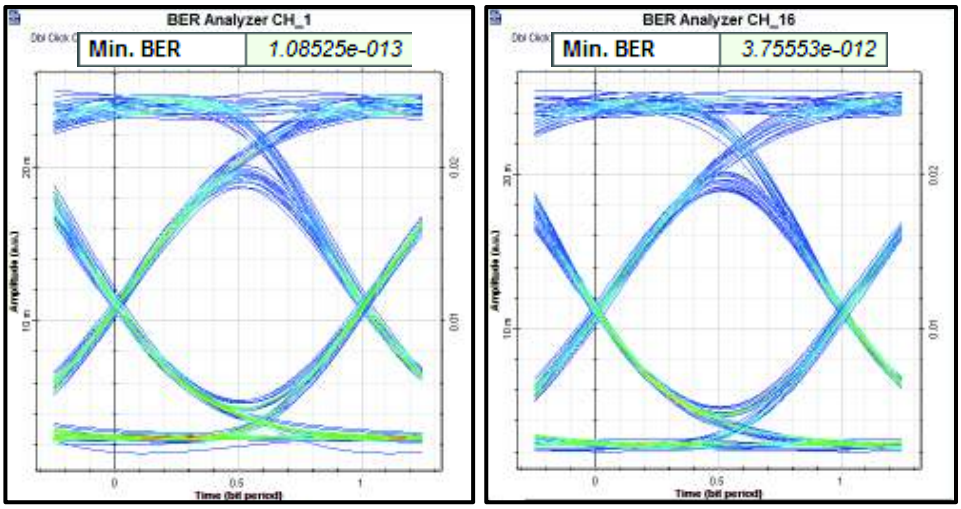


Figura 2.48 Espectro de potencia de las señales de salida del EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

En la Figura 2.49 se visualizan los diagramas de ojo de los canales 1 y 16, los valores de BER obtenidos están en el orden de 10^{-13} y 10^{-12} respectivamente.



a) **b)**

Figura 2.49 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 16 del EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

En la Figura 2.50 se muestra la ganancia de cada canal en la respectiva longitud de onda central a partir de 1545 nm; cómo se puede observar con la utilización de una única fuente de bombeo contradireccional la ganancia permanece en un valor de 27,5 a 28 dB, mientras que con el uso de 4 fuentes de bombeo se incrementa la ganancia alcanzando valores alrededor de 31 y 32 dB.

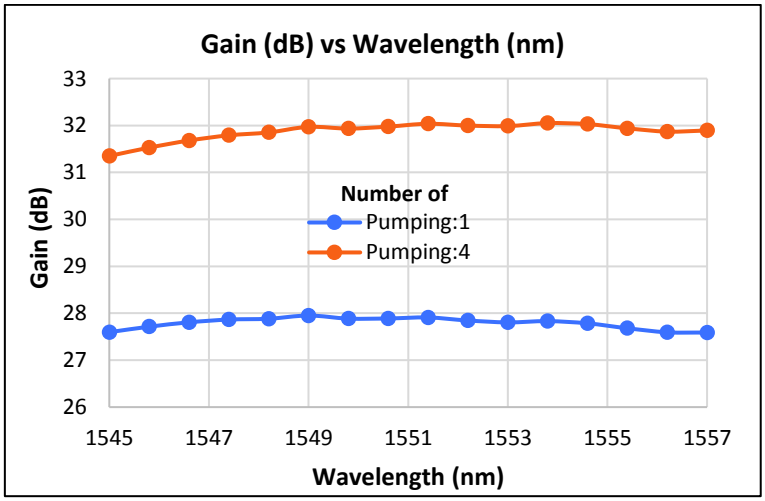


Figura 2.50 Ganancia de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

La Figura 2.51 muestra la NF de cada canal amplificado en su respectiva longitud de onda central, en las que, al usar 4 fuentes de bombeo se obtiene valores de NF entre 4,2 y 4,5 dB, mientras que con la utilización de una fuente de bombeo se obtiene una NF mayor de 5,3 a 5,7 dB.

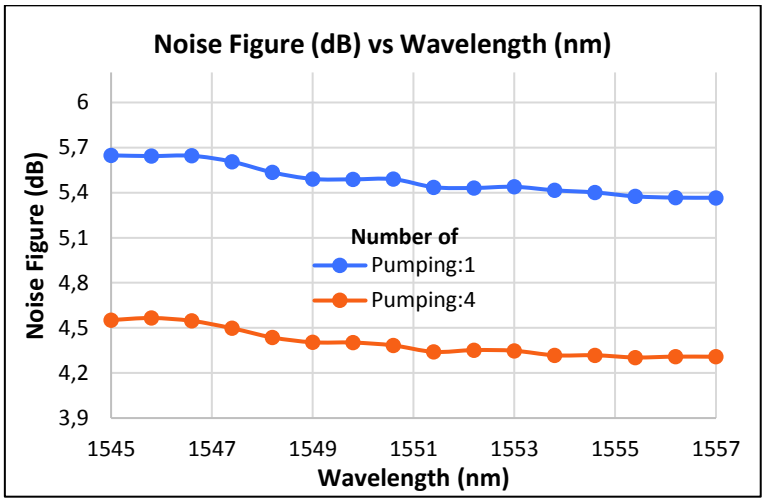


Figura 2.51 NF de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

Así también, en la Figura 2.52 se muestra la OSNR de salida de cada canal en su respectiva longitud de onda central, verificando que con la utilización de una única fuente de bombeo la OSNR mantiene valores entre 33,3 y 33,6 dB, a diferencia del uso de 4 fuentes de bombeo, donde se obtienen valores superiores a 34 dB para la OSNR.

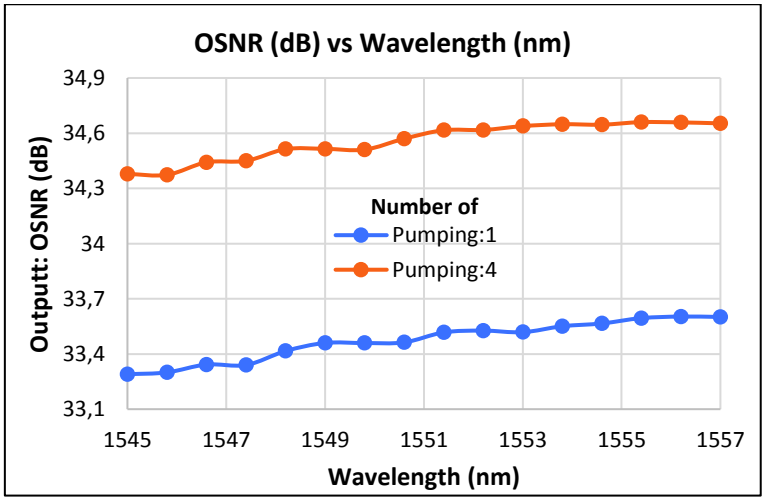


Figura 2.52 OSNR de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el EDFA en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo contradireccional.

Cabe mencionar que el escenario previamente detallado también fue utilizado en sistemas WDM de 4, 32 y 64 canales, con una y múltiples fuentes de bombeo, cuyos resultados y simulaciones se encuentran disponibles en el Anexo digital F-1.

2.4.2 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR RAMAN

Uno de los mayores desafíos para estos amplificadores es superar las limitaciones del amplificador EDFA; su rendimiento depende de los parámetros iniciales de configuración. Por tanto, los diferentes escenarios de simulación del amplificador Raman permitirán identificar sus principales características y limitaciones de uso.

2.4.2.1 Escenario de Simulación I: Raman en sistemas monocanal

En esta sección se propone un esquema básico de un sistema de comunicación óptico monocanal con la utilización de un amplificador Raman.

2.4.2.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación

Al igual que con el amplificador EDFA, en la Figura 2.53 se plantea un escenario de simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal, donde se realiza el estudio de su comportamiento considerando como parámetro de variación la posición de la fuente de bombeo (codireccional, contradireccional y bidireccional).

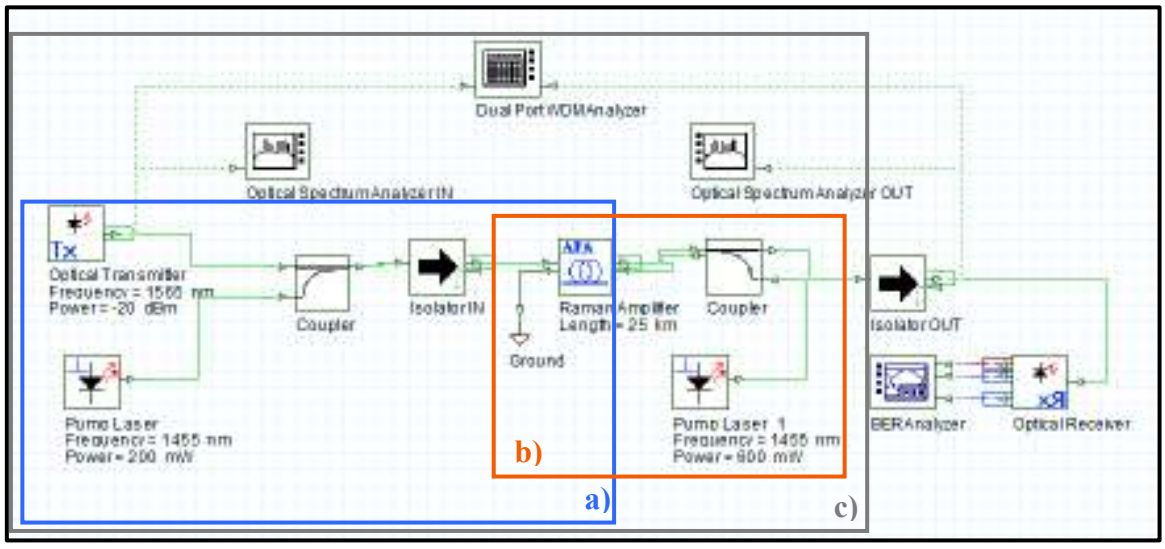


Figura 2.53 Esquema de simulación Raman en sistemas monocanal con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional.

2.4.2.1.2 Características generales del esquema de simulación

Acorde al esquema de simulación de la Figura 2.53, en el bloque de transmisión, el componente *Optical Transmitter* emite una señal que será la que se amplifique, la misma que se combina con la señal de bombeo mediante el acoplador selectivo de longitud de onda (*Coupler*) y se inyectan al amplificador Raman.

El componente aislador (*Ideal Isolator*) ubicado a la entrada y salida del amplificador, cumple la función de impedir la propagación del ruido de emisión espontánea ASE y señales reflejadas hacia el Raman; evitando que al inyectar estas señales el componente *Raman Amplifier* las amplifique.

A la salida del componente *Raman Amplifier,* se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de la señal amplificada.

Finalmente, en el bloque receptor se utilizan los componentes *Optical Receiver* y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo.

Una vez detallado el esquema de simulación a implementar, se procede con la configuración de parámetros característicos en cada uno de estos componentes. Para el efecto se toma como referencia las especificaciones técnicas del amplificador Raman comercial, cuyos datasheets constan en los Anexos C-1, C-2 y C-3; de los cuales se presentan los valores de los parámetros principales y necesarios para el desarrollo de estos escenarios de simulación, ver Tabla 2.10.

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

Tabla 2.10 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del RAMAN (Anexo D).

Por ende, acorde a las especificaciones ya mencionadas, se selecciona los siguientes parámetros requeridos en la simulación para las tres configuraciones de bombeo:

- Longitud de onda de operación: rango comprendido entre 1530 y 1565 nm.
- Longitud de onda de la fuente de bombeo: 100 nm bajo la longitud de onda de operación.
- Potencia de la señal de bombeo: 600 mW.
- Potencia de la señal de entrada: -20 dBm; en la Figura 2.54 se muestra el espectro de potencia de la señal de entrada al amplificador, resaltándose el punto A, el cual indica el valor de esta potencia.

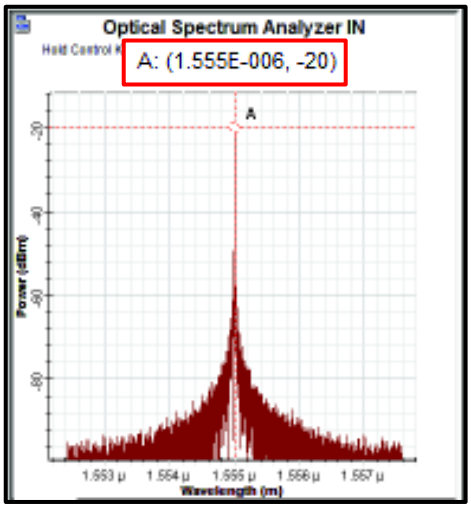


Figura 2.54 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal.

Finalmente, la longitud de la fibra no lineal es uno de los parámetros a considerarse en el componente amplificador Raman ya que constituye el medio amplificador; éste se elegirá 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 2.11 se muestran los resultados obtenidos frente a la variación de la longitud de la fibra no lineal en banda C. Así pues, acorde a las características citadas en la sección 1.3.4.2 se toma una longitud entre 5 y 100 km; y como se puede notar conforme el valor de la longitud de la fibra no lineal crece, la figura de ruido NF incrementa y el BER aumenta, lo que no sucede con la ganancia que se incrementa hasta un cierto valor (35,77 dB) y disminuye en adelante.

	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

Tabla 2.11 Comparación de parámetros característicos del amplificador Raman para la elección de la fibra no lineal en banda C.

Como se puede observar en la Figura 2.55 existe un incremento de la ganancia con una longitud de la fibra no lineal de hasta los 50 Km, más allá de esta longitud la ganancia empieza a decaer significativamente, esto ocurre debido al agotamiento excesivo de la fuente de bombeo y por tanto no existe suficiente inversión de la población, fenómeno necesario para la amplificación.

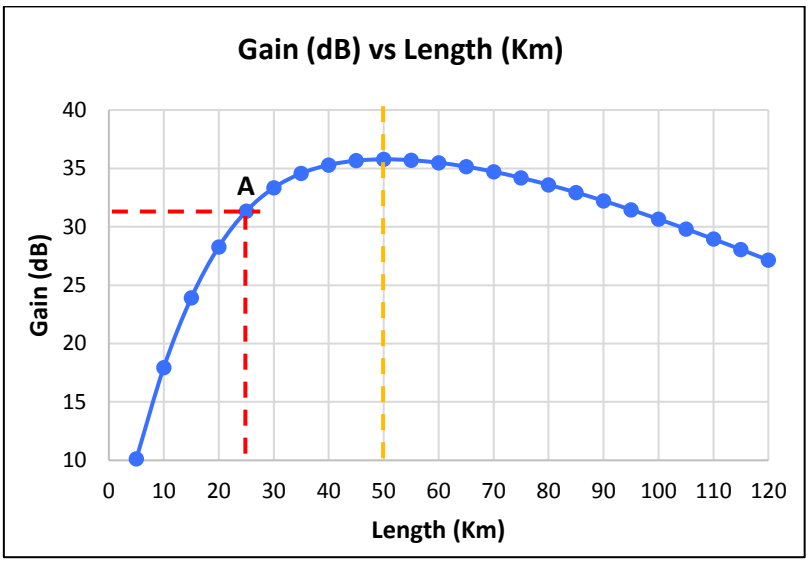


Figura 2.55 Ganancia del Raman en función de la longitud de fibra de no lineal.

Por tanto, para cada uno de los escenarios de simulación se escogió un valor de longitud de fibra no lineal de 25 Km, el mismo que viene dado por defecto en el simulador y que es menor a los 50 Km en donde se produce el agotamiento de la fuente de bombeo.

2.4.2.1.3 Visualización de Resultados

Bajo los parámetros requeridos en la simulación antes mencionados y en base a los parámetros dados en las especificaciones técnicas del amplificador Raman comercial del Anexo D mostrados en la Tabla 2.10, se presentan los resultados obtenidos mediante simulación de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para cada una de las longitudes de onda en el rango de 1530 a 1565 nm,

considerando pasos de 5nm, en las tres configuraciones de bombeo (codireccional, contradireccional y bidireccional).

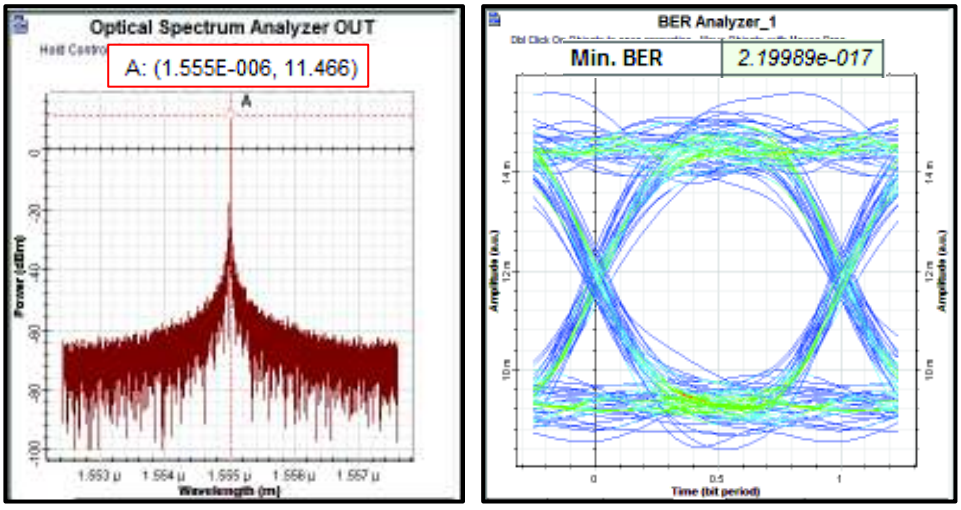
a) Raman con bombeo codireccional

En la Tabla 2.12 se muestran los resultados obtenidos mediante simulación del Raman en sistemas monocanal y en configuración de bombeo codireccional.

	Wavelength (nm)	Pump wavelength (nm)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	1455	21,612	4,404	33,498	1,606	4,41E-21
2	1535		24,258	4,205	33,707	4,253	3,07E-23
3	1540		27,009	4,157	33,766	7,004	5,55E-20
4	1545		28,137	4,065	33,871	8,131	3,75E-25
5	1550		30,175	3,934	34,015	10,169	4,95E-21
6	1555		31,472	3,955	34,008	11,466	2,20E-17
7	1560		30,616	4,062	33,915	10,610	6,45E-24
8	1565		29,047	3,904	34,087	9,041	5,28E-20

Tabla 2.12 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo codireccional.

Además, en la Figura 2.56 se observa el espectro de potencia de la señal de salida del amplificador con un valor de potencia de 11,46 dBm a una longitud de onda de 1555 nm; así como también el diagrama del ojo correspondiente con un BER excelente del orden de 10^{-17}.



a) **b)**

Figura 2.56 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo codireccional.

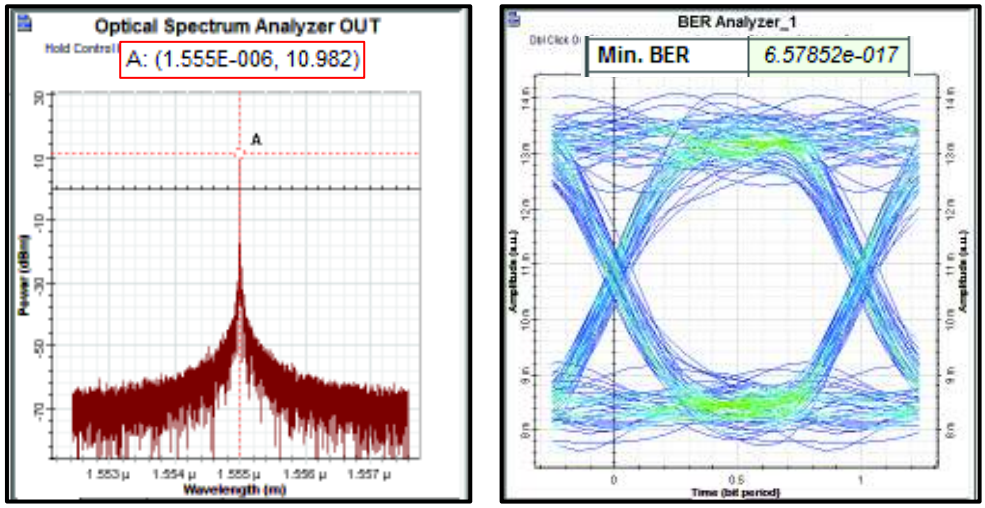
b) Raman con bombeo contradireccional

En la Tabla 2.13 se resaltan los resultados obtenidos mediante simulación del Raman en sistemas monocanal y en configuración de bombeo contradireccional.

	Wavelength (nm)	Pump wavelength (nm)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	1455	21,578	5,175	32,724	1,570	4,35E-15
2	1535		24,185	4,956	32,953	4,177	4,38E-14
3	1540		26,852	4,848	33,073	6,845	3,48E-17
4	1545		27,925	4,739	33,196	7,918	2,32E-16
5	1550		29,821	4,600	33,348	9,813	3,67E-18
6	1555		30,989	4,574	33,387	10,982	6,58E-17
7	1560		30,219	4,626	33,349	10,212	1,82E-17
8	1565		28,775	4,534	33,456	8,768	1,89E-18

Tabla 2.13 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo contradireccional.

Adicionalmente, en la Figura 2.57 se observa el espectro potencia de la señal de salida del amplificador con una potencia de 10,98 dBm, así también el diagrama del ojo con un BER del orden de 10^{-17} a una longitud de onda de 1555nm.



a) **b)**

Figura 2.57 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo contradireccional.

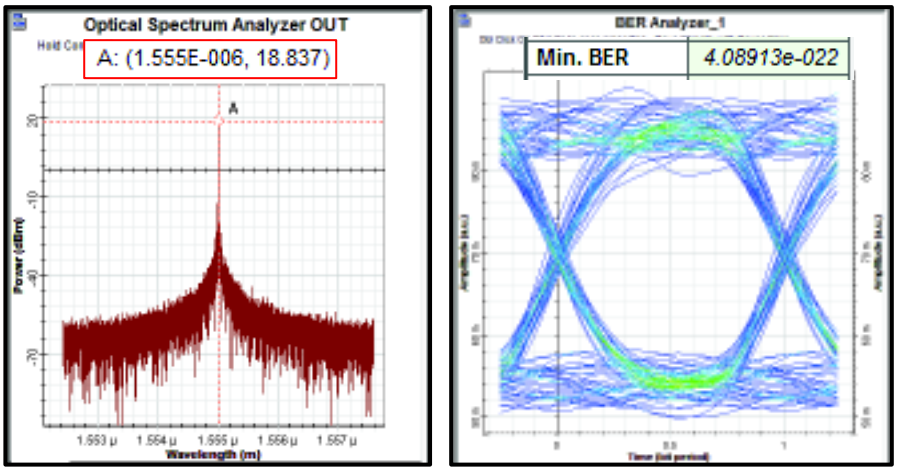
c) Raman con bombeo bidireccional

En la Tabla 2.14, se resaltan los resultados obtenidos mediante simulación del Raman en sistemas monocanal y en configuración de bombeo bidireccional.

	Wavelength (nm)	Pump wavelength (nm)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	1455	29,036	4,688	33,207	9,032	3,17E-21
2	1535		32,163	4,482	33,426	12,158	2,90E-25
3	1540		35,088	4,416	33,506	15,084	8,47E-20
4	1545		36,154	4,316	33,620	16,150	9,03E-21
5	1550		37,848	4,191	33,758	17,844	1,35E-23
6	1555		38,841	4,192	33,771	18,837	4,09E-22
7	1560		38,182	4,260	33,718	18,178	9,21E-22
8	1565		36,959	4,137	33,855	16,955	6,54E-22

Tabla 2.14 Resultados obtenidos para el Raman en banda C y bombeo bidireccional.

En la Figura 2.58 se muestra el espectro de potencia de la señal de salida del amplificador con un valor de potencia de 18,837 dBm, así como el diagrama del ojo con un BER excelente del orden de 10^{-22}.



a) **b)**

Figura 2.58 a) Espectro de potencia de la señal de salida y b) Diagrama del ojo para el Raman en banda C con bombeo bidireccional.

Una vez que se muestran los resultados del amplificador Raman en sistemas monocanal y en las diferentes configuraciones de bombeo, se procede a presentar las gráficas de los parámetros de ganancia, NF y OSNR obtenidos mediante simulación.

En la Figura 2.59 se muestra la ganancia del amplificador Raman en función de la longitud de onda, donde cada configuración de bombeo se representa con un color identificativo.

Teniendo que, para el bombeo codireccional y contradireccional los valores de ganancia están aproximadamente entre 21 y 32 dB, mientras que para el bombeo bidireccional entre 29 y 39 dB; ganancias que se encuentran dentro del rango de las especificaciones ya detalladas en la Tabla 2.10.

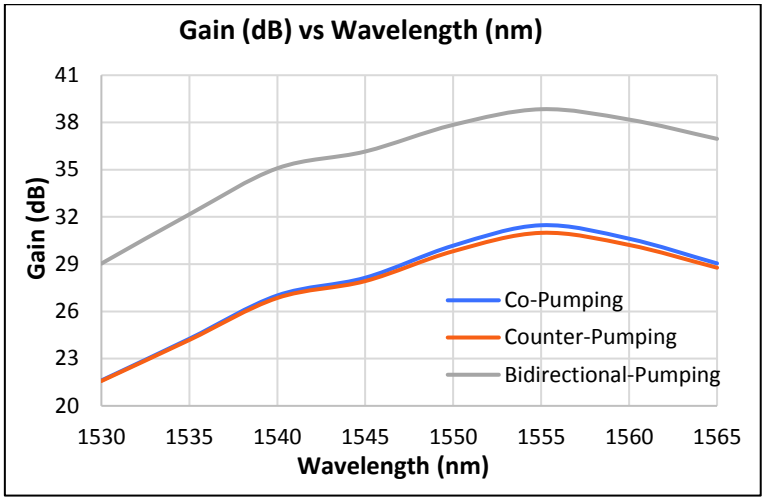


Figura 2.59 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

En la Figura 2.60 se observan las curvas de la NF en función de la longitud de onda; en las cuales para las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional se mantiene la NF entre valores alrededor de 3,9 y 5,2 dB.

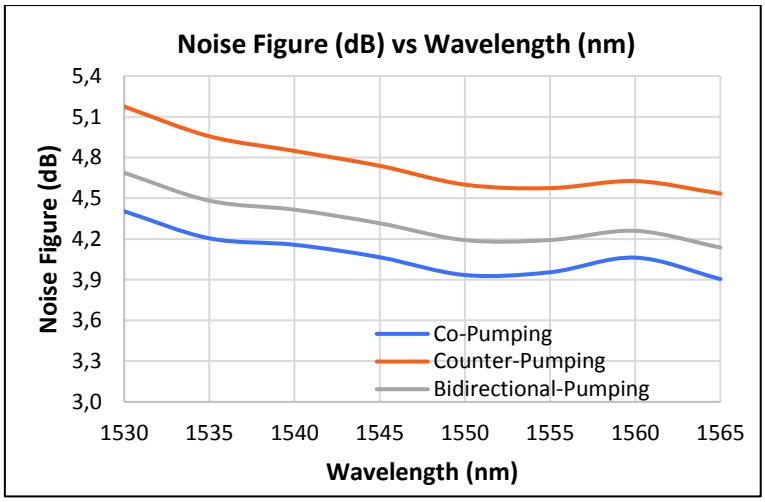


Figura 2.60 Figura de ruido del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

Por otra parte, en la Figura 2.61 se visualiza el parámetro OSNR en función de la longitud de onda, cuyas curvas varían dependiendo de la configuración de bombeo con valores cercanos a 32,7 y 34,1 dB.

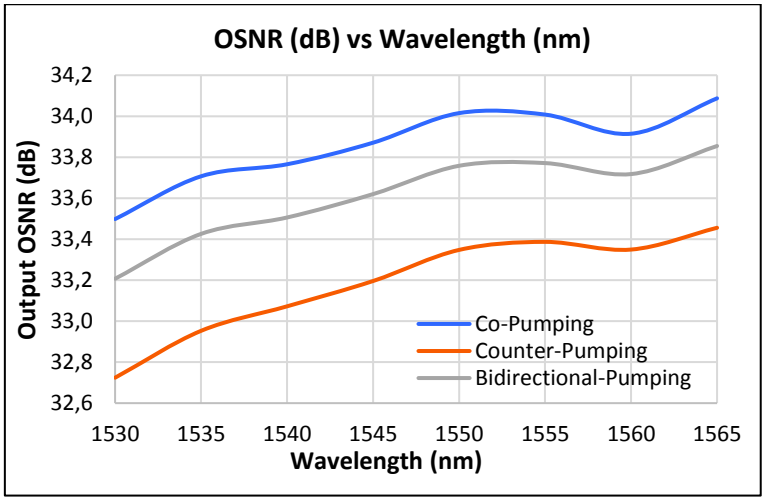


Figura 2.61 OSNR del Raman en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

Cabe mencionar, que el escenario previamente detallado se utilizó también en las bandas de operación S y L, con velocidades de transmisión de 10 y 100 Gbps, cuyas simulaciones y resultados se encuentran disponibles en el Anexo digital F-2.

2.4.2.2 Escenario de Simulación II: Raman en sistemas multicanal WDM

El segundo escenario se enfoca en analizar el comportamiento del amplificador Raman en sistemas de transmisión de múltiples canales ópticos (WDM) y una o varias fuentes de bombeo. Para este caso de estudio se toma como ejemplo un sistema WDM de 4 y 16 canales ópticos.

2.4.2.2.1 Esquema general para la implementación de la simulación

El esquema de simulación a utilizar se muestra en la Figura 2.62 que corresponde a un sistema WDM de 4 canales con un único bombeo en las tres configuraciones (codireccional, contradireccional y bidireccional).

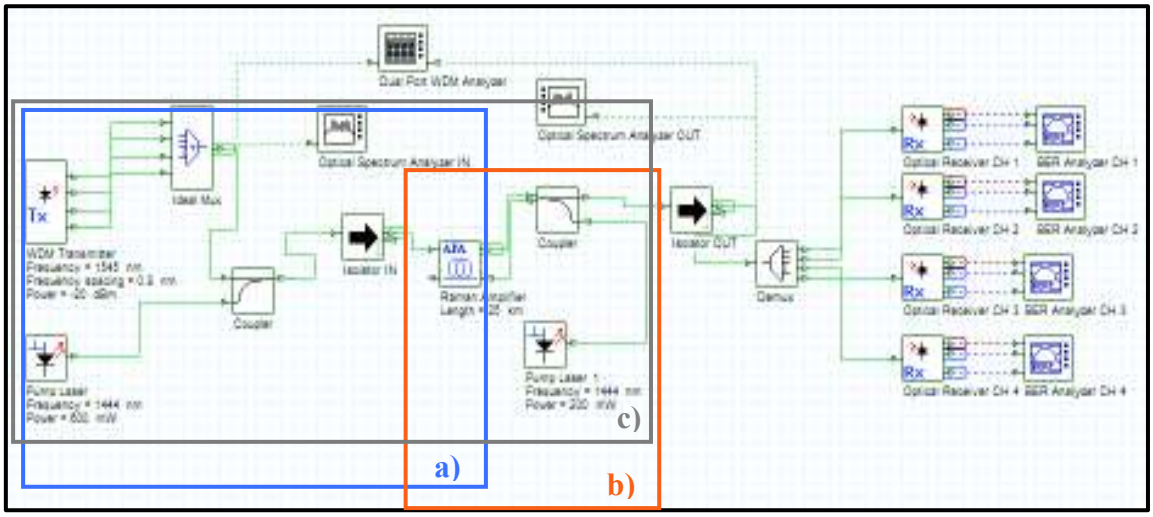


Figura 2.62 Esquema de simulación Raman en un sistema WDM de 4 canales con: a) bombeo codireccional, b) bombeo contradireccional y c) bombeo bidireccional.

Así mismo, en el esquema de la Figura 2.63 se presenta el esquema de simulación que incluye al amplificador Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo.

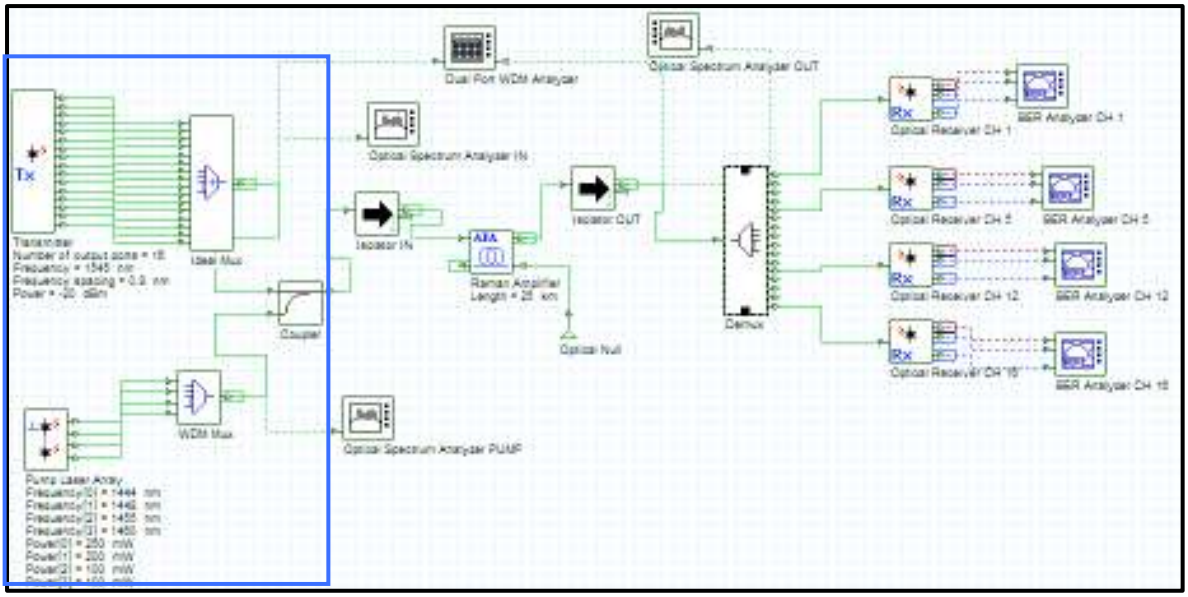


Figura 2.63 Esquema de simulación Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.

2.4.2.2.2 Características generales del esquema de simulación

Para los dos esquemas de simulación, en el bloque de transmisión se tiene el componente *WDM Transmitter,* que genera y define el número de canales que se

desea multiplexar mediante el componente *WDM Mux* que junto con la señal de la fuente de bombeo se combinan mediante el acoplador selectivo de longitud de onda (*Coupler*) y se inyectan al amplificador Raman. Al igual que en los sistemas monocanal se incluye un aislador en la entrada y salida del amplificador.

A la salida del componente *Raman Amplifier*, se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de las señales amplificadas.

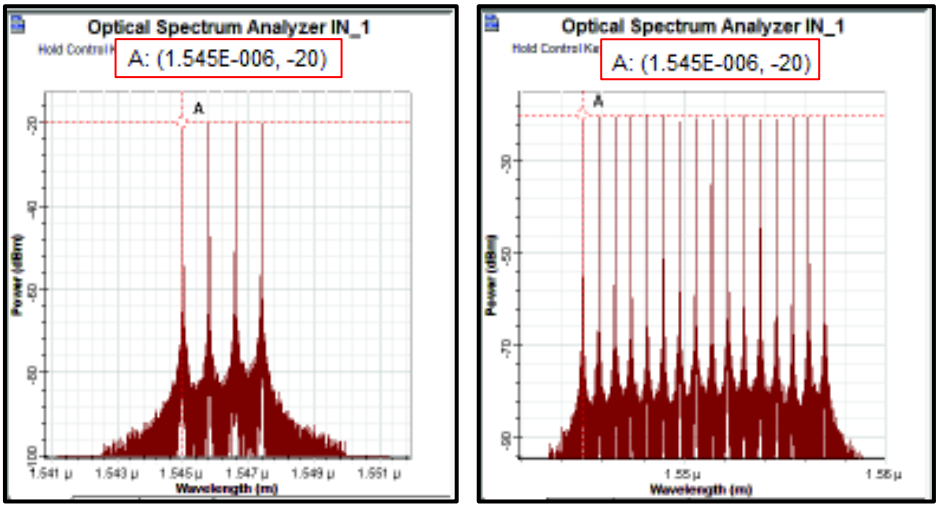
En el bloque receptor se dispone del componente *WDM Demux* que cumple la función de demultiplexar los canales transmitidos y, a su vez de los componentes *Optical Receiver* y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo de cada uno de los canales del sistema WDM.

La variante para el segundo esquema de simulación es el número de fuentes de bombeo, las cuales se multiplexan y se inyectan al amplificador Raman; por lo que se dispone de los componentes *Pump Laser Array* y *WDM Mux*.

Una vez detallado el esquema de simulación a implementar, se procede con la configuración de los parámetros característicos en cada uno de los componentes. Para ello, se considera las especificaciones técnicas del amplificador Raman ya mencionadas en la Tabla 2.10.

Por tanto, se elige los siguientes parámetros:

- Longitud de onda central del primer canal: 1545 nm.
- Longitud de onda de la fuente de bombeo: 100 nm bajo la longitud de onda de onda central.
- Potencia de la señal de bombeo: 600 mW.
- Potencia de la señal de entrada por cada canal: -20 dBm; en la Figura 2.64 se muestran los espectros de potencia de las señales de entrada al amplificador; el punto A indica el valor de potencia del primer canal a una longitud de onda central de 1545nm en los sistemas WDM de 4 y 16 canales.



a) **b)**

Figura 2.64 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del Raman en un sistema WDM de: a) 4 y b) 16 canales.

- Espaciamiento entre canales ópticos: 0,8 nm (100 GHz); en Tabla 2.15 se resalta los valores de longitud de onda central de cada uno de los canales. Cabe señalar que el simulador por defecto trabaja únicamente con las longitudes de onda central de cada uno de los canales ópticos.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545,0	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547,0
4	1547,0	1547,4	1547,8

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547
4	1547	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551
9	1551	1551,4	1551,8
10	1551,8	1552,2	1552,6
11	1552,6	1553	1553,4
12	1553,4	1553,8	1554,2
13	1554,2	1554,6	1555
14	1555	1555,4	1555,8
15	1555,8	1556,2	1556,6
16	1556,6	1557	1557,4

Tabla 2.15 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el Raman en un sistema WDM de 4 y 16 canales respectivamente.

2.4.2.2.3 Visualización de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante simulación de los parámetros de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para cada una de

las longitudes de onda central de cada canal, en cada uno de los escenarios del amplificador Raman en sistemas multicanal con una y múltiples fuentes de bombeo. Estos valores deben estar acorde al rango establecido en la Tabla 2.10, la cual contiene las especificaciones técnicas de un amplificador Raman comercial.

a) Raman en un sistema WDM de 4 canales con una fuente de bombeo

Para el amplificador Raman en un sistema WDM de 4 canales y una única fuente de bombeo en configuración bidireccional, se muestra la Tabla 2.16 que contiene los parámetros de ganancia, NF, OSNR y potencia de salida para cada uno de los canales en su respectiva longitud de onda central en banda C.

CH	Wavelength (nm)	Pump wavelength(nm)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1545	1444	32,4708	4,244	33,695	12,4689	3,08E-19
2	1545,8		32,2315	4,163	33,777	12,2282	1,29E-21
3	1546,6		31,9681	4,030	33,913	11,9663	5,06E-21
4	1547,4		31,6488	4,352	33,594	11,6470	9,51E-19

Tabla 2.16 Resultados obtenidos para el Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional en banda C.

En la Figura 2.65 se muestra el espectro de potencia de las señales de salida del amplificador Raman en un sistema WDM de 4 canales, donde el punto A representa la potencia del primer canal con un valor de 12,46 dBm a una longitud de onda central de dicho canal.

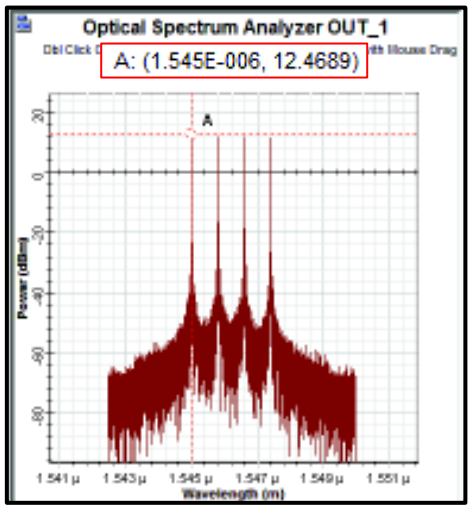
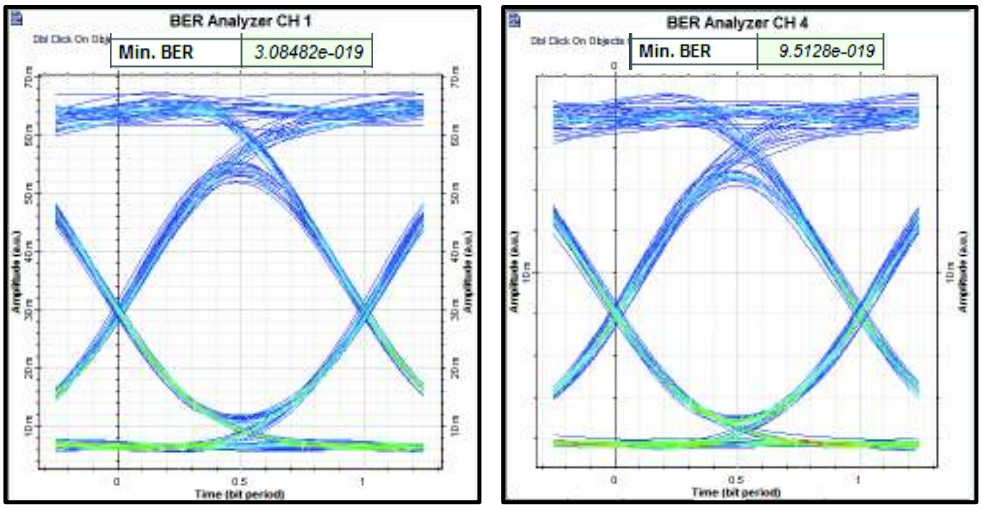


Figura 2.65 Espectro de potencia de la señal de salida del Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional.

En la Figura 2.66 se muestran los diagramas del ojo de los canales 1 y 4 del sistema WDM con un BER del orden de 10^{-19} en los dos casos.



a) **b)**

Figura 2.66 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 4 del Raman en un sistema WDM de 4 canales con bombeo bidireccional.

En la Figura 2.67 se muestra la ganancia de cada canal en la respectiva longitud de onda central a partir de 1545 nm, como se puede observar para las tres configuraciones la ganancia está alrededor de 24 dB y 32,5 dB por cada canal, valores que se encuentran dentro del rango de las especificaciones ya detalladas en la Tabla 2.10.

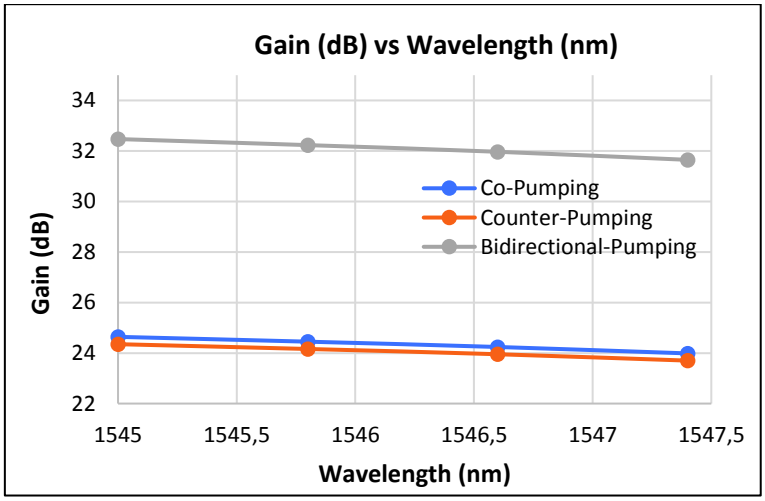


Figura 2.67 Ganancia de cada canal del Raman en función de su longitud de onda en banda C para un sistema WDM de 4 canales.

En la Figura 2.68 se muestra la NF de cada uno de los canales amplificados en la respectiva longitud de onda central, donde para las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional la NF está en un rango alrededor de 4,1 y 5 dB.

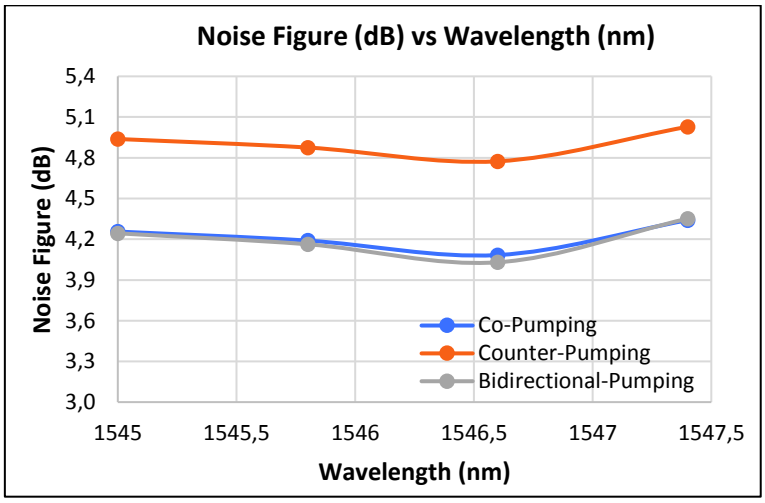


Figura 2.68 Figura de ruido de cada canal del Raman en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 4 canales.

Por otro lado, la Figura 2.69 muestra la OSNR de cada canal a la salida del amplificador en la respectiva longitud de onda central, verificando que para la configuración de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional se consiguen valores alrededor de 32,9 y 33,9 dB.

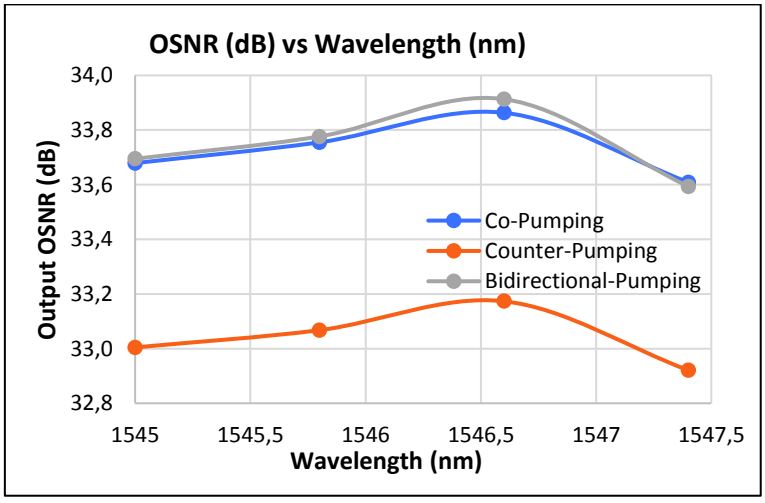


Figura 2.69 OSNR de cada canal del Raman en función de su longitud de onda central en banda C para un sistema WDM de 4 canales.

b) Raman en un sistema WDM de 16 canales con múltiples fuentes de bombeo

En cuanto al escenario de simulación del amplificador Raman actuando en un sistema WDM de 16 canales con 2 y 4 fuentes de bombeo, se toma como ejemplo la configuración de bombeo codireccional.

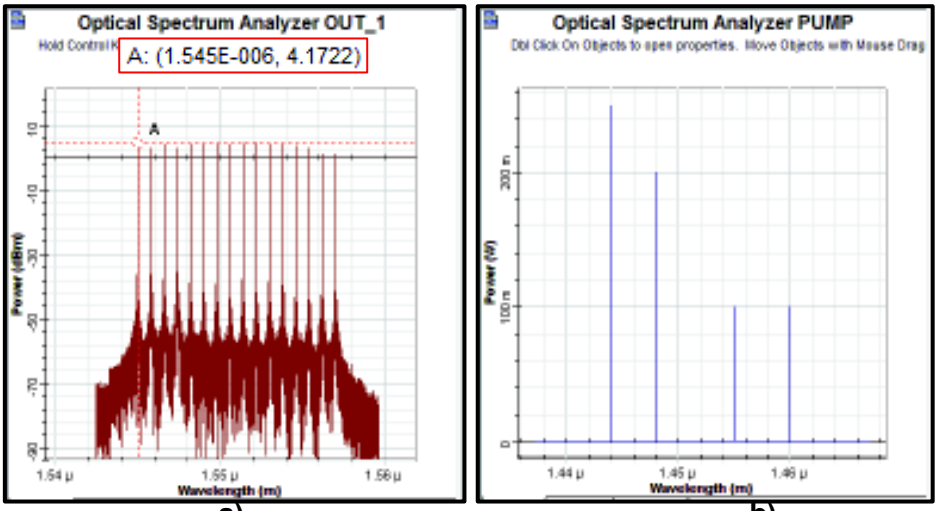
En la Tabla 2.17 se muestran los parámetros de ganancia, NF, OSNR y potencia de salida de cada canal.

	Wavelength (nm)	Pump characteristics	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)
1	1545	4 pumping Pump wavelength and power: (1) 1426 nm - 230 mW, (2) 1440 nm -200 mW, (3) 1444nm - 100 mW and (4) 1455 nm -100 mW	24,1784	3,9843	33,9556	4,1722
2	1545,8		24,2478	4,0429	33,8984	4,2410
3	1546,6		24,3324	4,0327	33,9145	4,3293
4	1547,4		24,3487	4,0838	33,8598	4,3399
5	1548,2		24,2938	4,1015	33,8532	4,2938
6	1549		24,2208	4,1767	33,7793	4,2199
7	1549,8		24,2122	4,0741	33,6828	4,2097
8	1550,6		24,2430	4,0374	33,7230	4,2418
9	1551,4		24,2965	4,0282	33,7343	4,2952
10	1552,2		24,6547	3,9988	33,6705	4,6521
11	1553		24,8695	3,9962	33,6705	4,8683
12	1553,8		24,2407	4,1392	33,5284	4,2387
13	1554,6		23,6481	4,1305	33,5412	3,6467
14	1555,4		23,0074	4,2591	33,6186	3,0086
15	1556,2		22,1780	4,2905	33,6833	2,1713
16	1557		21,6661	4,3046	33,6833	1,6616

Tabla 2.17 Resultados obtenidos para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional en banda C.

En la Figura 2.70a se muestra el espectro de potencia de las señales de salida del amplificador Raman en un sistema WDM de 16 canales con 4 fuentes de bombeo codireccional.

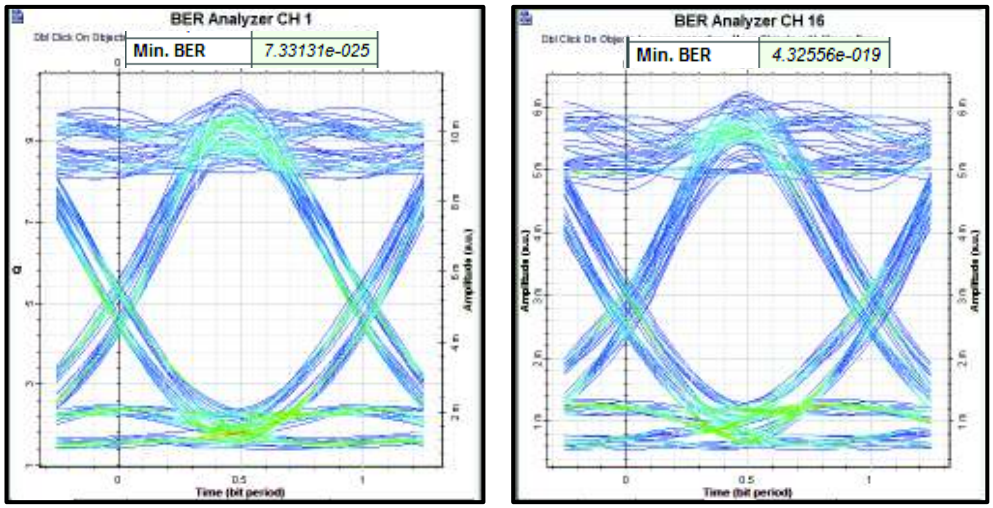
Donde el punto A representa la potencia del primer canal de 4,17 dBm a una longitud de onda central de dicho canal y, en la Figura 2.70b se muestra el espectro de potencias de las fuentes de bombeo empleadas.



a) b)

Figura 2.70 Espectros de potencia de: a) señal de salida del Raman en un sistema WDM de 16 canales y b) fuentes de bombeo codireccional.

En la Figura 2.71 se visualizan los diagramas de ojo de los canales 1 y 16, con valores de BER del orden de 10^{-25} y 10^{-19} respectivamente.



a) b)

Figura 2.71 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 16 del Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.

En la Figura 2.72, se muestra la ganancia de cada canal en su respectiva longitud de onda central a partir de 1545 nm; cómo se puede observar con la utilización de dos fuentes de bombeo la ganancia es plana con valores cercanos entre 9 y 10 dB; y, con cuatro fuentes de bombeo la ganancia permanece en un valor más amplio alrededor de 21 y 25 dB.

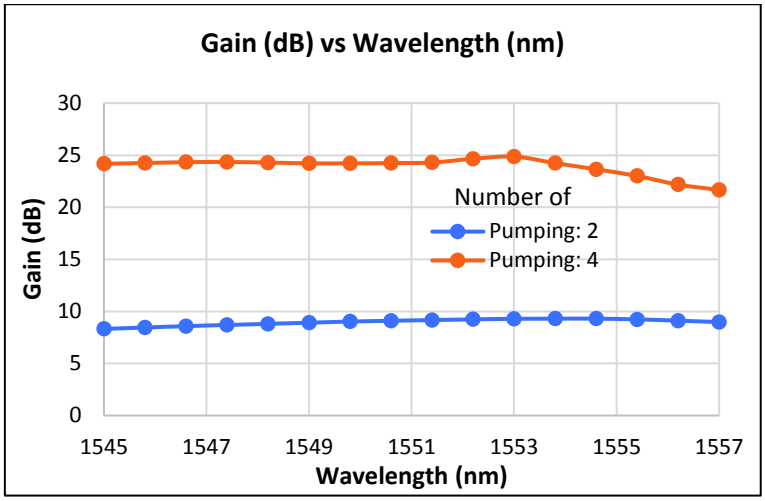


Figura 2.72 Ganancia de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.

Además, en la Figura 2.73 se muestra la NF de cada canal amplificado en su respectiva longitud de onda central, obteniendo valores de NF cercanos entre 3,8 y 4,8 dB.

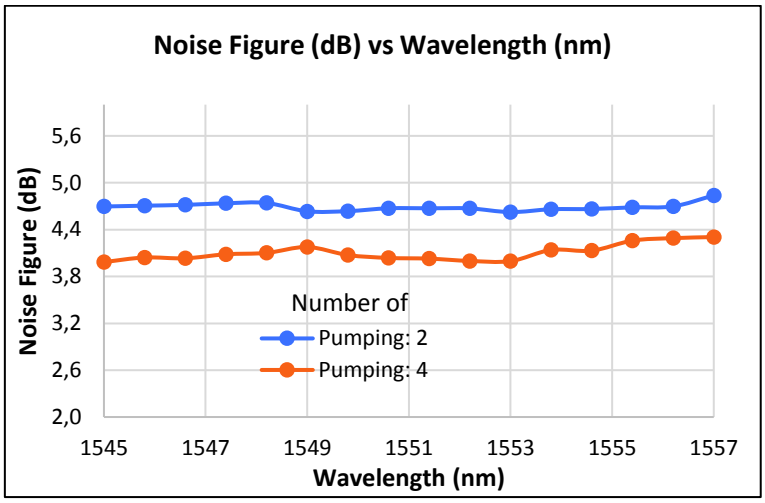


Figura 2.73 Figura de ruido de cada canal en función de su longitud de onda central para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.

Así también, en la Figura 2.74 se muestra la OSNR de salida del amplificador de cada canal en su respectiva longitud de onda central, verificando que con la utilización de 2 y 4 fuentes de bombeo la OSNR mantiene valores cercanos entre 33,3 y 34 dB.

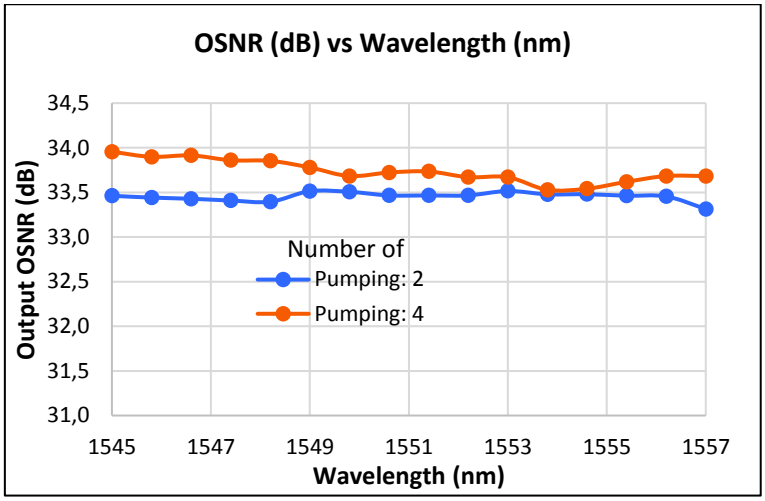


Figura 2.74 OSNR de cada canal en función de su longitud de onda central en banda C para el Raman en un sistema WDM de 16 canales con multibombeo codireccional.

Cabe mencionar, que el escenario previamente detallado también se utilizó con sistemas WDM de 8, 32 y 64 canales; con una y múltiples fuentes de bombeo, cuyas simulaciones y resultados se encuentran disponibles en el Anexo digital D-2.

2.4.3 SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR DE SEMICONDUCTOR SOA

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.

Una vez revisada la parte teórica de los tipos de SOA y comparando con los componentes disponibles en las librerías de los amplificadores ópticos en el simulador OptiSystem, se seleccionó el componente *Wideband Traveling Wave SOA* para los diferentes escenarios de simulación, ya que los otros componentes presentan características compatibles para otro tipo de aplicaciones con el SOA.

2.4.3.1 Escenario de Simulación I: SOA en sistemas monocanal

En esta sección se desarrolla el escenario básico de un sistema de comunicación óptico monocanal con la utilización de un amplificador SOA, identificando sus principales características y limitaciones de uso.

2.4.3.1.1 Esquema general para la implementación de la simulación

El esquema presentado en la Figura 2.75 corresponde al escenario de simulación utilizado para un amplificador SOA en sistemas monocanal.

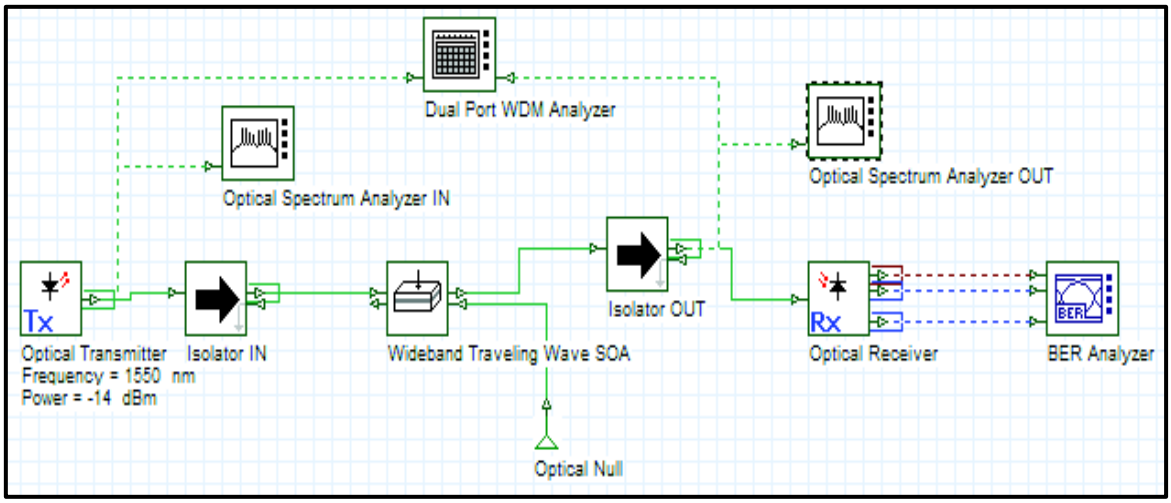


Figura 2.75 Esquema de simulación del amplificador SOA en sistemas monocanal.

2.4.3.1.2 Características generales del esquema de simulación

Para el esquema mostrado en la Figura 2.75, en el bloque transmisor, el componente *Optical Transmitter* emite una señal que será la que se amplifique y se inyecta al componente *Wideband Traveling Wave SOA*, en el cual se produce la amplificación.

El componente aislador (*Ideal Isolator*) ubicado a la entrada y salida del amplificador, cumple la función de impedir la propagación del ruido de emisión espontánea ASE y señales reflejadas hacia el SOA; evitando que al inyectar estas señales el componente *Wideband Traveling Wave SOA* las amplifique.

A la salida del componente *Wideband Traveling Wave SOA,* se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de la señal amplificada.

Finalmente, en el bloque receptor se utilizan los componentes *Optical Receiver* y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo.

Una vez detallado el esquema de simulación a implementar, se procede con la configuración de parámetros característicos en cada uno de estos componentes.

Para el efecto se toma como referencia las especificaciones técnicas del amplificador SOA comercial, cuyos datasheets constan en los Anexos D-1, D-2 y D-3, de los cuales se presentan los siguientes valores de los parámetros principales y necesarios para el desarrollo de estos escenarios de simulación, ver Tabla 2.18**:**

Parámetros	Mín	Máx	Unidad
Longitud de onda	O, C		-
Potencia de entrada	-15	3	dBm
Corriente de operación	450	600	mA
Ganancia	15	30	dB
Figura de ruido (NF)	7 a11,5 @ Banda C 12 a 14 @ Banda O		dB
Potencia de salida de saturación	10	16	dBm
Velocidad de transmisión	155 M	10 G	bps

Tabla 2.18 Parámetros tomados de las especificaciones técnicas del SOA (Anexo E).

Por lo tanto, de acuerdo con las especificaciones ya mencionadas, se selecciona los siguientes parámetros requeridos en la simulación:

- Longitud de onda de operación: rango comprendido entre 1530 y 1560 nm.
- Corriente aplicada: 500 mA.
- Potencia de la señal de entrada: -14 dBm, en la Figura 2.76 se presenta el espectro de potencia de la señal de entrada al amplificador, resaltándose el punto A, el cual indica la potencia de entrada a una longitud de onda de 1550 nm dentro del rango de banda C

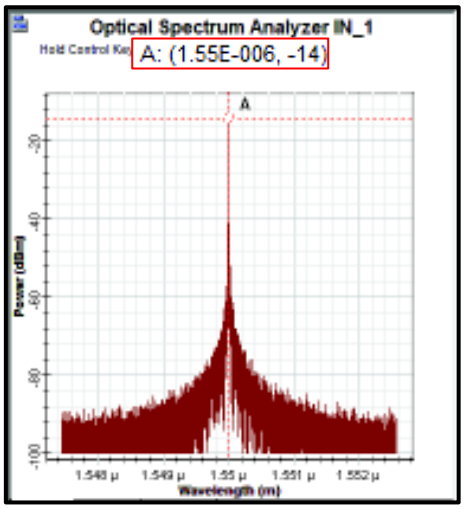


Figura 2.76 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del SOA en sistemas monocanal.

2.4.3.1.3 Visualización de Resultados

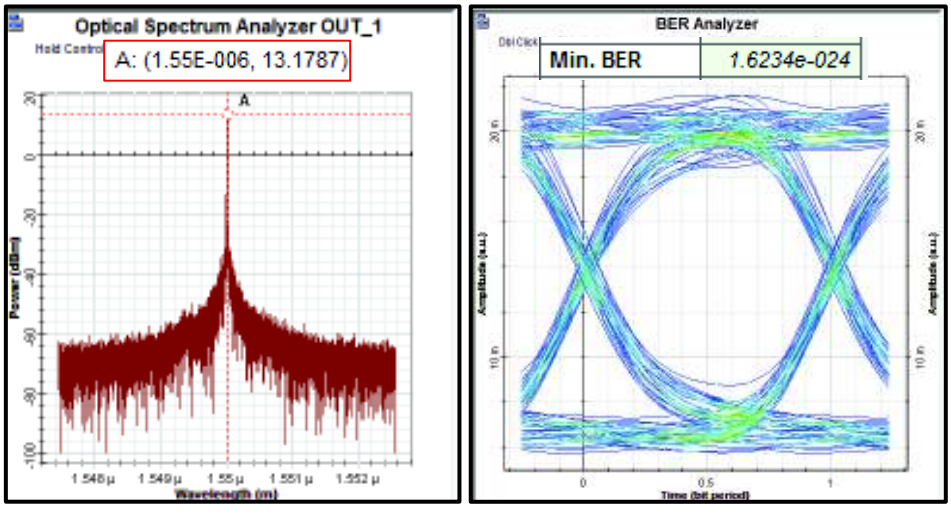
Bajo los parámetros requeridos en la simulación antes mencionados y en base a los parámetros dados en las especificaciones técnicas del amplificador SOA comercial del Anexo E mostrados en la Tabla 2.18.

Se presentan en la Tabla 2.19 los resultados obtenidos mediante simulación de los parámetros de ganancia, NF, OSNR, BER y potencia de salida para cada una de las longitudes de onda en el rango de 1530 a 1560 nm, considerando pasos de 5nm.

	Wavelength (nm)	Current (mA)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1530	500	26,5323	10,4518	38,3942	12,5284	4,72E-27
2	1535		26,8729	10,4722	38,9706	12,869	4,67E-22
3	1540		27,0524	10,3501	39,4616	13,0485	8,48E-20
4	1545		27,1467	10,2576	39,6664	13,1429	2,59E-20
5	1550		27,1826	10,1332	39,6333	13,1787	1,62E-24
6	1555		27,1663	9,8292	39,4808	13,1625	9,45E-33
7	1560		27,0824	9,4970	39,1948	13,0785	2,08E-36

Tabla 2.19 Resultados obtenidos para el SOA en banda C.

En la Figura 2.77 se muestra el espectro de potencia de la señal de salida del amplificador con un valor de potencia de 13,17 dBm a una longitud de onda de 1550 nm; así como también el diagrama del ojo con un BER muy aceptable del orden de 10^{-24}.



a) **b)**

Figura 2.77 a) Espectro de potencia de señal de salida y b) Diagrama del ojo para el SOA en banda C.

Finalmente, en la Figura 2.78 se muestra la ganancia, NF y OSNR del amplificador SOA en función de la longitud de onda, donde cada curva se representa con un color identificativo.

Teniendo así, valores de ganancia entre 26,5 y 27,2 dB; altas NF entre 9 y 11 dB; y, OSNR entre 29,5 y 30 dB.

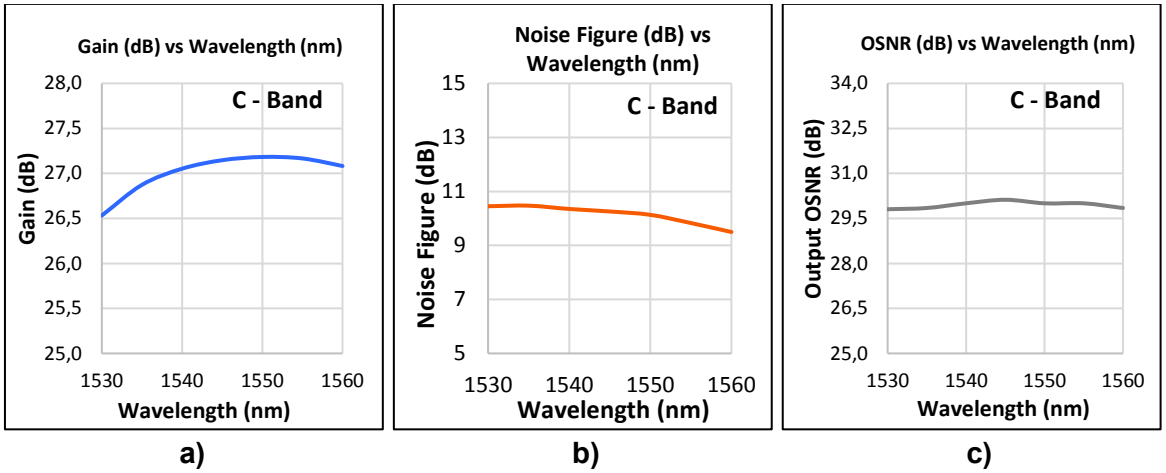


Figura 2.78 a) Ganancia, b) Figura de ruido y c) OSNR del SOA en función de la longitud de onda en banda C para sistemas monocanal.

Cabe señalar, que el escenario previamente detallado también se utilizó en las bandas de operación O, S y L, cuyas simulaciones y resultados se encuentran disponibles en el Anexo digital F-3.

2.4.3.2 Escenario de Simulación II: SOA en sistemas multicanal WDM

En este segundo caso se prueba al amplificador SOA en sistemas WDM de múltiples canales y, debido al elevado *crosstalk* que introduce este amplificador, se pretende comprobar mediante simulación que no presenta un buen comportamiento.

Actualmente el SOA no es utilizado en la amplificación de múltiples canales ópticos; a continuación, se muestra a manera de ejemplo el escenario del SOA en un sistema WDM de 4 canales ópticos.

2.4.3.2.1 Esquema general para la implementación del sistema

Se muestra en la Figura 2.79 el esquema de simulación utilizando un amplificador SOA en un sistema WDM de 4 canales ópticos.

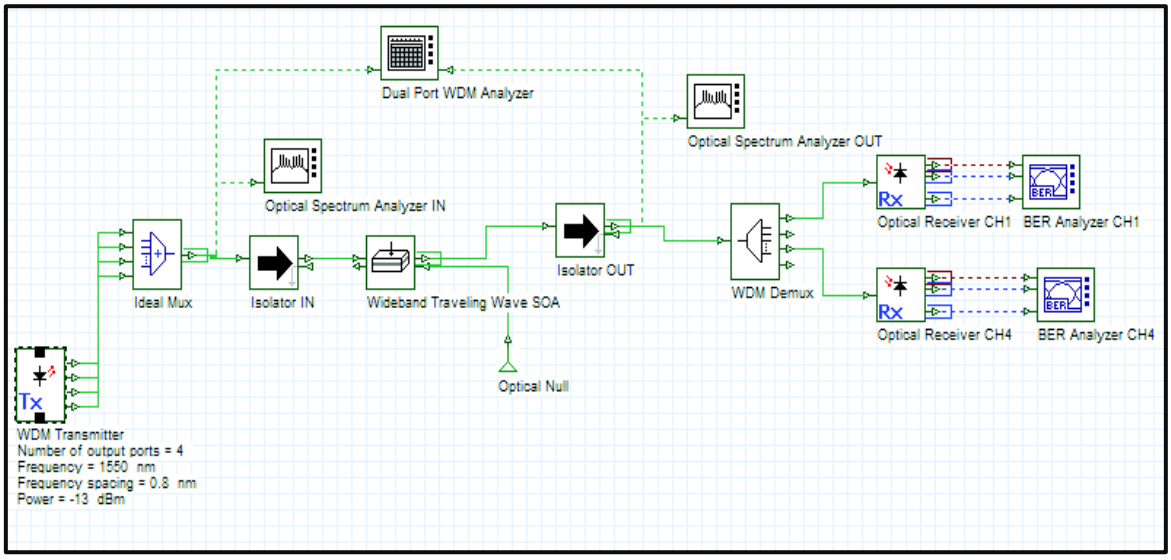


Figura 2.79 Esquema de simulación SOA en un sistema WDM de 4 canales.

2.4.3.2.2 Características generales del esquema de simulación

Para el esquema de simulación de la Figura 2.79, el componente *Optical Transmitter* que genera y define el número de canales que se desea multiplexar mediante el componente *WDM Mux* y se inyectan al SOA. Al igual que en los sistemas monocanal se incluye un aislador en la entrada y salida del amplificador.

A la salida del componente *Wideband Traveling Wave SOA*, se disponen de varios componentes visualizadores *Dual Port WDM Analyzer* y *Optical Spectrum Analyzer* a fin de mostrar las características de las señales amplificadas.

En el bloque receptor se dispone del componente *WDM Demux* que cumple la función de demultiplexar los canales transmitidos y, a su vez de los componentes *Optical Receiver* y *BER Analyzer* para obtener el BER y el diagrama del ojo de cada uno de los canales del sistema WDM.

Una vez indicado el esquema a implementar, se procede con la configuración de los parámetros característicos en cada uno de los componentes. Para ello se consideró las especificaciones técnicas del amplificador SOA ya mencionadas en la Tabla 2.18.

Por tanto, se selecciona los siguientes parámetros:

- Longitud de onda de operación central: 1550 nm.

- Corriente aplicada: 500 mA.
- Potencia de la señal de entrada por cada canal: -13 dBm, en la Figura 2.80 muestran los espectros de potencia de las señales de entrada al amplificador, el punto A indica el valor de la potencia del primer canal en su longitud de onda central 1550 nm dentro del rango de banda C.

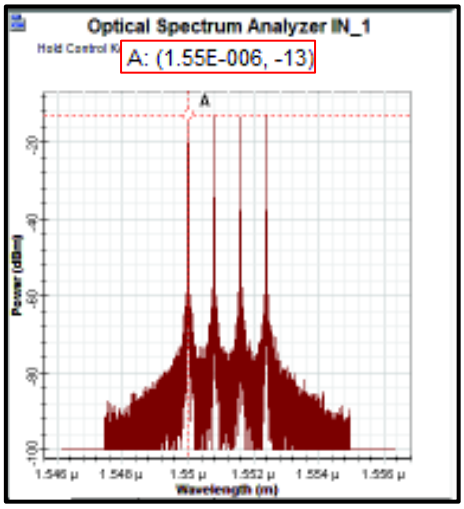


Figura 2.80 Espectro de potencia de la señal de entrada utilizada en el escenario de simulación del SOA en un sistema WDM de 4 canales.

- Espaciamiento entre canales ópticos: 0,8 nm (100 GHz); en la Tabla 2.20 se resalta los valores de longitud de onda central de cada uno de los 4 canales. Cabe señalar que el simulador por defecto trabaja únicamente con las longitudes de onda central de cada canal óptico.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1549,6	1550,0	1550,4
2	1550,4	1550,8	1551,2
3	1551,2	1551,6	1552,0
4	1552,0	1552,4	1552,8

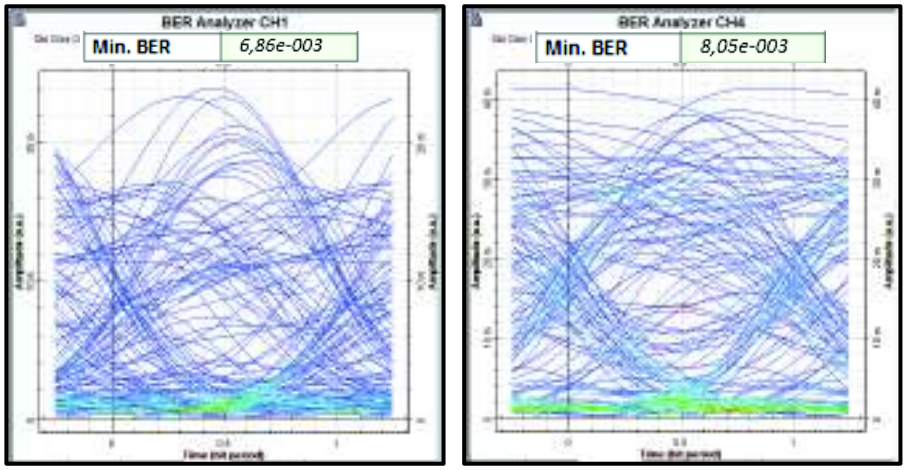
Tabla 2.20 Valores de la longitud de onda de cada canal para el SOA en un sistema WDM de 4 canales.

2.4.3.2.3 Visualización de Resultados

A continuación, se presenta los resultados obtenidos mediante simulación del amplificador SOA en un sistema WDM de 4 canales.

Debido a las limitaciones del software Optisystem no se puede analizar el *crosstalk* directamente en los sistemas WDM, por lo que se hizo uso del componente *BER Analyzer* para relacionar este efecto con el diagrama del ojo.

Así pues, en la Figura 2.81 se muestran los diagramas del ojo para los canales 1 y 4 del sistema WDM en estudio, en los cuales se puede observar que se encuentran significativamente cerrados debido al alto *crosstalk* que se introduce al utilizar un amplificador SOA en estos sistemas.



a) **b)**

Figura 2.81 Diagrama del ojo del a) canal 1 y b) canal 4 del SOA en un sistema WDM.

Finalmente, en la Tabla 2.21 se resaltan tanto los valores de NF como el BER alcanzado para este sistema WDM de 4 canales ópticos, presentando altas NF entre 13 y 17 dB con un BER del orden de 10^{-3}, valor que no es aceptable en el campo de las telecomunicaciones.

	Wavelength (nm)	Current (mA)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1550,0	500	20,4035	17,3821	24,415	7,402	6,86E-03
2	1550,8		17,7123	16,7384	25,006	4,711	5,05E-03
3	1551,6		12,6788	14,8062	26,925	-0,326	9,62E-03
4	1552,4		16,8712	13,0858	28,651	3,868	8,05E-03

Tabla 2.21 Resultados obtenidos para el SOA en un sistema WDM de 4 canales en banda C.

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se realiza el análisis comparativo de la parte teórica con los resultados derivados de cada uno de los escenarios de simulación detallados en el capítulo anterior. Así pues, con la finalidad de contrastar los valores de ganancia, figura de ruido (NF), OSNR y BER; para cada uno de los amplificadores ópticos se tomó en cuenta la variación de parámetros característicos tales como: longitud de onda de operación, potencia de la señal de entrada, longitud de onda de bombeo, potencia de bombeo (para EDFA y Raman); y, corriente aplicada para el SOA.

3.1 COMPARACIÓN DE LOS DIFERENTES ESCENARIOS

A continuación, se contrastan los resultados obtenidos mediante simulación con el desarrollo teórico del primer capítulo; como base para este análisis se emplearán distintas gráficas que se encuentran disponibles en formato digital en el Anexo F. Así también, se tomó como referencia la recomendación ITU-T G661 del Anexo A y las especificaciones técnicas de amplificadores comerciales cuyos datasheets se incluyen en los Anexos B, C y D; de los que se consideró los siguientes parámetros (ver Tabla 3.1):

<table>
<tr><th>Parámetro</th><th>EDFA</th><th>Raman</th><th>SOA</th></tr>
<tr><td>Banda de operación</td><td>C y L</td><td>S, C, y L</td><td>O y C</td></tr>
<tr><td>Longitud de la fibra dopada con Erbio (m)</td><td>5 a 10 @ Banda C
30 a 100 @ Banda L</td><td>N/A</td><td>N/A</td></tr>
<tr><td>Ganancia (dB)</td><td>>30</td><td>5 a 40</td><td>> 15</td></tr>
<tr><td>Figura de ruido (dB)</td><td>5-6 dB@980nm
6-7 dB@1480nm</td><td>3 a 6</td><td>7 a 11,5 @ Banda C
12 a 14 @ Banda O</td></tr>
<tr><td>Pin (dBm)</td><td>-30 a 5</td><td>-40 a 5</td><td>-15 a 3</td></tr>
<tr><td>Psat (dBm)</td><td>10 a 20</td><td>>15</td><td>14 a 17</td></tr>
<tr><td>Alcance (Km)</td><td>60</td><td>50 a 120</td><td>25 a 50</td></tr>
<tr><td rowspan="4">Sistema de bombeo</td><td colspan="2">Longitud de onda de bombeo (nm)</td><td>Corriente (mA)</td></tr>
<tr><td>980 y 1480</td><td>100 nm bajo la longitud de onda de operación.</td><td rowspan="3">400 a 600</td></tr>
<tr><td colspan="2">Potencia de bombeo (mW)</td></tr>
<tr><td>100 a 350 @ 980 nm
120 a 350 @ 1480 nm</td><td>300 a 1200</td></tr>
<tr><td>Velocidad de tx</td><td colspan="2">10, 40 y 100 (Gbps)</td><td>155 Mbps a 10 Gbps</td></tr>
</table>

Tabla 3.1 Parámetros tomados como referencia para el análisis comparativo de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA.

3.1.1 COMPARACIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN I: EDFA, RAMAN Y SOA EN SISTEMAS MONOCANAL

El escenario de simulación I se emplea para analizar el comportamiento de cada uno de los amplificadores ópticos en sistemas monocanal; por lo que, para establecer las comparaciones se toma los siguientes parámetros como principales:

- Longitud de onda de operación: corrobora el rango de longitudes de onda de operación para las cuales el amplificador puede trabajar; para ello se consideran las bandas previamente mostradas en la Tabla 1.1 [20]:
- Potencia de entrada: define el rango de potencia de entrada para el cual el amplificador puede trabajar sin llegar a saturarse.
- Sistema de bombeo: determina los valores de longitud de onda de bombeo, potencia de bombeo (para el EDFA y Raman) y corriente de bombeo (para el SOA), bajo los cuales el amplificador puede operar adecuadamente y presentar mejores características acorde a los parámetros de estudio.

3.1.1.1 Análisis comparativo del amplificador EDFA en sistemas monocanal

Bajo el escenario de simulación del EDFA en sistemas monocanal desarrollado en la sección 2.4.1.1, se procede a contrastar los resultados obtenidos mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla 3.1 y el desarrollo teórico de la sección 1.3.

3.1.1.1.1 Longitud de onda de operación para el EDFA

El rango de longitudes de onda de operación del EDFA es dependiente de la longitud de la fibra dopada con erbio, por lo tanto, para realizar el siguiente análisis se varía la longitud de onda de operación y la longitud de la fibra dopada con erbio que hace la amplificación, manteniendo constantes los siguientes parámetros acorde a lo establecido en la Tabla 3.1:

- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo: 150 mW.
- Longitud de onda de bombeo: 1480 nm.

- Configuración de bombeo: para este caso de estudio se considera la configuración de bombeo bidireccional; pues, como se visualizó en los resultados de la sección 2.4.1.1.3, que hace referencia al EDFA en sistemas monocanal, las curvas de los parámetros de ganancia, NF y OSNR de las tres configuraciones de bombeo conservan la misma tendencia.

a) Ganancia del EDFA versus la longitud de onda a diferentes longitudes de fibra dopada con erbio

A continuación, en la Figura 3.1 se muestran las curvas de ganancia obtenidas mediante simulación del EDFA en sistemas monocanal a diferentes longitudes de fibra dopada con erbio en sus respectivas bandas de operación.

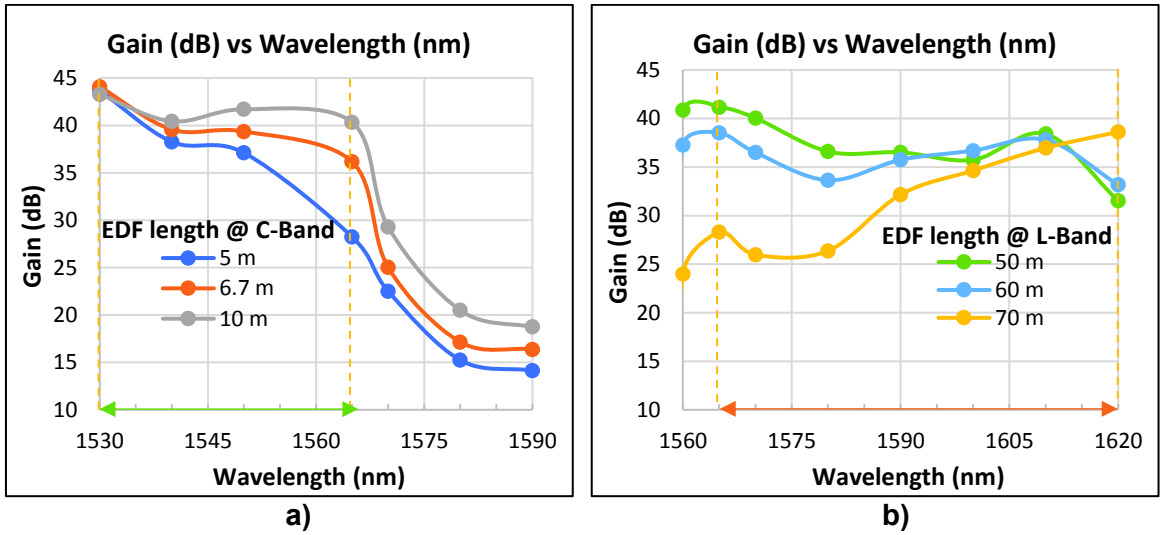


Figura 3.1 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda con diferentes longitudes del tramo de fibra dopada para a) banda C y b) banda L.

Análisis de resultados

Acorde a los resultados presentados en la Figura 3.1 se establece el siguiente análisis comparativo a fin de definir el rango de longitudes de onda de operación del amplificador EDFA:

- En base a lo expuesto en la teoría, se varió la longitud de la fibra dopada con erbio en el rango de 5 a 10 m, mismos que permiten la amplificación en las longitudes de onda de banda C; por lo que con valores de 5; 6,7 y 10 m de este parámetro, se observa en la Figura 3.1a que la ganancia en las longitudes de onda de 1530 a 1565 nm son superiores a 25 dB, lo que no

sucede en las longitudes de onda mayores a 1565 nm, donde la ganancia decae significativamente.

- Se varió la longitud de la fibra dopada en un rango entre 30 y 100 m para analizar el desempeño del amplificador EDFA en banda L; donde se verifica que, con valores de 50, 60 y 70 m se tiene amplificación con ganancias superiores a 25 dB en una porción de banda L que cubre el rango de las longitudes de onda entre 1565 y 1620 nm.
- En efecto se logró verificar que la longitud de la fibra dopada con erbio es un factor influyente en el rango de operación del amplificador EDFA, cumpliendo de esta manera con las especificaciones dadas en la Tabla 3.1, que hace referencia a los valores de la longitud de fibra dopada en bandas C (entre 5 y 10 m) y en banda L (entre 50 y 100 m).

Una vez que se ha comprobado la relación entre la longitud de la fibra dopada con el rendimiento de este amplificador en cuanto a sus bandas de operación; para los siguientes casos de estudio del EDFA en sistemas monocanal se considera una longitud de fibra dopada de 6,7 m para banda C y de 50 m para banda L; puesto que, con estos valores, además de conseguir una ganancia superior a 30 dB, se tiene una baja figura de ruido (NF) en el orden de 5 a 7 dB.

b) Figura de ruido y OSNR del EDFA versus la longitud de onda a diferentes longitudes de fibra dopada con erbio

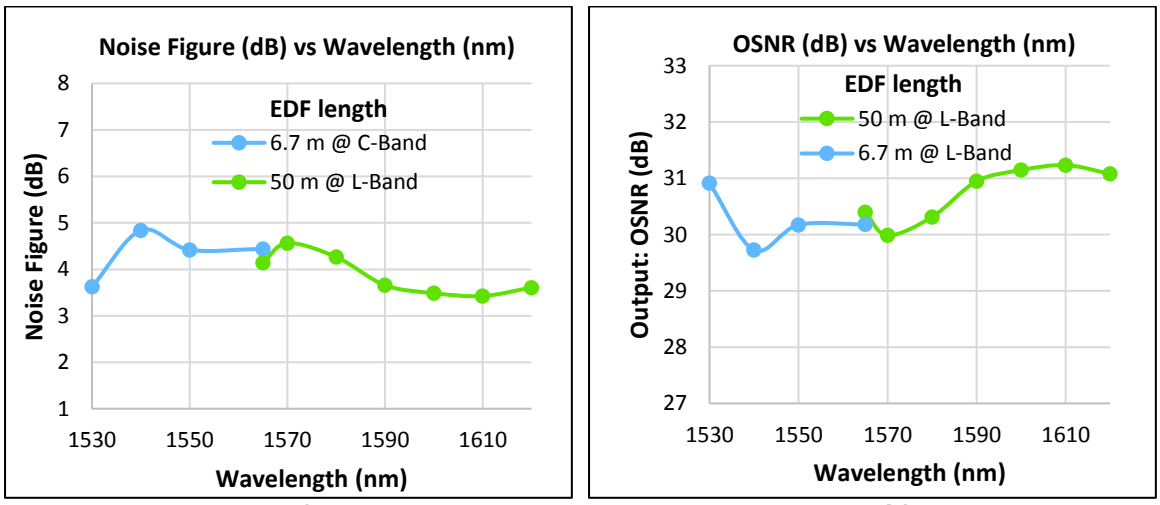


Figura 3.2 a) Figura de ruido y b) OSNR del EDFA en función de la longitud de onda a diferentes longitudes del tramo de fibra dopada.

En la Figura 3.2 se presenta las curvas de figura de ruido (NF) y OSNR obtenidas en las simulaciones del amplificador EDFA en sistemas monocanal con diferentes longitudes de fibra dopada con erbio en sus respectivas bandas de operación.

Análisis de resultados

Los resultados arrojados de la simulación en este caso se visualizan en la Figura 3.2, con éstos se establece el siguiente análisis comparativo de la figura de ruido (NF) y OSNR en sus respectivas longitudes de onda de operación a diferentes longitudes de la fibra dopada con erbio:

- Como se puede apreciar en la Figura 3.2a, la NF permanece en el rango de 3,5 a 5 dB, valores que independientemente de las longitudes de fibra dopada en las respectivas bandas de operación, no exceden los límites de NF establecidos en la Tabla 3.1, la cual señala que la figura de ruido debe estar en el rango de 5 a 7 dB.
- Así mismo, la Figura 3.2b indica que los valores de OSNR en las bandas C y L son superiores a 25 dB, lo que garantiza que en la recepción se reciba la señal sin inconvenientes siempre y cuando no se tenga tramos adicionales de fibra óptica y otros dispositivos que puedan afectar la OSNR del sistema. De esta manera se corrobora lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3 que hace referencia a los valores de OSNR mayores a 15 dB.

c) EDFA en una porción de banda S comprendiendo las longitudes de onda entre 1480 y 1530 nm

Adicionalmente, se probó al amplificador EDFA en las longitudes de onda de operación de banda S, se simuló el escenario del amplificador EDFA en sistemas monocanal, en las longitudes de onda entre 1480 y 1530 nm con pasos de 10 nm.

	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
4	1510	11,2232	7,88602	30,0003	-8,78394
5	1520	23,6177	6,89903	30,9662	3,6105
6	1530	41,4672	3,80881	34,0812	21,46

Tabla 3.2 Resultados obtenidos para el EDFA en una porción de longitudes de onda de banda S.

Análisis de resultados

En cuanto a los resultados presentados en la Tabla 3.2 se tiene el siguiente análisis:

- Se probó que para las longitudes de onda menores a 1500 nm no existe amplificación tal como se registran los valores de 0 en la Tabla 3.2.
- Para las longitudes de onda entre 1500 y 1510 nm, se verificó que los valores de ganancia son bajos entre 4 y 11 dB con altas figuras de ruido en el orden de 7 a 8 dB.
- En cuanto a las longitudes de onda superiores a 1520 nm se registran valores de ganancia superiores a 20 dB con figuras de ruido alrededor de 6 dB, en efecto se corroboró que el amplificador EDFA operando en las longitudes de onda correspondientes a la banda S no cumple con las características detalladas en la parte teórica donde se especifica que el EDFA alcanza ganancias superiores a 30 dB y, figuras de ruido (NF) entre 5 y 7 dB.

3.1.1.1.2 Potencia de entrada al amplificador para el EDFA

Para analizar del comportamiento del amplificador EDFA en función de su potencia de entrada, se considera un rango de pequeña señal de -30 a 5 dBm, rango de potencia de la señal de entrada establecido en el Anexo C, manteniendo constantes los siguientes parámetros acorde a la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1530 a 1565 nm (banda C).
- Potencia de bombeo: 150 mW.
- Longitud de onda de bombeo: 980 nm.
- Configuración de bombeo: en este caso se considera como ejemplo la configuración de bombeo codireccional.

a) Ganancia del EDFA versus la longitud de onda a diferentes valores de potencia de entrada (-30, -20, -10 y -5 dBm)

En la Figura 3.3 se visualiza las curvas de ganancia obtenidas mediante la simulación del EDFA en sistemas monocanal a diferentes potencias de la señal de entrada y operando en las longitudes de onda de 1530 a 1565 nm.

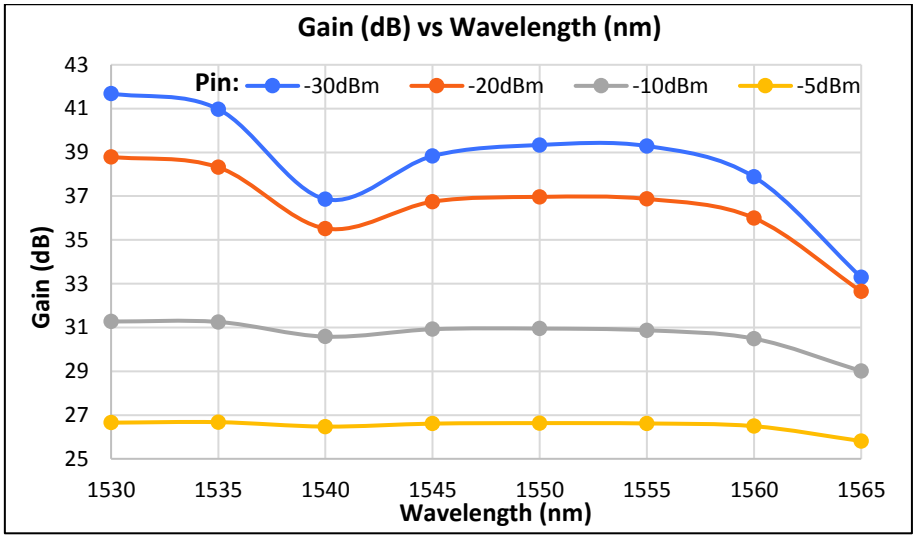


Figura 3.3 Ganancia del EDFA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada.

Análisis de resultados

Los resultados arrojados de la simulación en este caso se visualizan en la Figura 3.3, con éstos se establece el siguiente análisis comparativo:

- A medida que se va incrementando el valor de la potencia de entrada al amplificador, la ganancia toma valores más bajos, pero presentan una curva de ganancia más plana a lo largo de la longitud de onda en banda C. Por ejemplo, a una potencia de entrada baja de -30 dBm se obtiene una curva de ganancia no plana, cuyos valores varían desde 35 hasta 41 dB, en tanto que con una potencia de entrada de -5 dBm la curva de ganancia es casi plana en todo el rango de longitudes de onda y sus valores oscilan alrededor de los 26 dB.

  Estos resultados están de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.1, es decir que los valores de potencia de entrada están dentro del rango válido (-30 a 5dBm) de operación del amplificador EDFA.

b) Ganancia del EDFA versus potencia de salida a una longitud de onda de 1540 nm con bombeo codireccional

Se procedió a visualizar el comportamiento de un amplificador EDFA en función de su potencia de salida a una longitud de onda fija en banda C, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.4.

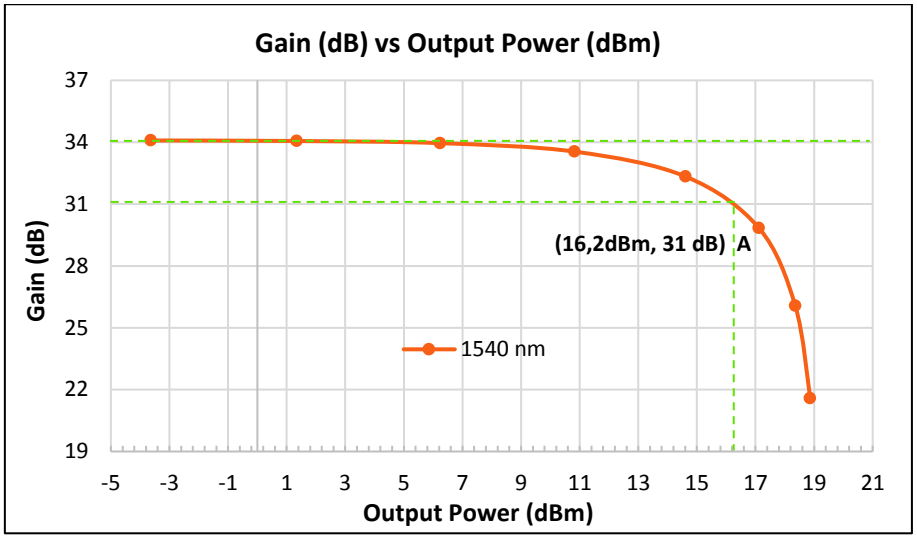


Figura 3.4 Ganancia del EDFA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1540 nm con bombeo codireccional.

Análisis de resultados

En base a los resultados de la Figura 3.4 se establece el siguiente análisis comparativo:

- Para el análisis de la potencia de salida de saturación de un amplificador EDFA, a manera de ejemplo se consideró una longitud de onda de 1540 nm; el punto A de la Figura 3.4 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, que corresponde a la potencia de salida en el punto de -3 dB; corroborando lo expuesto en la Tabla 3.1, la cual especifica que la potencia de saturación de salida del EDFA es superior a 10 dBm.

c) Figura de ruido y OSNR del EDFA versus la longitud de onda a diferentes potencias de entrada (-30, -20, -10 y -5 dBm)

A continuación, se visualizan las gráficas de los resultados desplegados de la simulación del EDFA en cuanto a los parámetros de figura de ruido (NF) y OSNR de la Figura 3.5.

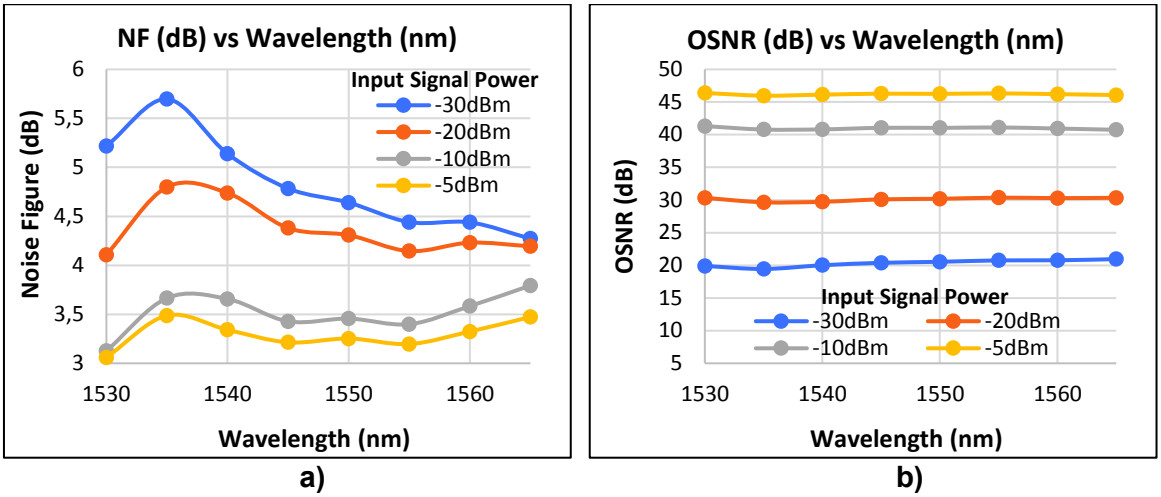


Figura 3.5 a) Figura de ruido y b) OSNR del EDFA en función de la longitud de onda en banda C a diferentes potencias de entrada.

Análisis de resultados:

Acorde a los resultados obtenidos y presentados en la Figura 3.5 se establece el siguiente análisis comparativo:

- Para la Figura 3.5a se verifica que a pesar de utilizar diferentes potencias de entrada, la figura de ruido (NF) no supera los valores de 5 a 7 dB los cuales fueron especificados en la Tabla 3.1, es decir, la NF máxima alcanzada es de 5,6 dB a una potencia de entrada de -30 dBm, lo que ratifica que los resultados de las simulaciones están dentro de los rangos de la NF establecidos para el amplificador EDFA en la parte teórica.
- En cuanto a la Figura 3.5b se observa que la OSNR es superior a 15 dB, siendo este parámetro un indicador de buen desempeño del amplificador EDFA, de esta manera se comprueba lo expuesto en la parte teórica (sección 1.3). Por ejemplo, para la señal de entrada de -20 dBm la OSNR es 30 dB.

De manera general para las simulaciones posteriores del EDFA en sistemas monocanal se consideró una señal de entrada de -20 dBm, valor intermedio del rango de potencias de entrada establecido para un amplificador comercial EDFA del Anexo C. Y además, como se observó en las gráficas de ganancia, NF y OSNR con este valor de potencia se cumple con los valores establecidos en la Tabla 3.1 y lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3.

3.1.1.1.3 Longitud de onda de bombeo para el EDFA

Para el presente análisis se considera variar las longitudes de onda de bombeo para el EDFA de acuerdo con los valores de 980 y 1480 nm, a fin de poder analizar su comportamiento en sistemas monocanal; para este caso se mantiene constante los siguientes parámetros que están acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1530 a 1565 nm (Banda C).
- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo: 150 mW.
- Configuración de bombeo: en este caso se considera como ejemplo la configuración de bombeo contradireccional.

a) Ganancia y figura de ruido del EDFA en banda C a longitudes de onda de bombeo de 980 y 1480nm con bombeo contradireccional

A continuación, considerando el rango de longitudes de onda de operación de 1530 a 1565 nm (Banda C), se procede a simular el comportamiento del EDFA utilizando las longitudes de onda de bombeo de 980 y 1480 nm.

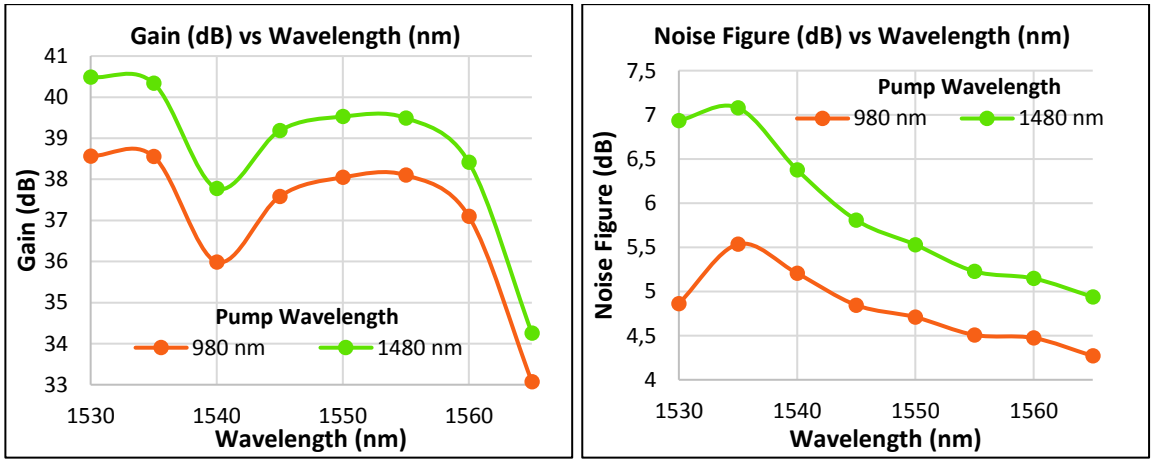


Figura 3.6 a) Ganancia y b) Figura de ruido del EDFA en banda C con longitudes de onda de bombeo de: a) 980 nm y b)1480 nm.

Análisis de resultados

Acorde a los resultados arrojados de la simulación y mostrados en la Figura 3.6 se establece el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.6a se puede apreciar que al utilizar 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); esto permitió validar lo expuesto en la parte teórica de la sección 1.3.3.2 que hace referencia que al emplear una fuente de bombeo a 1480 nm se consigue una mayor ganancia que con una fuente de bombeo de 980 nm.
- Así también en la Figura 3.6b se puede notar que la figura de ruido (NF) 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 superiores entre 5,5 y 7 dB, los cuales no superan los límites establecidos en la Tabla 3.1; así pues la simulación ratifica que los valores de NF obtenidos no superan a los establecidos entre 5 y 7 dB en el desarrollo teórico.

Una vez que se ha validado el comportamiento del EDFA con la longitud de onda de bombeo (980 y 1480 nm) para los sistemas monocanal. Para las posteriores simulaciones se utilizó la longitud de onda de bombeo de 980 nm debido a su característica de baja NF.

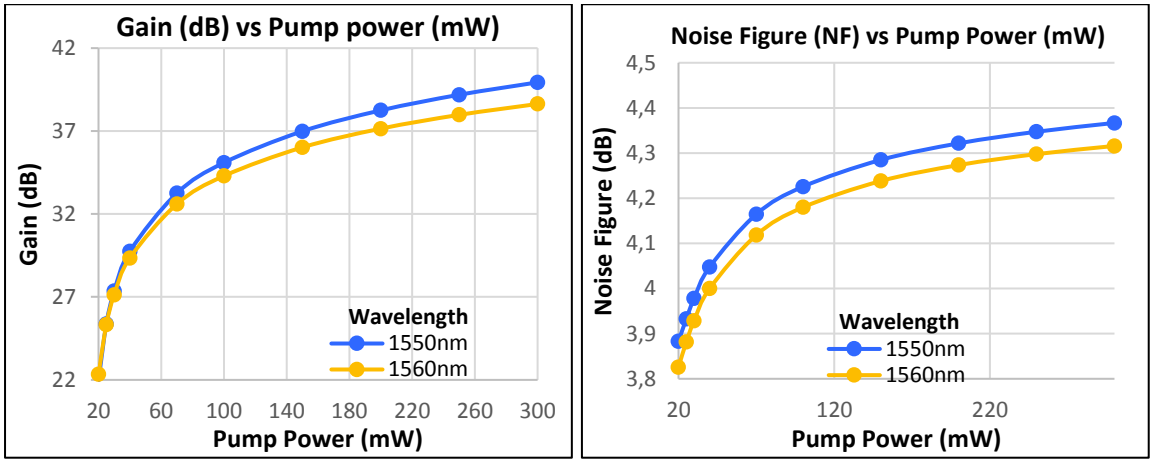
3.1.1.1.4 Potencia de bombeo para el EDFA

Por último, a fin de analizar el comportamiento del EDFA en función de la potencia de bombeo se toma para este parámetro un rango entre 20 y 300 mW, manteniendo constantes los siguientes parámetros acordes a la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1550 y 1560 nm (Banda C).
- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Longitud de onda de bombeo: 980 nm.
- Configuración de bombeo: para este análisis se considera la configuración de bombeo codireccional.

a) Ganancia del EDFA versus la potencia de bombeo con longitudes de onda de 1550 y 1560 nm

En la Figura 3.7 se muestra las curvas de ganancia y NF en función de la potencia de bombeo en las longitudes de onda de 1550 y 1560 nm.



a) b)

Figura 3.7 a) Ganancia y b) Figura de ruido en función de la potencia de bombeo con longitudes de onda de 1550 y 1560 nm.

Análisis de resultados

En base a los resultados de la Figura 3.7 mostrada previamente se establece el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.7a se aprecia que la relación entre la ganancia y la potencia de bombeo es creciente, puesto que conforme se va incrementando la potencia de bombeo la ganancia crece, esto se cumple para las longitudes de onda con las que se trabajó (1550 y 1560 nm), por lo que al utilizar potencias mayores a los 100 mW se obtienen ganancias superiores a los 30 dB, lo que valida lo expuesto en la parte teórica, la misma que detalla que la ganancia del amplificador EDFA es superior a los 30 dB.
- Así mismo, en la Figura 3.7b se observa que para las longitudes de onda de 1550 y 1560 nm conforme aumenta la potencia de bombeo, la NF también se incrementa desde 3,8 hasta 4,4 dB; valores que no superan los límites de NF establecidos en la Tabla 3.1, la cual especifica que los valores de NF se encuentran entre 5 y 7 dB.

3.1.1.2 Análisis comparativo del amplificador Raman en sistemas monocanal

Bajo el escenario de simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal desarrollado en la sección 2.4.2.1, se procede a contrastar los resultados obtenidos

mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla 3.1 y lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3.

3.1.1.2.1 Longitud de onda de operación para el amplificador Raman

A fin de verificar el comportamiento del amplificador Raman en sistemas monocanal, se varía el rango de longitudes de onda del mismo desde 1498 hasta 1615 nm, longitudes de onda que corresponden a las bandas de operación S, C y L.

Se mantiene constantes los siguientes parámetros que están acordes a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Sistema de bombeo: en cada una de las bandas de operación se eligen las siguientes longitudes de onda y potencias bombeo:

  Banda S: 1410 nm y 600 mW.

  Banda C: 1455 nm y 800 mW.

  Banda L: 1487 nm y 1 W.
- Configuración de bombeo: para este caso de estudio se considera la configuración de bombeo bidireccional; pues, como se visualizó en los resultados de la sección 2.4.2.1.3, que hace referencia al amplificador Raman en sistemas monocanal, las curvas de los parámetros de ganancia, NF y OSNR de las tres configuraciones de bombeo conservan la misma tendencia.

a) Ganancia del Raman versus la longitud de onda

A continuación, en la Figura 3.8 se muestran las curvas de ganancia obtenidas mediante simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal en sus respectivas bandas de operación.

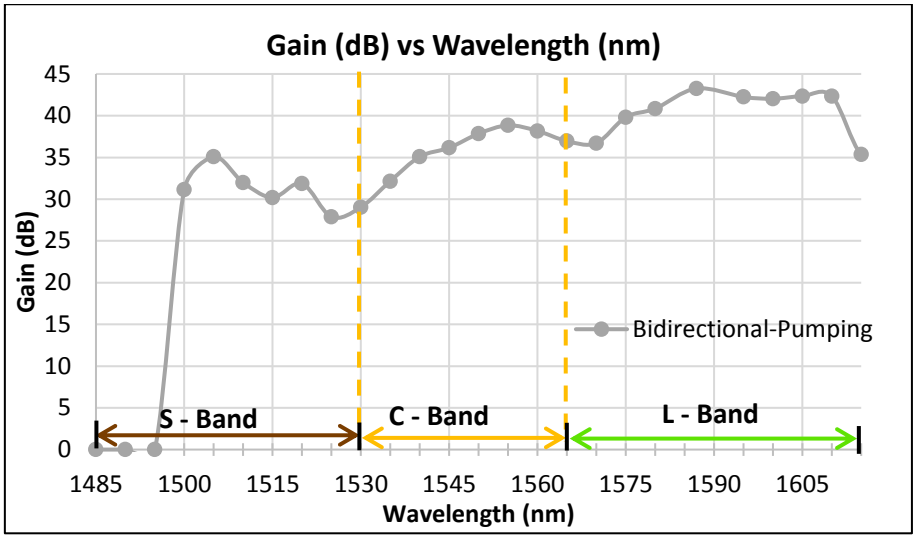


Figura 3.8 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda con bombeo bidireccional.

Análisis de resultados

Acorde a los resultados presentados en la Figura 3.8 se establece el siguiente análisis comparativo, a fin de corroborar el rango de longitudes de onda de operación del amplificador Raman:

- Se verifica que el rango de operación del amplificador Raman comprende las longitudes de onda desde 1497 nm (banda S) hasta 1615 nm (banda L).
- Se confirma 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:

  Banda S: con una fuente de bombeo a 1410 nm, se consigue la máxima ganancia de 35,1 dB en 1510 nm.

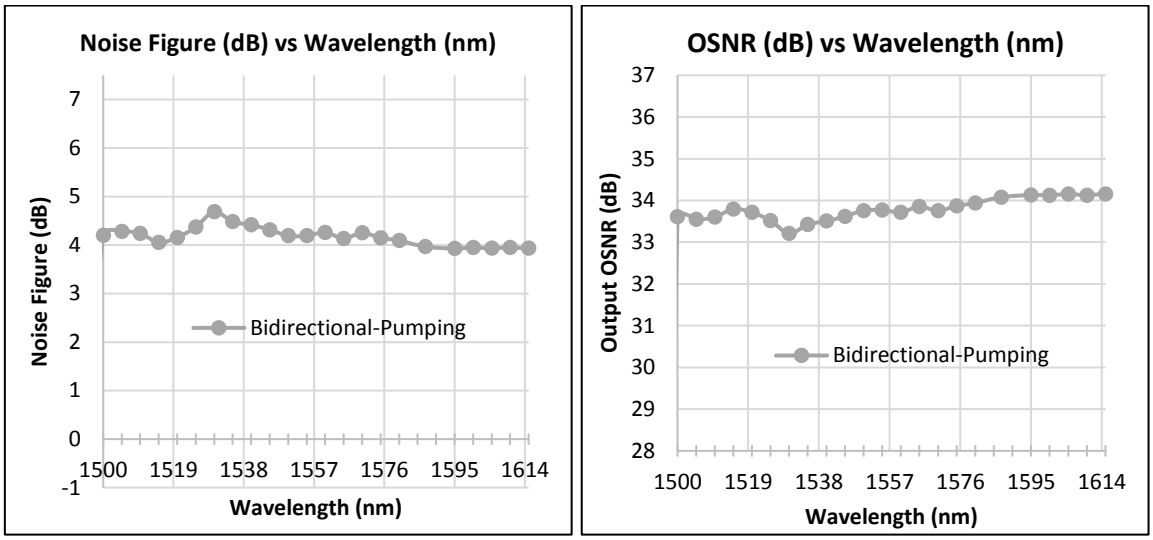
  Banda C: con una fuente de bombeo a 1455 nm, se consigue la máxima ganancia de 38,8 dB en 1555 nm.

  Banda L: con una fuente de bombeo a 1487 nm, se consigue la máxima ganancia de 43,2 dB en 1587 nm.

De esta manera se constata que el amplificador Raman opera en un espectro de frecuencias más amplio que el amplificador EDFA, tal como se indicó en el desarrollo teórico de la sección 1.3.4.1.

b) Figura de ruido y OSNR del Raman versus la longitud de onda con bombeo bidireccional

En la Figura 3.9 se presenta las curvas de figura de ruido (NF) y OSNR obtenidas mediante simulación del amplificador Raman en sistemas monocanal en sus respectivas bandas de operación.



a) **b)**

Figura 3.9 a) Figura de ruido y b) OSNR del Raman en función de la longitud de onda con bombeo bidireccional.

Análisis de resultados

En base a los resultados de la Figura 3.9 se realiza el siguiente análisis comparativo:

- Como se puede apreciar en la Figura 3.9a, la NF permanece en un rango cercano entre 4 y 4,8 dB, valores de NF que no son superiores a los especificados en la Tabla 3.1; por tanto se cumple con lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3.4.2 que hace referencia a las características del amplificador Raman.
- Así mismo, la Figura 3.9b indica que los valores de OSNR en todo el espectro de operación del amplificador son superiores a 33 dB, lo que caracteriza al amplificador Raman con un buen desempeño, garantizando en parte que en la recepción se reciba la señal sin inconvenientes; de esta manera se corrobora lo expuesto en el desarrollo teórico (sección 1.3).

3.1.1.2.2 Variación de potencia de entrada para el amplificador Raman

Para el análisis del comportamiento del amplificador Raman en función de su potencia de la señal de entrada al amplificador, se considera un rango de pequeña señal de -40 a 5 dBm (según lo especificado en el datasheet de un amplificador Raman comercial del Anexo D-2).

Se mantiene constantes los siguientes parámetros acordes a los establecidos de la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1530 a 1575 nm (banda C y porción de banda L).
- Potencia de bombeo: 600 mW.
- Longitud de onda de bombeo: 1455 nm.
- Configuración de bombeo: en este caso se considera como ejemplo la configuración de bombeo contradireccional.

a) Ganancia del Raman versus la longitud de onda a diferentes valores de potencia de entrada (-30, -20, 0 y 5 dBm)

En la Figura 3.10 se presenta la curva de ganancia en función de la longitud de onda de operación a diferentes valores de potencia de entrada al amplificador.

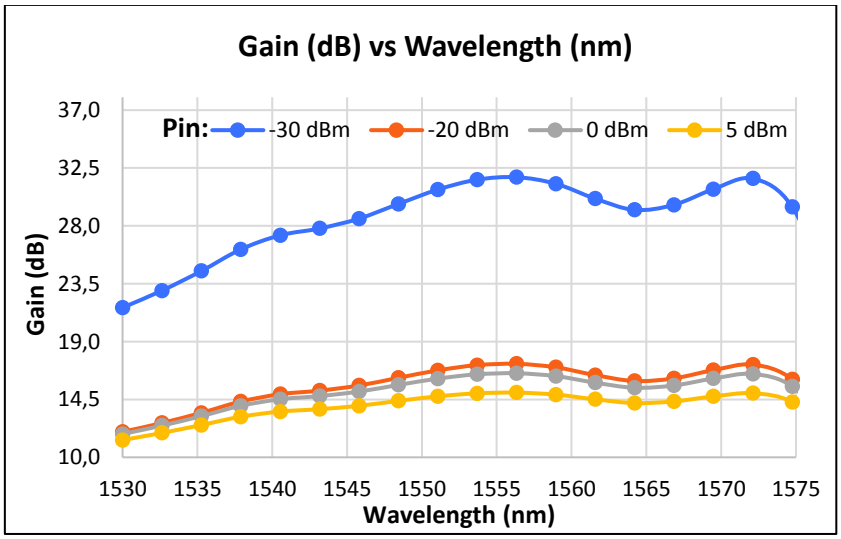


Figura 3.10 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada.

Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados de la Figura 3.10 se establece el siguiente análisis:

- A medida que se va incrementando el valor de la potencia de entrada al amplificador, la ganancia adquiere valores más bajos presentando una curva de ganancia más plana a lo largo de la longitud de onda en 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 a 5 dBm las ganancias en todo el rango de longitudes de onda son de 13 dB aproximadamente.

  Estos resultados están de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.1, es decir que los valores de potencia de entrada están dentro del rango válido (-40 a 5 dBm) de operación del amplificador Raman.

b) Ganancia del Raman versus potencia de salida a una longitud de onda de 1587 nm con bombeo contradireccional

Se procedió a visualizar el comportamiento de un amplificador Raman en función de su potencia de salida a una longitud de onda fija en banda C, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.11.

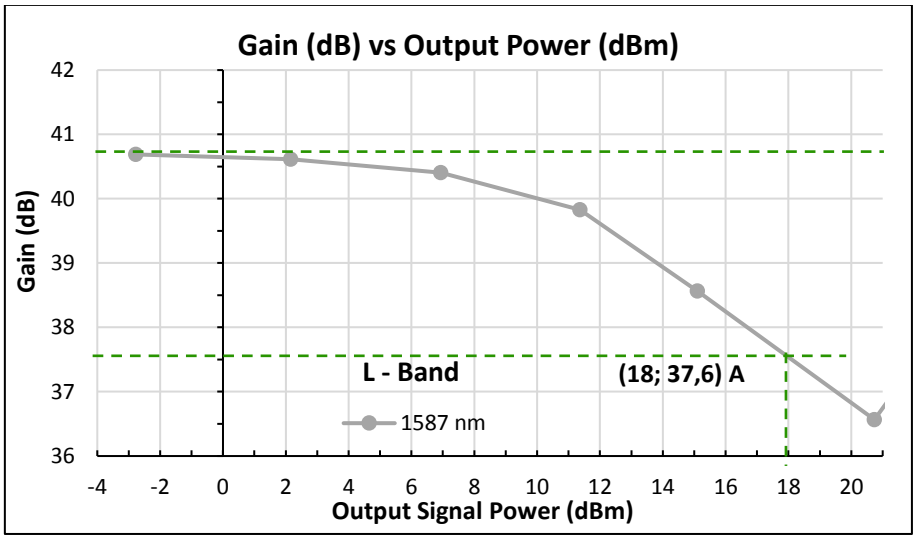


Figura 3.11 Ganancia del Raman en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1587 nm con bombeo contradireccional.

Análisis de resultados

Con respecto a los resultados arrojados de la Figura 3.11 se establece el siguiente análisis comparativo:

- 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; el punto A marca 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 (potencia de salida en el punto de -3 dB); que permitió corroborar lo expuesto en la Tabla 3.1, la cual especifica que la potencia de saturación de salida del Raman es superior a 15 dBm.

c) Figura de ruido y OSNR del Raman versus la longitud de onda a diferentes potencias de entrada (-30 y 5 dBm).

A continuación, se visualizan las gráficas de los resultados desplegados de la simulación del amplificador Raman en cuanto a los parámetros de figura de ruido (NF) y OSNR en la Figura 3.12.

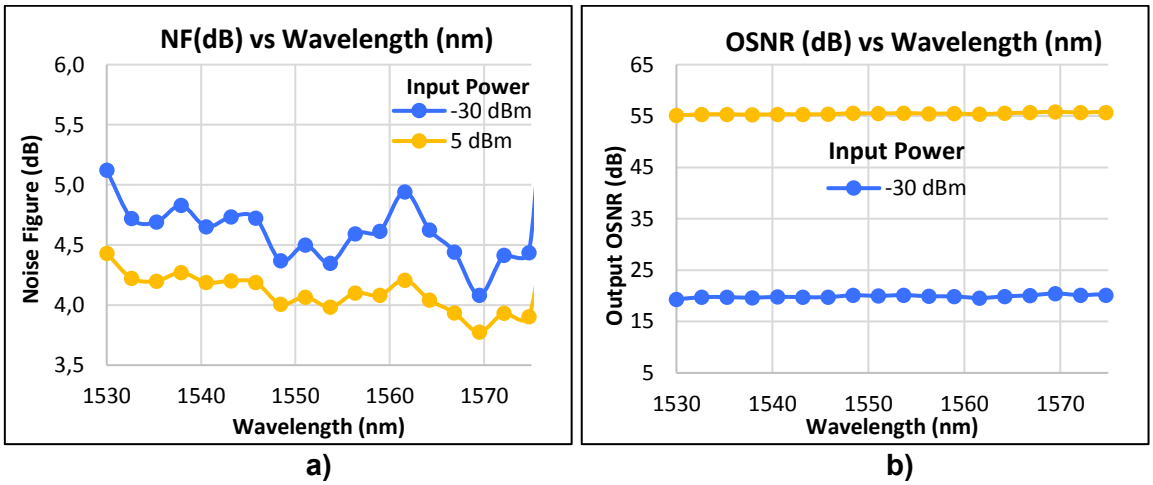


Figura 3.12 a) Figura de ruido y b) OSNR del Raman en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada.

Análisis de resultados

En base a los resultados obtenidos de la Figura 3.12 se establece el siguiente análisis comparativo:

- Para la Figura 3.12a se verifica que a pesar de utilizar diferentes potencias de entrada, la figura de ruido (NF) no supera los valores establecidos en la Tabla 3.1, es decir, la NF máxima alcanzada es de 5,1 dB a una potencia de entrada de -30 dBm. Además, se puede apreciar que mientras la potencia de entrada al amplificador es mayor, la NF disminuye; así pues, bajo el criterio de NF también se puede elegir el nivel de potencia adecuada a la entrada del amplificador.
- En cuanto a la Figura 3.12b se verifica que la OSNR es proporcional a la potencia de entrada, por lo que a medida que va aumentando la potencia de entrada el nivel de OSNR también lo hace. Así, para una señal de entrada de -30 dBm la OSNR es de 20 dB y para una potencia de entrada de 5 dBm la OSNR es alrededor de 55 dB; lo que ratifica lo expuesto en la sección 1.3 que menciona que una ONSR mayor a 15 dB indica que el sistema de comunicaciones ópticas es de buena calidad.

De manera general para las posteriores simulaciones del Raman en sistemas monocanal se consideró una señal de entrada de -20 dBm, valor intermedio del rango de potencias de entrada establecido para un amplificador comercial Raman del Anexo D. Adicionalmente, como se observó en las gráficas de ganancia, NF y OSNR se cumple con los valores establecidos en la Tabla 3.1 y lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3.

3.1.1.2.3 Sistema de bombeo para el Raman

Para el análisis del comportamiento del amplificador Raman en función del sistema de bombeo se considera variar la longitud de onda de bombeo y la potencia de bombeo; manteniendo constantes los siguientes parámetros que están acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1500 a 1600 nm (porción de bandas S, C y L)

- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Configuración de bombeo: en este caso se considera como ejemplo la configuración de bombeo codireccional.

a) Ganancia del Raman en función de la potencia de bombeo

A continuación, se muestra en la Figura 3.13 la curva de ganancia en función de la potencia de bombeo comprendiendo valores de potencias entre 400 y 1200 mW, a una determinada longitud de onda de 1587 nm perteneciente al rango válido de operación de longitudes de onda del amplificador Raman.

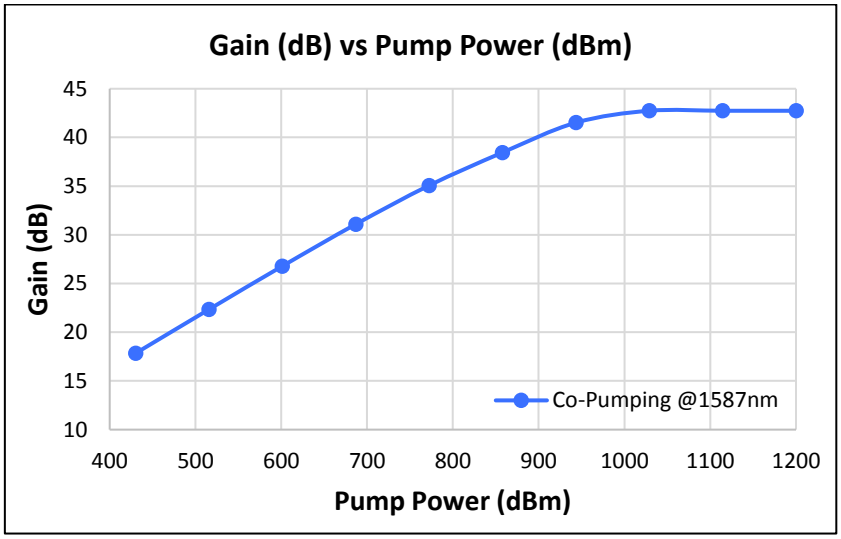


Figura 3.13 Ganancia del Raman en función de la potencia de bombeo a una longitud de onda de 1587 nm.

Análisis de resultados

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Figura 3.13 se establece el siguiente análisis comparativo:

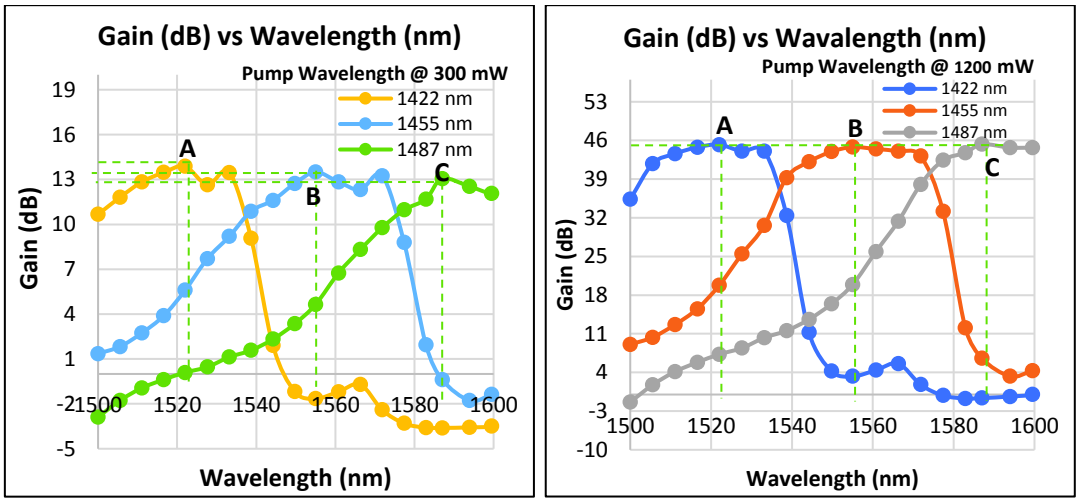
- Se observa que inicialmente para potencias de bombeo de hasta 800 mW hay un considerable aumento en la ganancia de 15 a 40 dB, pero más allá de este valor de potencia de bombeo la ganancia aumenta a una tasa muy pequeña (alrededor de 42 dB); por lo que, a manera de ejemplo, en las siguientes simulaciones se ha tomado potencias de bombeo de 300 y 1200 mW.

b) Ganancia del Raman versus la longitud de onda con potencias de bombeo de 300 y 1200 mW a diferentes longitudes de onda de bombeo

Para este caso de simulación se ha considerado las siguientes longitudes de onda de bombeo, las mismas que se encuentran a 100 nm bajo la longitud de onda en sus respectivas bandas de operación:

- Banda S: 1422 nm.
- Banda C: 1455 nm.
- Banda L: 1487 nm.

En la Figura 3.14 se muestra las curvas de ganancia en función de la longitud de onda de operación a diferentes potencias de bombeo de 300 y 1200 mW.



a) b)

Figura 3.14 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda con diferentes potencias y longitudes de onda de bombeo.

Análisis de resultados:

En base a los resultados de la Figura 3.14 se visualiza que la máxima ganancia del amplificador Raman en las respectivas bandas de operación, ocurre a 100 nm por encima de la longitud de onda de bombeo; que permitió confirmar lo expuesto en el desarrollo teórico (sección 1.3.4.1) y que por tanto se establece el siguiente análisis comparativo:

- Como se puede observar en las Figura 3.14a y b, con potencias de bombeo de 300 y 1200mW respectivamente, existe amplificación siempre y cuando se utilice una longitud de onda de bombeo adecuada; por ejemplo:

Punto A: representa la máxima ganancia a una longitud de onda de 1522 nm, generando amplificación únicamente en banda S más no en las bandas C y L.

Punto B: representa la máxima ganancia a una longitud de onda de 1555 nm, generando amplificación únicamente en banda C más no en las bandas S y L.

Punto C: representa la máxima ganancia a una longitud de onda de 1587 nm, generando amplificación únicamente en banda L más no en las bandas S y C.

Finalmente, se comprueba 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 en la que se desee implementar el sistema comunicaciones ópticas. Además, la elección de la potencia de bombeo deberá estar acorde a los requerimientos del sistema óptico ya que de este valor de potencia depende el nivel de ganancia alcanzado. Así, con una potencia de bombeo de 300 mW se obtiene ganancias menores (alrededor de 14 dB) mientras que con una potencia de bombeo de 1200 mW las ganancias son superiores (alrededor de 45 dB).

3.1.1.3 Análisis comparativo del amplificador SOA en sistemas monocanal

Bajo el escenario de simulación del SOA en sistemas monocanal desarrollado en la sección 2.4.3.1, se procede a contrastar los resultados obtenidos mediante simulación con los parámetros establecidos en la Tabla 3.1 y el desarrollo teórico de la sección 1.3.

3.1.1.3.1 Longitud de onda de operación para el SOA

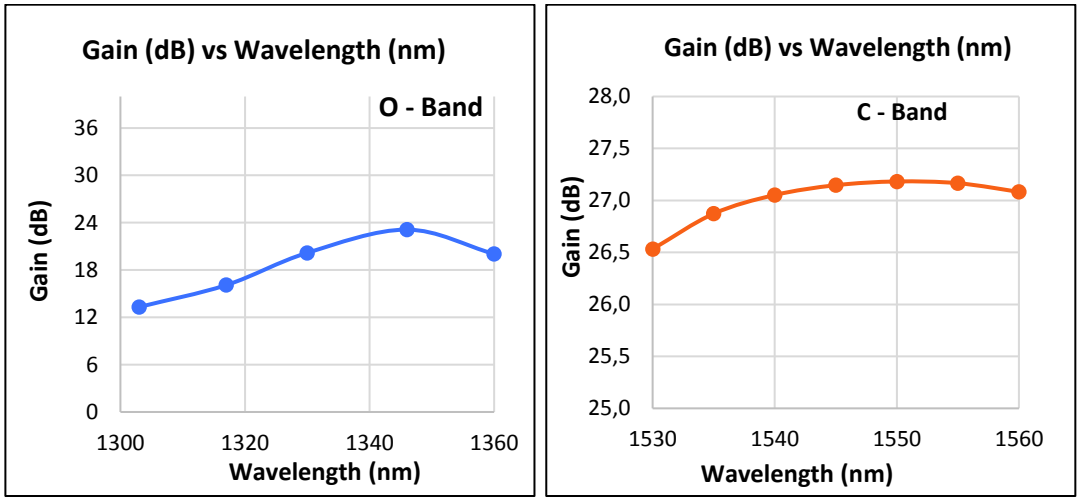
El rango de operación del SOA de acuerdo con el desarrollo teórico comprende las bandas O y C (sección 1.3.5), por lo que para analizar el comportamiento del SOA en sistemas monocanal, se varía la longitud de onda de operación de 1300 a 1360 nm (banda O) y de 1530 a 1560 nm (banda C), manteniendo constantes los siguientes parámetros acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Potencia de entrada: -14 dBm.

- Corriente aplicada: 500 mA.

a) Ganancia del SOA versus la longitud de onda

A continuación, en la Figura 3.15 se presenta las curvas de ganancia en función de las longitudes de onda de operación que comprenden las bandas O y C.



a) b)

Figura 3.15 Ganancia del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C.

Análisis de resultados

Acorde a los resultados arrojados de la Figura 3.15 se establece el siguiente análisis comparativo a fin de comprobar el rango de longitudes de onda de operación del SOA:

- En las Figura 3.15a y b, se cumple que en las bandas O y C la ganancia es mayor a 20 dB, verificando lo expuesto en la Tabla 3.1, la cual muestra que la ganancia del SOA es superior a 15dB.
- Se puede verificar que con una misma corriente aplicada (500mA), existe amplificación tanto en banda O como en banda C. Así, en la Figura 3.15a para las longitudes de onda entre 1300 a 1360 nm se observa que la ganancia está en un rango cercano 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. Entonces se comprueba lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3.5.2 que hace referencia a las características principales de un amplificador SOA.

b) Figura de ruido del SOA versus la longitud de onda

En la Figura 3.16 se muestra las curvas de figura de ruido (NF) obtenidas mediante simulación del amplificador SOA en sistemas monocanal en sus respectivas bandas de operación (banda O y C).

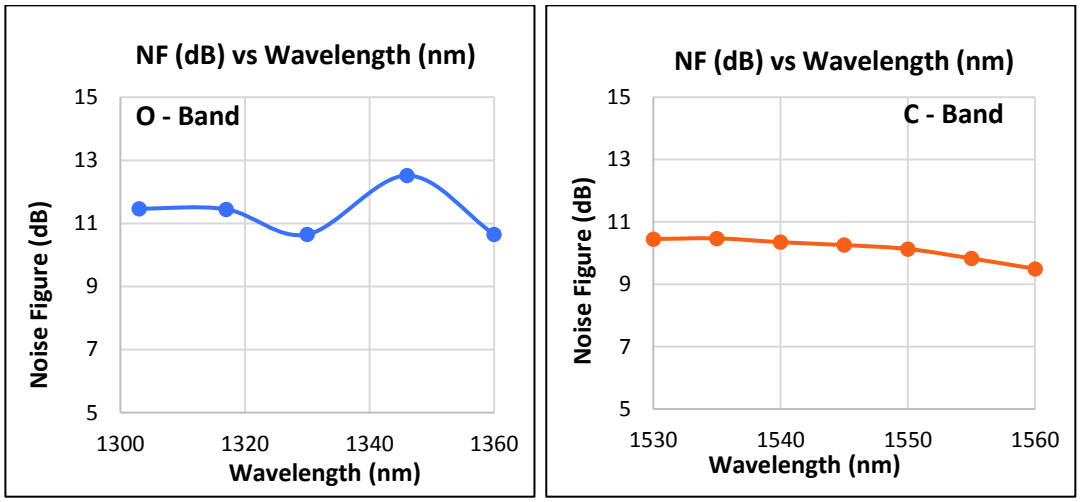


Figura 3.16 Figura de ruido del SOA en función de la longitud de onda en a) banda O y b) banda C.

Análisis de resultados

Los resultados alcanzados de la simulación para este caso se visualizan en la Figura 3.16, con éstos se establece el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.16a para banda O se alcanza un valor máximo de NF de aproximadamente 13 dB; mientras que en la Figura 3.16b para banda C el valor de la NF no supera los 11 dB; ratificando lo expuesto en la Tabla 3.1, que hace referencia a los valores de NF en las bandas O (12 a 14 dB) y C (7 a 11,5 dB).

c) OSNR del SOA versus la longitud de onda

Se procedió a visualizar la OSNR en función de las longitudes de onda correspondientes a las bandas de operación O y C en la Figura 3.17.

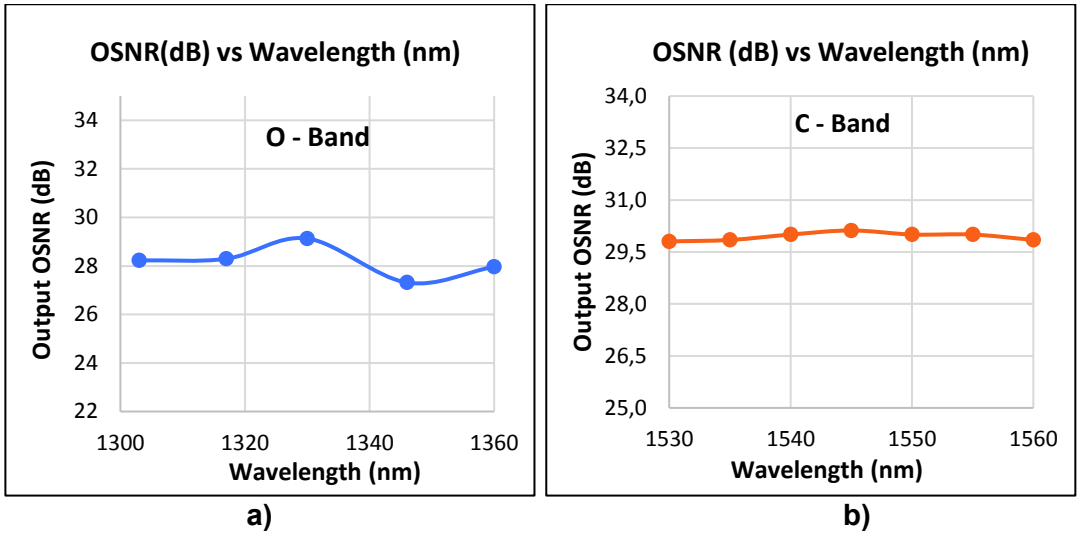


Figura 3.17 OSNR del SOA en función de la longitud de onda en banda a) O y b) C.

Análisis de resultados

En base a los resultados obtenidos en la Figura 3.17 se establece el siguiente análisis comparativo:

- En las Figura 3.17a y b se observa que la OSNR es superior a 15 dB, siendo este parámetro un indicador de buen desempeño del amplificador SOA, de esta manera se comprueba lo expuesto en la parte teórica (sección 1.3).

d) SOA en la banda de operación S comprendiendo las longitudes de onda entre 1460 y 1520 nm; y, en banda L con un rango entre 1565 y 1625 nm

Adicionalmente, se probó al amplificador SOA en las longitudes de onda correspondientes a las bandas S y L, obteniendo las siguientes observaciones:

- Para la banda S a 10 Gbps, comprendiendo las longitudes de onda entre 1460 y 1520 mm, se comprueba que existe amplificación; sin embargo, no se garantiza la calidad del sistema de transmisión ya que se obtiene un BER de 10^{-3}, tal como se resalta en la Tabla 3.3 (color amarillo).
- Para la banda L a 10 Gbps, comprendiendo las longitudes de onda entre 1565 y 1625 nm, no se tiene amplificación en ninguna longitud de onda, tal como se resalta en la Tabla 3.3 (color verde).

	Wavelength (nm)	Current (mA)	Gain (dB)	NF (dB)	Output: OSNR (dB)	Output: Power (dBm)	Min BER
1	1460	500	28,5357	14,983	19,9369	5,7618	7,60E-03
2	1480		31,0093	13,3283	21,6506	8,23537	3,23E-03
3	1500		29,7544	12,3711	22,6663	6,98046	4,48E-04
4	1520		25,9475	12,3937	22,5726	3,17355	2,65E-04
5	1565	500	0	0	0	0	6,76E-03
6	1587		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

Tabla 3.3 Resultados obtenidos para el SOA en una porción de longitudes de onda en las bandas S y L.

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. Así, la banda de operación C para los amplificadores de fibra EDFA, Raman y de semiconductor SOA se convierte en la banda común en este estudio; lo que no sucede con la banda O, cuyas longitudes de onda no son accesibles para los amplificadores de fibra ya mencionados.

3.1.1.3.2 Potencia de entrada al amplificador para el SOA

Para analizar del comportamiento del amplificador SOA en función de su potencia de entrada, se considera un rango de pequeña señal de -13 a 3 dBm, rango de potencia de la señal de entrada establecido en el Anexo E, manteniendo constantes los siguientes parámetros acordes a la Tabla 3.1:

- Longitud de onda: 1530 a 1560 nm (porción de banda C)
- Corriente aplicada: 500 mA.
- Velocidad de transmisión: 10 Gbps.

a) Ganancia del SOA versus la longitud de onda a diferentes potencias de entrada (-40, -13, 0 y 3 dBm)

En la Figura 3.18 se presentan las curvas de ganancia obtenidas mediante simulación del amplificador SOA en sistemas monocanal a diferentes potencias de la señal de entrada y operando en las longitudes de onda entre 1530 y 1560 nm.

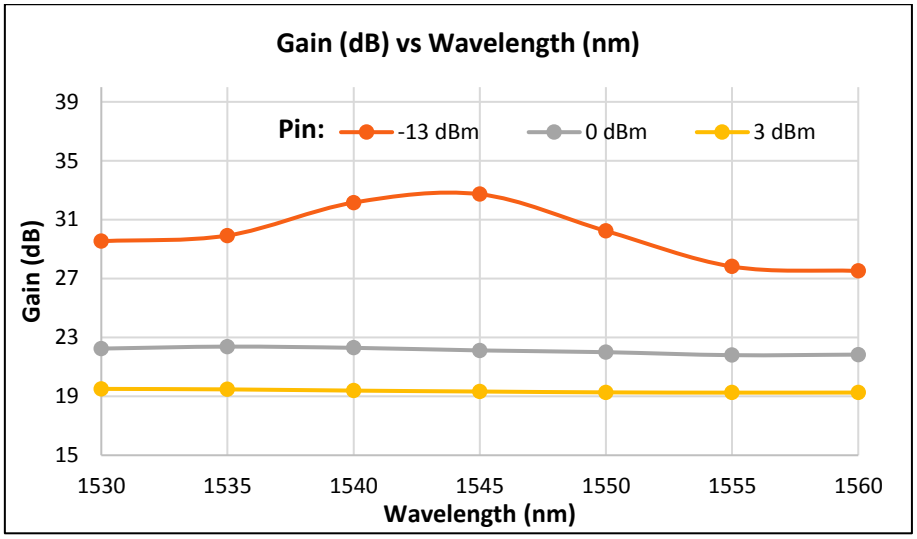


Figura 3.18 Ganancia del SOA en función de la longitud de onda a diferentes potencias de entrada.

Análisis de resultados

Acorde a los resultados arrojados de la Figura 3.18 se establece el siguiente análisis comparativo:

- A medida que se va incrementando el valor de la potencia de entrada, la ganancia adquiere valores más bajos y presentan una curva de ganancia 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, a diferencia de una potencia de entrada de 3 dBm, donde las ganancias en todo el rango de longitudes de onda son de 19 dB aproximadamente.

  Estos resultados están de acuerdo con lo expuesto en la Tabla 3.1, es decir que los valores de potencia de entrada están dentro del rango válido (-13 a 3 dBm) de operación del amplificador SOA.

b) Ganancia del SOA versus potencia de salida a una longitud de onda de 1550 nm

A continuación, se muestra la Figura 3.19 correspondiente a la curva de ganancia en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1550 nm que está dentro del rango de operación del amplificador SOA.

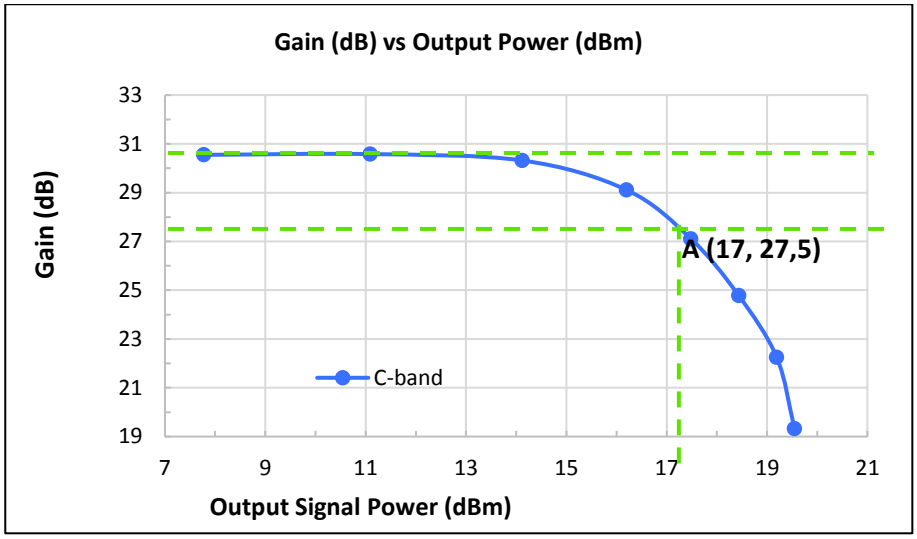


Figura 3.19 Ganancia del SOA en función de la potencia de salida a una longitud de onda de 1550 nm.

Análisis de resultados

En base a los resultados alcanzados de la Figura 3.19 se establece el siguiente análisis comparativo:

- 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; 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 (potencia de salida en el punto de -3 dB); que permitió corroborar lo expuesto en la Tabla 3.1, la cual especifica que la potencia de saturación de salida del SOA es superior a 14 dBm.

3.1.1.3.3 Corriente de bombeo para el SOA

Para el análisis del comportamiento del amplificador SOA en función de la corriente aplicada se considera un rango para este parámetro entre 100 mA y 1 A, manteniendo constantes los siguientes parámetros que están acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Longitud de onda de operación: 1330 nm (banda O) y 1550 nm (banda C).
- Potencia de entrada: -13 dBm.

- Velocidad de transmisión: 10 Gbps.

a) Ganancia del SOA versus la corriente inyectada en bandas O y C

Se procedió a visualizar el comportamiento de un amplificador SOA en función de la corriente de bombeo en sus respectivas bandas de operación O y C, cuyos resultados se muestran en la Figura 3.20.

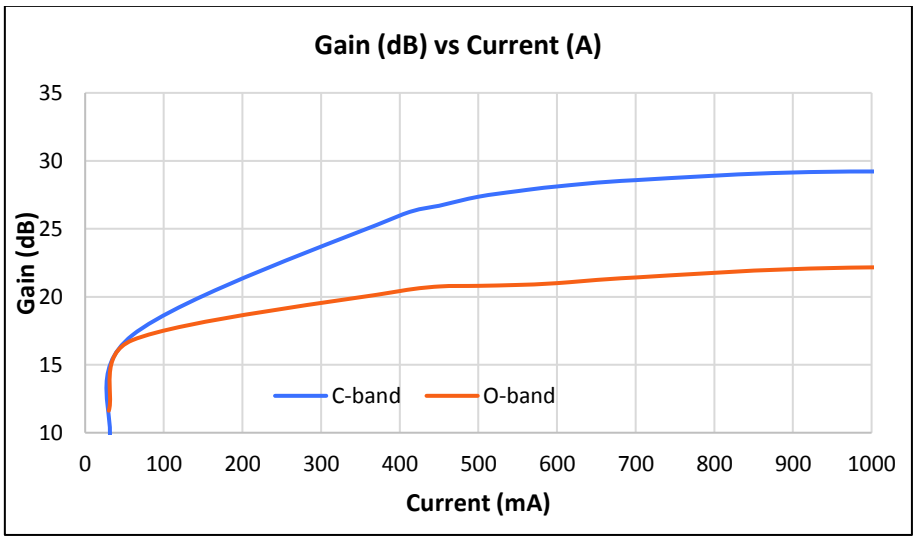


Figura 3.20 Ganancia de SOA en función de la corriente aplicada en bandas O y C.

Análisis de resultados

En cuanto a los resultados presentados en la Figura 3.20, 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 de corriente la ganancia aumenta a una tasa muy pequeña; cumpliendo así con las especificaciones dadas en la Tabla 3.1, en la cual se establece que la ganancia para un amplificador SOA es superior a los 15 dB.

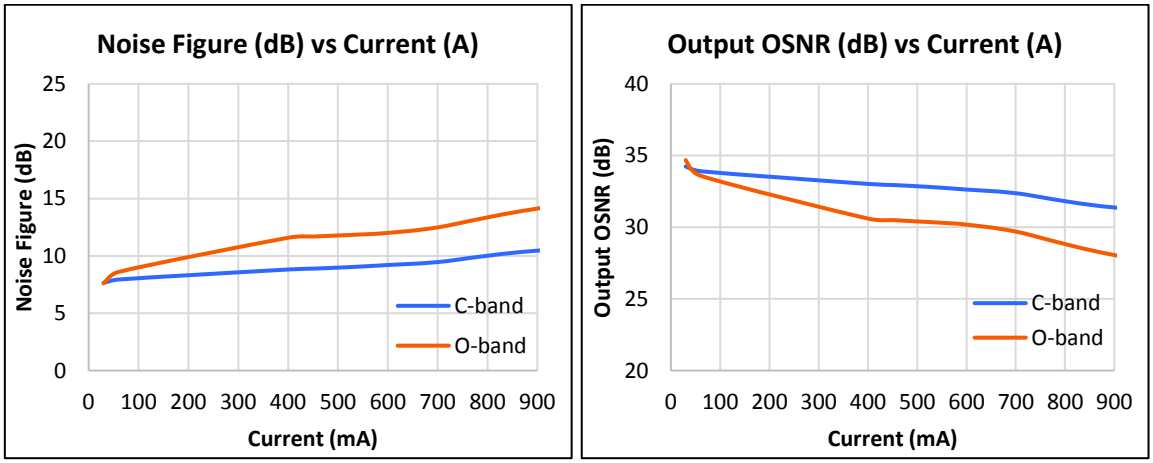
b) Figura de ruido y OSNR del SOA versus la corriente en bandas O y C

Finalmente, basándose en los resultados de la Figura 3.21 se realiza el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.21a, se verifica que conforme aumenta la corriente inyectada al SOA, la figura de ruido también lo hace, tanto en banda O como en banda C, pero no superan los valores de NF establecidos en la Tabla 3.1, la cual

especifica que los valores de NF son de 7 a 11,5 para banda C y de 12 a 14 para banda O.

- Así también, en la Figura 3.21b la OSNR va disminuyendo conforme se incrementa la corriente aplicada; cabe señalar que estos valores de OSNR caracterizan que el amplificador SOA presente un buen desempeño, corroborando lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3, donde se indica que los valores de OSNR son superiores a 10 dB.



a) b)

Figura 3.21 a) Figura de ruido y b) OSNR para el SOA en función de la corriente inyectada en las bandas O y C.

3.1.2 COMPARACIÓN DEL ESCENARIO DE SIMULACIÓN II: EDFA Y RAMAN EN SISTEMAS MULTICANAL WDM

El escenario de simulación II se emplea para estudiar el comportamiento de los amplificadores ópticos EDFA y Raman en sistemas multicanal WDM (el amplificador SOA no se analiza ya que como se indicó en el capítulo anterior de la sección 2.4.3.2.3 introducen alto *crosstalk* entre canales al emplearlo en este tipo de sistemas).

De esta forma, para establecer las comparaciones se toma en consideración los siguientes parámetros como principales:

- Espaciamiento entre canales ópticos: para la realización de las simulaciones de los amplificadores ópticos en sistemas multicanal, se consideró diferentes espaciamientos entre canales, los cuales son especificados por la ITU-T

G.694.1 (*Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid*) [53], ver Tabla 3.4.

	Spacing Wavelength
1	0,05 nm
2	0,1 nm
3	0,2 nm
4	0,4 nm
5	0,8 nm

Tabla 3.4 Espaciamiento entre canales ópticos utilizados en las diferentes simulaciones de los amplificadores ópticos en sistemas muticanal (DWDM).

- Múltiples fuentes de bombeo: con la finalidad de analizar el comportamiento de los amplificadores EDFA y Raman bajo el uso de una o varias fuentes de bombeo.

3.1.2.1 Análisis comparativo del amplificador EDFA en sistemas multicanal

Bajo el escenario de simulación del EDFA en sistemas multicanal desarrollado en la sección 2.4.1.2, se analizan los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas.

3.1.2.1.1 Espaciamiento entre canales ópticos

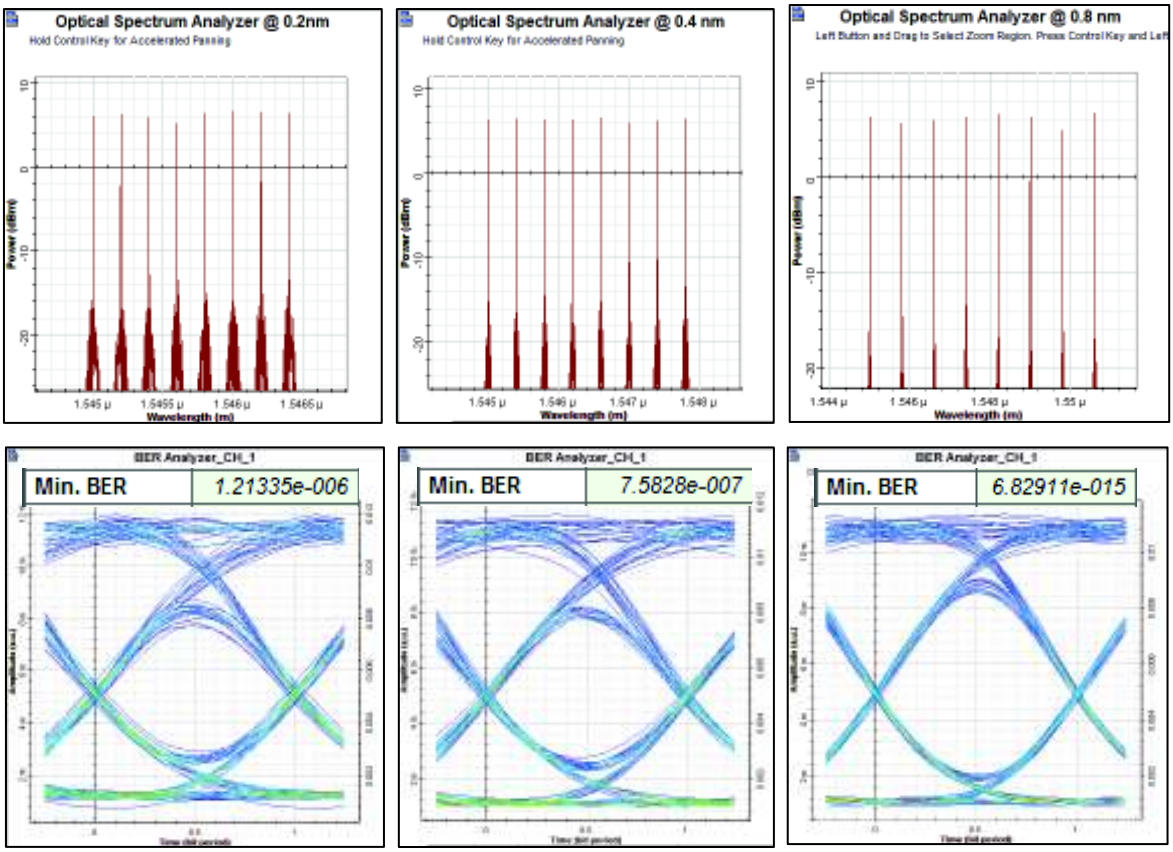
Para el análisis del comportamiento del EDFA en sistemas multicanal, se trabaja con espaciamientos entre canales ópticos de 0,2; 0,4; y 0,8 nm, manteniendo constantes los siguientes parámetros que están acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

- Número de canales transmitidos: 8.
- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo: 150 mW.
- Longitud de onda de bombeo: 980 nm.
- Configuración de bombeo: contradireccional.
- Longitudes de onda central de cada canal: en la Tabla 3.5 se remarcan los valores de longitud de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema WDM de 8 canales con una sola fuente de bombeo.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545,0	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547,0
4	1547,0	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549,0	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551,0

Tabla 3.5 Valores de la longitud de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema DWDM de 8 canales y una sola fuente de bombeo.

a) Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del EDFA en un sistema DWDM de 8 canales y espaciamientos entre canal de 0,2; 0,4 y 0,8 nm



a) **b)** **c)**

Figura 3.22 Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del EDFA en un sistema DWDM de 8 canales con espaciamientos entre canal de: a) 0,2 nm; b) 0,4 nm y c) 0,8 nm.

En cuanto a los resultados obtenidos mediante simulación del EDFA en sistemas multicanal (DWDM) de la Figura 3.22 mostrada a continuación, se establece el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.22c con un espaciamiento entre canales ópticos de 0,8 nm se obtiene un BER de 10^{-15}, a diferencia de la Figura 3.22a que con un espaciamiento de 0,2 nm el BER es de 10^{-6}; lo que implica que con un espaciamiento menor el receptor no logra discriminar la señal de salida, conllevando a la aparición de errores durante la transmisión.

De manera general para las simulaciones del EDFA en sistemas multicanal se consideró un espaciamiento entre canales ópticos de 0,8 nm; garantizando el BER y la calidad del sistema óptico.

3.1.2.1.2 Múltiples fuentes de bombeo

Para el análisis del comportamiento del EDFA en sistemas multicanal se trabaja con una y múltiples fuentes de bombeo, manteniendo constantes los siguientes parámetros acorde a la Tabla 3.1:

- Longitudes de onda central de cada canal: en la Tabla 3.6 se remarcan los valores de longitudes de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema DWDM de 16 canales con múltiples fuentes de bombeo.

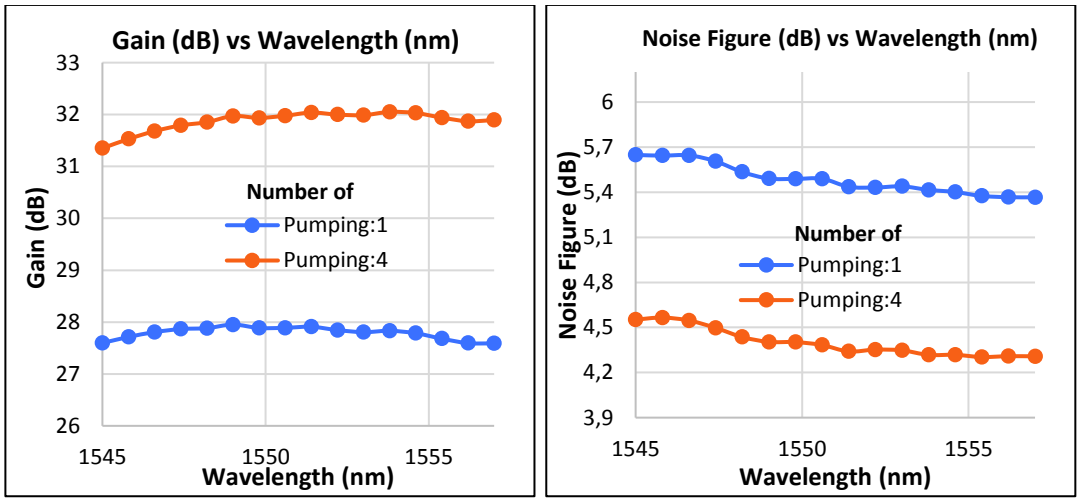
CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547
4	1547	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551
9	1551	1551,4	1551,8
10	1551,8	1552,2	1552,6
11	1552,6	1553	1553,4
12	1553,4	1553,8	1554,2
13	1554,2	1554,6	1555
14	1555	1555,4	1555,8
15	1555,8	1556,2	1556,6
16	1556,6	1557	1557,4

Tabla 3.6 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el EDFA en un sistema DWDM de 16 canales con múltiples fuentes de bombeo.

- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo: 100 mW por cada fuente de bombeo.
- Número de fuentes de bombeo: 1 y 4.
- Longitud de onda de bombeo: 980 y 1480 nm.
- Configuración de bombeo: contradireccional.

a) Ganancia y figura de ruido del EDFA versus la longitud de onda central con 1 y 4 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 16 canales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de ganancia y figura de ruido (NF) en función de las longitudes de onda entre 1545 y 1557 nm en la Figura 3.23.



a) **b)**

Figura 3.23 a) Ganancia y b) Figura de ruido en función de longitud de onda central con 1 y 4 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 16 canales.

Análisis de resultados

Con respecto a los resultados obtenidos de la Figura 3.23 se realiza el siguiente análisis comparativo:

- En la Figura 3.23a se muestra que para un sistema DWDM de 16 canales, la curva de ganancia con un único bombeo (a 980 nm) presenta una planitud en todos los canales ópticos. Cuando se utiliza 4 fuentes de bombeo (2 a 980 nm y 2 a 1480 nm) se eleva el nivel de ganancia a 32 dB aproximadamente para todos los canales transmitidos.

- Por otra parte, en la Figura 3.23b se observa que la NF de cada uno de los canales es menor cuando se emplea múltiples fuentes de bombeo. Cabe señalar que los valores de NF obtenidos en estos sistemas no superan los límites de NF establecidos en la Tabla 3.1.

Bajo el análisis realizado se comprueba que el EDFA presenta un buen desempeño en sistemas DWDM con múltiples fuentes de bombeo, corroborando lo expuesto en la sección 1.3.3.3 que hace referencia a las ventajas del amplificador EDFA en sistemas multicanal.

3.1.2.2 Análisis comparativo del amplificador Raman en sistemas multicanal

Bajo el escenario de simulación del Raman en sistemas multicanal desarrollado en la sección 2.4.2.2, se analizan los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones realizadas.

3.1.2.2.1 Espaciamiento entre canales ópticos

Para el análisis del comportamiento del Raman en sistemas multicanal, se trabaja con espaciamientos entre canales ópticos de 0,2; 0,4; y 0,8 nm, manteniendo constantes los siguientes parámetros que están acorde a los establecidos en la Tabla 3.1:

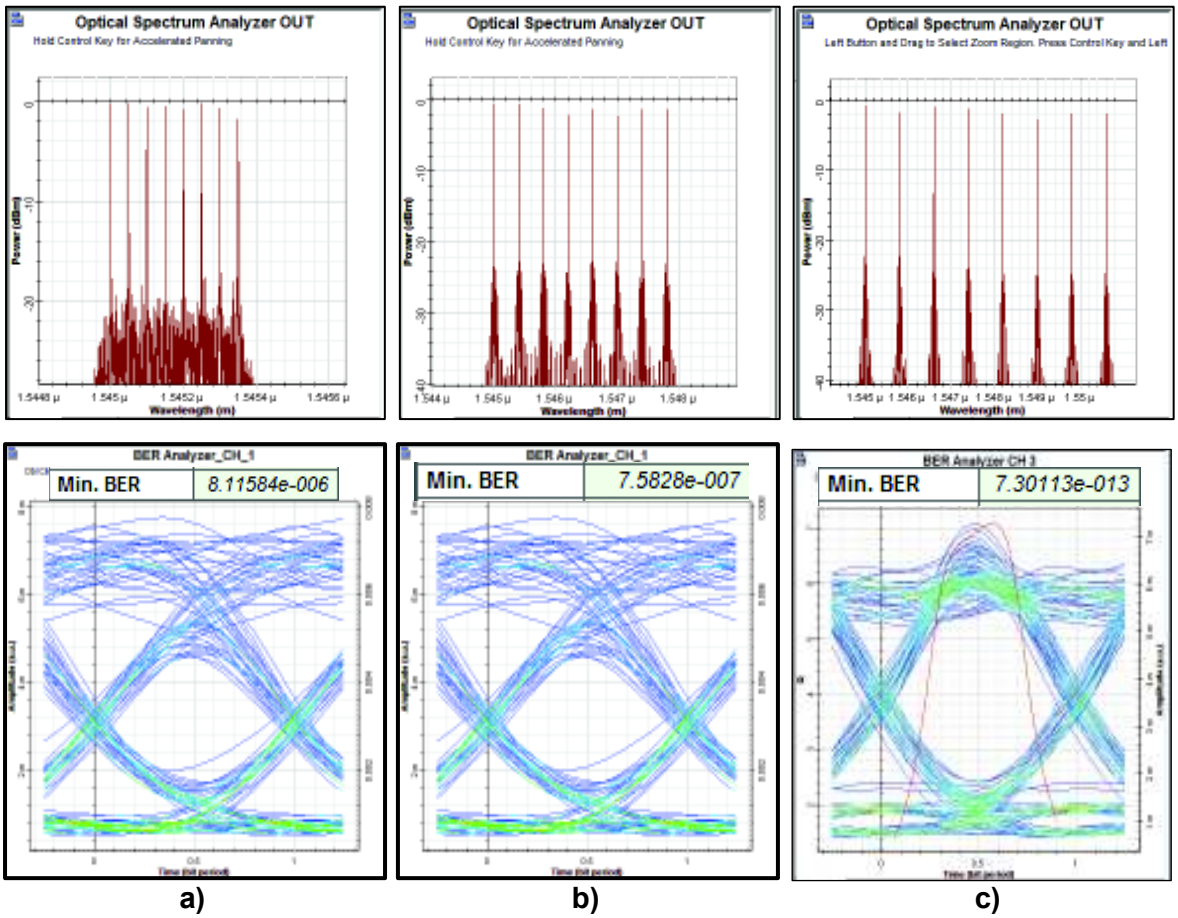
- Número de canales transmitidos: 8.
- Longitudes de onda central de cada canal: en la Tabla 3.7 se remarcan los valores de longitudes de onda central de cada canal para el amplificador Raman en un sistema DWDM de 8 canales con una sola fuente de bombeo.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1544,6	1545,0	1545,4
2	1545,4	1545,8	1546,2
3	1546,2	1546,6	1547,0
4	1547,0	1547,4	1547,8
5	1547,8	1548,2	1548,6
6	1548,6	1549,0	1549,4
7	1549,4	1549,8	1550,2
8	1550,2	1550,6	1551,0

Tabla 3.7 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el Raman en un sistema DWDM de 8 canales y una sola fuente de bombeo.

- Longitud de onda de bombeo: 1444 nm.
- Configuración de bombeo: contradireccional.
- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo total: 600 mW.

a) Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del Raman en un sistema DWDM de 8 canales y espaciamientos entre canal de 0,2; 0,4 y 0,8 nm



a) **b)** **c)**

Figura 3.24 Espectros de potencia de las señales de salida y diagramas del ojo del Raman en un sistema DWDM de 8 canales con espaciamientos entre canal de: a) 0,2 nm; b) 0,4 nm y c) 0,8 nm.

Acorde a los resultados arrojados de los escenarios de simulación correspondientes al amplificador Raman en sistemas multicanal (DWDM) de la Figura 3.24, se establece el siguiente análisis comparativo:

- Se puede notar en la Figura 3.24c que con un espaciamiento entre canales ópticos de 0,8 nm se obtiene un BER de 10^{-13}, a diferencia de la Figura 3.24a

que con un espaciamiento de 0,2 nm el BER es de 10^{-6} lo que implica que con un espaciamiento menor el receptor no logra discriminar la señal de salida, conllevando a la aparición de errores durante la transmisión.

De manera general para las posteriores simulaciones del Raman en sistemas multicanal se consideró un espaciamiento entre canales ópticos de 0,8 nm; garantizando el BER y la calidad del sistema óptico.

3.1.2.2.2 Múltiples fuentes de bombeo

Para el análisis del comportamiento del amplificador Raman en sistemas multicanal se trabaja con una y múltiples fuentes de bombeo, manteniendo constantes los siguientes parámetros acordes a la Tabla 3.1:

- Longitudes de onda central de cada canal: en la Tabla 3.8 se remarcan los valores de longitudes de onda central de cada canal para el amplificador Raman en un sistema DWDM de 64 canales con múltiples fuentes de bombeo.

CH	Longitud de onda (nm)		
	Inicial	Central	Final
1	1539.6	1540	1540.4
2	1540.4	1540.8	1541.2
3	1541.2	1541.6	1542
4	1542	1542.4	1542.8
5	1542.8	1543.2	1543.6
6	1548.6	1544	1549.4
7	1549.4	1544.8	1550.2
8	1550.2	1545.6	1551
9	1551	1546.4	1551.8
10	1551.8	1547.2	1552.6
11	1552.6	1548	1553.4
12	1553.4	1548.8	1554.2
13	1554.2	1549.6	1555
14	1555	1550.4	1555.8
15	1555.8	1551.2	1556.6
16	1556.6	1552	1557.4
17	1557.4	1552.8	1558.2
18	1558.2	1553.6	1559
19	1559	1554.4	1559.8
20	1559.8	1555.2	1560.6
21	1560.6	1556	1561.4
22	1561.4	1556.8	1562.2
23	1562.2	1557.6	1563
24	1563	1558.4	1563.8
25	1563.8	1559.2	1564.6
26	1564.6	1560	1565.4
27	1565.4	1560.8	1566.2
28	1566.2	1561.6	1567
29	1567	1562.4	1567.8
30	1567.8	1563.2	1568.6
31	1568.6	1564	1569.4
32	1569.4	1564.8	1570.2
33	1570.2	1565.6	1571
34	1571	1566.4	1571.8
35	1571.8	1567.2	1572.6
36	1572.6	1568	1573.4
37	1573.4	1568.8	1574.2
38	1574.2	1569.6	1575
39	1575	1570.4	1575.8
40	1575.8	1571.2	1576.6
41	1576.6	1572	1577.4
42	1577.4	1572.8	1578.2
43	1578.2	1573.6	1579
44	1579	1574.4	1579.8
45	1579.8	1575.2	1580.6
46	1580.6	1576	1581.4
47	1581.4	1576.8	1582.2
48	1582.2	1577.6	1583
49	1583	1578.4	1583.8
50	1583.8	1579.2	1584.6
51	1584.6	1580	1585.4
52	1585.4	1580.8	1586.2
53	1586,2	1581,6	1587
54	1587	1582.4	1587.8
55	1587.8	1583.2	1588.6
56	1588.6	1584	1589.4
57	1589.4	1584.8	1590.2
58	1590.2	1585.6	1591
59	1591	1586.4	1591.8
60	1591.8	1587.2	1592.6
61	1592.6	1588	1593.4
62	1593.4	1588.8	1594.2
63	1594.2	1589.6	1595
64	1595	1590.4	1595.8

Tabla 3.8 Valores de longitudes de onda central de cada canal para el Raman en un sistema DWDM de 64 canales con múltiples fuentes de bombeo.

- Configuración de bombeo: contradireccional.
- Potencia de entrada: -20 dBm.
- Potencia de bombeo total: 800 mW.
- Número de canales: 64.
- Espaciamiento entre canales ópticos: 0,8 nm.
- Longitudes de onda de bombeo: en la Tabla 3.9 se detalla cada una de las longitudes de onda empleadas para este escenario de simulación; se escoge estos valores ya que el Anexo D hace referencia a las longitudes de onda de bombeo que se emplean actualmente:

Number of pumping:	Wavelength Pump (nm)
1	1455,0
8	1440, 1445, 1450, 1455, 1460, 1465, 1470, 1487
12	1440, 1445, 1450, 1455, 1460, 1465, 1470, 1475, 1480, 1485, 1487, 1490

Tabla 3.9 Longitudes de onda de bombeo para un sistema Raman con múltiples fuentes de bombeo.

a) Ganancia del Raman versus la longitud de onda central con 1, 8 y 12 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 64 canales

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de ganancia en función de las longitudes de onda entre 1540 y 1590 nm en la Figura 3.23.

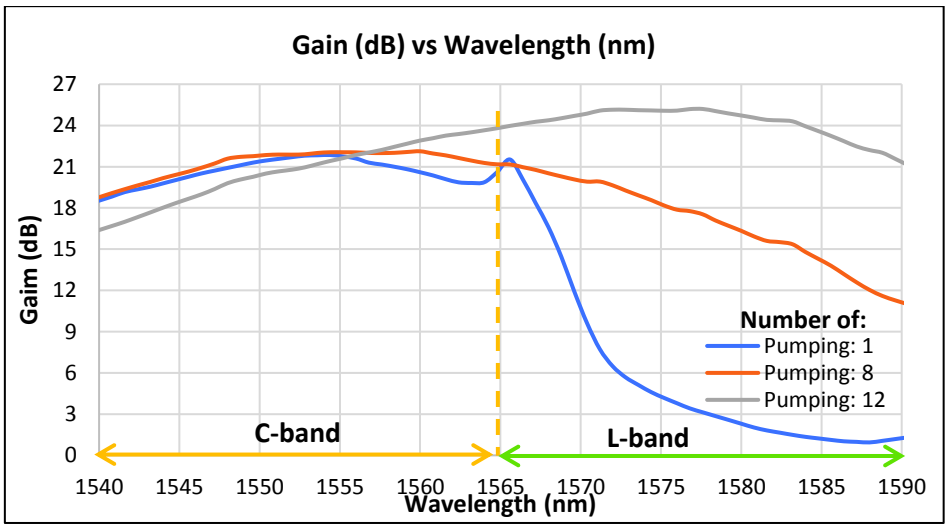


Figura 3.25 Ganancia del Raman en función de la longitud de onda central con 1, 8 y 12 fuentes de bombeo contradireccionales para un sistema DWDM de 64 canales.

Análisis de resultados

En cuanto a los resultados obtenidos de la Figura 3.25, se establece el siguiente análisis comparativo:

- Bajo un único bombeo con una longitud de onda de bombeo de1455 nm existe amplificación solamente en las longitudes de onda central de los canales en banda C, más no es suficiente para generar amplificación a partir de 1565 nm, longitudes de onda central correspondientes a la banda L, esto debido que la bomba no se encuentra a 100 nm bajo la longitud de onda de operación.
- Por otra parte, al utilizar 8 y 12 fuentes de bombeo que se encuentran distribuidas en todo el espectro de longitudes de onda central, se verifica que existe amplificación tanto en banda C como en banda L; por lo que actualmente el amplificador Raman presenta un mejor desempeño en los sistemas multicanal con varias fuentes de bombeo (En este caso se empleó 8 y 12 fuentes de bombeo según los casos de aplicación que presenta el software de simulación OptiSystem).

3.1.3 COMPARACIÓN SEGÚN LA CONFIGURACIÓN DE BOMBEO PARA EDFA Y RAMAN

Considerando las configuraciones de bombeo codireccional, contradireccional y bidireccional para los amplificadores ópticos EDFA y Raman, se presenta el siguiente análisis con la finalidad de contrastar lo expuesto en el capítulo teórico de las secciones 1.3.3.2 y 1.3.4.2 que hace referencia a las características de los amplificadores de fibra EDFA y Raman respectivamente.

3.1.3.1 Ganancia del EDFA y Raman en función de la longitud de onda

- 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 Raman.

3.1.3.2 Figura de ruido del EDFA y Raman en función de la longitud de onda

- 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; esto se cumple en los amplificadores ópticos EDFA y Raman.

3.1.3.3 OSNR del EDFA y Raman en función de la longitud de onda

- Los valores de OSNR conseguidos en las tres configuraciones de bombeo tanto en el EDFA como en el Raman son superiores a 15 dB, lo que corrobora lo expuesto en el desarrollo teórico de la sección 1.3, que hace referencia a los valores mínimos de OSNR en las comunicaciones ópticas, siendo éste un indicador para lograr un buen desempeño del enlace y garantizar la calidad del sistema.

3.1.3.4 Tasa de bits errados (BER) del EDFA y Raman con velocidades de transmisión de 10 y 100 Gbps.

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante simulación en las tres configuraciones de bombeo (codireccional, contradireccional y bidireccional), para los amplificadores ópticos EDFA y Raman se muestra la Tabla 3.10:

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

Tabla 3.10 BER en función de las configuraciones de bombeo para los amplificadores EDFA y Raman.

Análisis de resultados:

- Como se puede notar en la Tabla 3.10 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 el orden de 10^{-7} a 10^{-13}; así también, al trabajar con velocidades de 10 Gbps se obtiene un BER del orden de 10^{-19} y 10^{-50}, lo cual permitió corroborar que, este tipo de amplificadores puede operar en altas velocidades alrededor de los 100 Gbps.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente capítulo se incluyen las conclusiones y recomendaciones derivadas de la realización de este análisis comparativo de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA.

4.1 CONCLUSIONES

- La inclusión de los amplificadores ópticos en los sistemas de comunicaciones ha permitido el despliegue de nuevas tecnologías con requerimientos de alta velocidad y mayores distancias. Mediante el análisis comparativo realizado se verificó que el EDFA y Raman trabajan con velocidades de transmisión superiores en el orden de centenas de Gbps a diferencia del SOA que opera con velocidades desde 155 Mbps hasta 10 Gbps como máximo.
- Desde el punto de vista de la figura de ruido los bombeos codireccional y bidireccional presentan mejores prestaciones al sistema de transmisión; mientras que, respecto a la ganancia, el bombeo bidireccional puede mejorar el rendimiento del sistema puesto que, los valores de ganancia son superiores a las otras dos configuraciones de bombeo, ya que se incluye una fuente de bombeo adicional.
- Bajo el principio de funcionamiento del amplificador EDFA, donde la longitud de fibra dopada con erbio define el rango de longitudes de onda de operación del amplificador, se comprobó que para conseguir amplificación en banda C la longitud de la fibra dopada debe ser de 5 a 10 m, mientras que para banda L la longitud de fibra debe ser mayor entre 50 y 100 m.
- Se comprobó que en el amplificador Raman existe amplificación siempre y cuando se maneje una longitud de onda de bombeo adecuada, situada a 100 nm bajo la longitud de onda de operación, en donde se produce la máxima ganancia. Además, utilizando multibombeo se puede conseguir amplificación en un espectro más amplio, tal como se verificó en los sistemas

multicanal simulados, en los cuales la inclusión de dos o más fuentes de bombeo permitió cubrir las bandas de operación S, C y L.

- El amplificador SOA, al no depender de un sistema de bombeo óptico, define su comportamiento en función de la corriente aplicada al semiconductor, lo que lo convierte en un dispositivo diferente a los amplificadores de fibra EDFA y Raman.
- En base a los resultados derivados de las simulaciones de los escenarios de aplicación de los amplificadores ópticos EDFA, Raman y SOA, es posible evidenciar la dependencia existente entre los parámetros que caracterizan al amplificador como: longitud de onda de operación, sistema de bombeo y potencia de entrada con los parámetros de ganancia, figura de ruido (NF), OSNR y BER obtenidos en cada amplificador.
- Acorde a las especificaciones técnicas de cada uno de los amplificadores ópticos se establece que: para el EDFA se tiene un rango de operación que corresponde a la banda C y L, el amplificador Raman en un rango más amplio en bandas S, C y L, mientras que para el SOA sus bandas de operación son O y C. Teniendo en común que los tres amplificadores trabajan en las longitudes de onda comprendidas entre 1530 y 1565 nm (banda C).
- Al trabajar en los tres amplificadores con potencias de entrada de pequeña señal, se verifica que el comportamiento de un amplificador Raman en cuanto a la potencia de salida alcanza valores bajos comparados con un amplificador EDFA y SOA, esto debido a sus diferentes principios de funcionamiento y características inherentes.
- La figura de ruido para los amplificadores de fibra EDFA y Raman es dependiente de la configuración de la fuente de bombeo mientras que, para el SOA, la NF se encuentra determinada por las pérdidas de acoplamiento entre el dispositivo semiconductor y la fibra; lo que origina que los valores de NF en el SOA sean mayores en comparación con el EDFA y Raman.
- 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, a diferencia del Raman que emplea múltiples longitudes de onda de bombeo acorde a la banda de operación, 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).
- La relación señal a ruido óptica OSNR, define de cierta manera el rendimiento y comportamiento de un sistema de comunicaciones óptico. En donde, valores muy bajos de OSNR (menores a 10 dB) no garantizan la detección y recuperación de la señal en la recepción, por lo tanto, se procura que los niveles de OSNR sean superiores a dicho valor, siendo éste un indicador para lograr un buen desempeño del enlace y garantizar la calidad del sistema.
- La tasa de bits errados BER garantiza la calidad de un sistema de comunicaciones ópticas, por lo que actualmente sus valores están definidos entre 10^{-9} y 10^{-16}, tal como se expuso en el desarrollo teórico de los amplificadores ópticos. En el presente estudio el BER se encuentra limitado por la velocidad de transmisión y configuración de bombeo para el caso del EDFA y Raman.
- En cuanto al uso de los amplificadores ópticos en sistemas multicanal, se corroboró mediante simulación que: el EDFA y Raman generan amplificación en todas las longitudes de onda de cada canal, con un BER muy aceptable del orden de 10^{-15}; lo que no sucedió con el SOA, ya que debido al alto *crosstalk* que introduce presenta un BER muy elevado del orden de 10^{-3}.
- Al utilizar los amplificadores EDFA y Raman en sistemas WDM con múltiples fuentes de bombeo, se obtuvo una ganancia ligeramente superior a la conseguida cuando se emplea una única fuente de bombeo; motivo por el

cual, este tipo de sistemas se emplean con mayor frecuencia en los sistemas de transmisión de largo alcance.

- Acorde a los resultados obtenidos en los sistemas multicanal con diferentes espaciamientos entre canales ópticos y con el uso de amplificadores de fibra EDFA y Raman, se verificó que existe amplificación para cada uno de los canales transmitidos a pesar de utilizar diferentes espaciamientos entre canal, convirtiéndolos en los más empleados; lo que no sucedió con el SOA que al emplearlo en los sistemas DWDM introdujo *crosstalk* entre los canales ópticos.
- El software Optisystem constituye una herramienta completa para el desarrollo de los sistemas de comunicaciones ópticas que hacen uso de amplificadores ópticos; su amplia gama de librerías, componentes, interfaz gráfica amigable con el usuario y facilidad de manejo han permitido cumplir con los alcances planteados en este trabajo de titulación.

4.2 RECOMENDACIONES

- El estudio realizado puede ser considerado como base para futuros proyectos de titulación relacionados con el desarrollo de los amplificadores ópticos híbridos y la importancia que éstos representan en los sistemas de comunicaciones ópticas, ya que con la combinación de los amplificadores EDFA y Raman se puede superar varias limitaciones que actualmente presentan dichos sistemas.
- El análisis realizado en este proyecto para el amplificador EDFA basa su funcionamiento en la fibra dopada con Erbio, no obstante, se han presentado varios estudios sobre la amplificación basada en otros dopantes, tales como el Iterbio, sobre los cuales aún no se tiene amplia información en cuanto a las ventajas y desventajas, por lo tanto se recomienda encaminar un proyecto que compare de manera directa el impacto en la caracterización del amplificador de fibra dopada al usar otras tierras raras como dopantes.
- En este proyecto se ha realizado el estudio del amplificador Raman en todo su rango de operación. Sin embargo, actualmente varios estudios se están orientando al despliegue de este amplificador en banda S, puesto que abarca

un rango que es inaccesible para los otros amplificadores. Por lo que es importante realizar un estudio a profundidad sobre las mejoras que se pueden conseguir únicamente en esta banda de operación con el amplificador Raman.

- Se recomienda realizar un estudio del SOA y sus nuevas aplicaciones, ya que, al ser un dispositivo de fácil integración con otros sistemas, se hace imprescindible su implementación en otros campos, entre los cuales se puede mencionar su desarrollo en los convertidores de longitudes de onda y en los conmutadores ópticos.
- El manejo del software de simulación OptiSystem implica tener un conocimiento previo sobre la utilización de sus diferentes componentes y librerías, ya que un uso incorrecto podría desplegar resultados erróneos.
- Optisystem es un software que permite la integración con otras herramientas de simulación, tales como Matlab, por lo que se recomienda la incorporación de esta herramienta para la extracción de valores de parámetros obtenidos, permitiendo de esta manera desplegar una GUI en la que se muestre de forma más amigable la presentación de curvas características de cada amplificador.
- Se sugiere la utilización de la herramienta de simulación OptiSystem en las diferentes asignaturas relacionadas con los sistemas de comunicaciones ópticas, con la finalidad de que, al tener una experiencia previa con el simulador, permita a los estudiantes proponer nuevos estudios técnicos afines al tema planteado y esquemas de simulación realizados.
- Se debería tener muy en claro los fundamentos de la tecnología DWDM con la finalidad de conocer su funcionamiento y características principales para presentar nuevos casos de simulación como por ejemplo sistemas con mayor número de canales y diferentes espaciamientos entre canales ópticos, en los que se incluyan los diferentes amplificadores ópticos, con la finalidad de contrastar las especificaciones técnicas con los resultados obtenidos.

- Sería importante realizar un estudio sobre los métodos de ecualización de ganancia para los amplificadores EDFA y Raman en sistemas multicanal (DWDM), con el propósito de obtener una ganancia uniforme para todos los canales que se están utilizando.
- Se recomienda en un trabajo a fututo analizar el modelo matemático de los amplificadores ópticos mediante la utilización de un software de simulación, que permita establecer las condiciones necesarias y factores dependientes para nuevas líneas de investigación en los sistemas de comunicaciones ópticas.
- Adicionalmente, sería interesante investigar los métodos de mejora de la figura de ruido (NF), ya que la NF se ha convertido en un desafío en los amplificadores ópticos, sobre todo en los amplificadores de semiconductor en donde se obtuvieron valores altos de NF en comparación a los amplificadores de fibra EDFA y Raman.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Finisar, «Introduction to Optical Amplifiers,» White Paper, Sunnyvale, 2010.

[2] H. Dutton, Understanding Optical Communications, U.S.A.: IBM Corporation, International Technical Support Organization, 1988.

[3] A. García y . R. A. Pinto, «Sistemas de Comunicaciones Ópticas,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, 2014.

[4] P. C. Becker, N. A. Olsson y J. R. Simpson, Erbium Dopped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology, San Diego : Academic Press, 1997.

[5] A. Flores, «Diseño y Caracterización de un EDFA con potencia de salida de alta saturación.,» Universidad Autónoma de Puebla, H. Puebla de Zaragoza, 2003.

[6] W. Tomasi, Sistemas de Comunicaciones Electrónicas, Mexico: Pearson Education, 2003.

[7] L. Lozada, «Sistema de comunicación por fibra óptica y enlace inalámbrico para la Corporación Nacional de Telecomunicaciones,» Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2009.

[8] I. Hernández Serna y B. K. Mora Acosta, «Análisis del dimensionamiento de una red con fibra óptica para los servicios de televisión, Internet y telefonía,» Instituto Politécnico Nacional, 2013.

[9] R. Kostuk, «Optical Communication Systems,» University of Arizona, Tuczon, 2004.

[10] Recommendation ITU-T G.694.1, «Characteristics of a single-mode optical fibre,» ITU-T, 2016.

[11] Recommendation ITU-T G.651.1, «Characteristics of a 50/125 μm multimode graded index optical fibre cable for the optical access network,» ITU-T, 2007.

[12] M. F. Carvajal Vera, «Análisis para la aplicación del programa Optifiber de Optiwave para las mediciones de los parámetros de diseño de los cables de fibra óptica,» Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Guayaquil, 2014.

[13] K. A. Gjerde, «DWDM, fiber optic high speed communication,» ABB Telecom, 2009.

[14] G. A. Montero Cedillo, «Estudio y diseño mediante la técnica de transmisión DWDM para la red SDH del anillo central de la ciudade Guayaquil de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones E.P, e integración a la red nacional.,» EPN, Quito, 2012.

[15] 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.

[16] Education Scientific Technological, Principles of Fiber Optic Communication, CORD Communications, 2008.

[17] A. O. Henández Calvario, «Diseño, caracterización e implementación de un amplificador versátil de fibra dopada con erbio (EDFA).,» CICESE, Baja California, 2010.

[18] K. S. Sushanta, «Analysis of DWDM Network Based on EDFA Pumping and Dispersion Compensation using Optisystem,» Department of Electronics & Communication Engineering National Institute of Technology Rourkela, 2012.

[19] H. Guano y P. Molina, «Estudio y simulación de los efectos no lineales-Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS),» EPN, QUITO, 2013.

[20] Recommendation ITU-T G.696.1, «Longitudinally compatible intra-domain DWDM applications,» ITU-T, 2010.

[21] M. Zaman, «Performance Analysis of EDFA Amplifier for DWDM System,» 2010.

[22] Z. Wen , Q. Li y H. Amr , «Implementation of three functional devices using Erbium doped Fibers: An Advanced Photonics Lab,» Universidad de Toronto, Canadá, 2010.

[23] R. Ramanswami, K. Sivarajan y G. Sasaki, Optical Networks a practical perpective, Morgan Kaufhamn, 2010.

[24] I. Mohanmmed, «Raman Amplifiers for Telecommunications I,» Physical principles, Springer, 2004.

[25] K. Ramandeep, «Performance Analysis of Hybrid Optical Amplifiers for multichannel WDM,» Thapar University, India, 2011.

[26] M. S. Jiménez, Folleto de Comunicaciones Ópticas, Quito: EPN, 2016.

[27] H. Clifford y G. Agarwal, «Raman Amplification in Fiber Optic,» Elsevier Academic Press, 2010.

[28] BWTek, «Theory of Raman Scattering,,» Raman Knowledge, 2013. [En línea]. Available: http://bwtek.com/raman-theory-of-raman-scattering/.

[29] K. Rottwitt, K. Nielsen, S. Friis y M. Castaneda, «Challenges in higher order mode Raman amplifiers,» IEEE Journal, 2015.

[30] H. Salgado, «Raman amplification,» de *Optical Communications*, Porto - Brasil, FEUP, 2008, pp. 22-44.

[31] T. Ahmed y A. Moustafa, «Gain and Noise Performance of Fiber Raman Amplifiers,» Cairo University, 2009.

[32] ResearchGate, «Nonlinear Effects in Optical Fibers,» 2012. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Principle-of-multi-wave

length-pumping-for-flat-and-broadband-Raman-amplification-at_fig7_300831821.

[33] Recomendación UIT-T G.665, «Características generales de los amplificadores Raman,» UIT, 2005.

[34] M. D. Manzanedo, «Aplicación de los amplificadores ópticos de semicondutor a la fotónica de microondas.,» Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.

[35] I. Armstrong y I. Andonovic, «Semiconductor optical amplifiers: performance and applications in optical packet switching,» University of Strachclyde, UK, 2004.

[36] 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.

[37] M. Gustavsson y A. Karlsson, «Traveling wave semiconductor laser amplifier detectors,» IEEE Journal of Lightwave Technology, 1990.

[38] V. Venkataramanan, «Optical Amplifiers,» November 2008. [En línea]. Available: https://www.ee.ryerson.ca/~courses/ee8114/optical-amplifiers-venkat.pdf.

[39] X. Shuangmei y J. Khurgin, «A Dispersion Management Scheme for Reducing SOA-Induced Crosstalk in WDM Links,» *Journal of Lightwave Technology,* vol. 22, nº 2, pp. 417-422, 2004.

[40] A. Srivastava y S. Banerjee, «A Polarization Multiplexing Technique to Mitigate WDM Crosstalk in SOAs,» *IEEE Photonics Technology Letters,* vol. 12, nº 10, pp. 1415-1416, 2000.

[41] G. Keiser, «Optical amplifiers and their applications,» de *Optical Fiber Communication*, 2012, pp. 3-5.

[42] VPIphotonics Design Automation, «Design of Photonic Systems &Networks,» VPIphotonics Design Automation, 2017. [En línea]. Available: http://www.vpiphotonics.com/Applications/FiberOptics/.

[43] VPI Trasmission Maker Design System, «Intuitive and flexible graphical User Interface,» 2017. [En línea]. Available: http://www.vpiphotonics.com/Tools/OpticalSystems/.

[44] D. P. Cando Garzón, «Análisis y simulación de la capacidad de escalabilidad de una red nacional DWDM para que opere a 128 lambdas,» PUCE, Quito, 2015.

[45] Synopsys, «OptSim Product Overview,» Optsim, 2017. [En línea]. Available: https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/system-network-optsim.html.

[46] Synopsys, «Herramientas utilizadas: OptSim,» 2017. [En línea]. Available: https://www.synopsys.com/optical-solutions/rsoft/rsoft-product-applications/optsim-ftth-system-gepon-access-architecture.html.

[47] A. J. Ordoñez Mendieta, «Diseño y simulación de los efectos de FWM en una red UDWDM PON,» PUCE, Quito, 2015.

[48] OptiSystem, «OptiSystem 14.0 Optical Communication System and Amplifier Design Suite,» 2017. [En línea]. Available: https://optiwave.com/pdf/OptiSystem_14_New_Features.pdf.

[49] Optiwave, «Optisystem Overview,» 2017. [En línea]. Available: https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-communication-system-design/.

[50] A. E. Puerres Alquedan y D. Salazar Criollo, «Estudio y simulación de los efectos no lineales Modulación Cruzada de Fase (XPM) y Mezcla de cuatro longitudes de Onda (FWM),» EPN, Quito, 2015.

[51] Optiwave Photonic Software, «Reflective Amplifier,» [En línea]. Available: https://optiwave.com/resources/applications-resources/optical-system-reflective-amplifier/.

[52] OptiSystem Web, «OptiSystem 14.0/14.1/14.2/14.2.1 Release Notes,» 2017. [En línea]. Available: https://optiwave.com/upgrades/optisystem-14-2-1-customer-upgrade/.

[53] Recomendation ITU-T G.694.1, «Spectral grids for WDM applications: DWDM,» ITU-T, 2012.

[54] A. H. Beshr, «Different Pump Configurations for Discrete Raman Amplifier,» International Journal of Scientific & Engineering Research, Nov 2011. [En línea]. Available: http://www.ijser.org/paper/Different-Pump-Configurations-for-Discrete-Raman-Amplifier.html.

[55] J. A. Hernández, «Telecomunicación por sistemas ópticos,» Instituto Politécnico Nacional, México, 2010.

[56] P. M. Reyes, «Complejos de Erbio(III) e Iterbio(III) con ligandos fluorados para aplicaciones fotónicas en telecomunicaciones EDFAS - YEDFAs,» Universidad de Valladolid, Madrid, 2010.

[57] Artículos TICS, «Fibra óptica compensadora de dispersión (Dispersion Compensating Fiber, DCF),» Julio 2008. [En línea]. Available: http://proyredes.blogspot.com/2008/07/tipos-de-fibra-ptica.html.

[58] Design OptiSystem, *OptiSystem Tutorials Volumen 2,* OptiSystem, 2010.

[59] Amonics, Specialist Optical Amplifiers, «Amonics,» 03 November 2004. [En línea]. Available: https://www.tau.ac.il/~lab3/OPTICOM/EDFA_Kit_upgrade_manual.pdf.

[60] M. C. España, Comunicaciones ópticas, conceptos escenciales y resolución de ejercicios., Madrid: Diaz Santos, 2005.

[61] Fiber Optics Online, «KMI Corporation (Kessler Marketing Intelligence),» [En línea]. Available: https://www.fiberopticsonline.com/doc/kmi-corporation-kessler-marketing-intelligenc-0001.

ANEXOS

ANEXO A: RECOMENDACIONES ITU-T G.661

ANEXO B: AMPLIFICADOR BOOSTER

ANEXO C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EDFA

ANEXO D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RAMAN

ANEXO E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOA

ANEXO F: SIMULACIONES DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS

ANEXO A: RECOMENDACIONES ITU-T G.661

ITU-T

TELECOMMUNICATION
STANDARDIZATION SECTOR
OF ITU

G.661
(07/2007)

SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS

Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical components and subsystems

Definitions and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems

ITU-T Recommendation G.661

ITU-T G-SERIES RECOMMENDATIONS

TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS

INTERNATIONAL TELEPHONE CONNECTIONS AND CIRCUITS	G.100–G.199
GENERAL CHARACTERISTICS COMMON TO ALL ANALOGUE CARRIER-TRANSMISSION SYSTEMS	G.200–G.299
INDIVIDUAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON METALLIC LINES	G.300–G.399
GENERAL CHARACTERISTICS OF INTERNATIONAL CARRIER TELEPHONE SYSTEMS ON RADIO-RELAY OR SATELLITE LINKS AND INTERCONNECTION WITH METALLIC LINES	G.400–G.449
COORDINATION OF RADIOTELEPHONY AND LINE TELEPHONY	G.450–G.499
TRANSMISSION MEDIA AND OPTICAL SYSTEMS CHARACTERISTICS	G.600–G.699
General	G.600–G.609
Symmetric cable pairs	G.610–G.619
Land coaxial cable pairs	G.620–G.629
Submarine cables	G.630–G.639
Free space optical systems	G.640–G.649
Optical fibre cables	G.650–G.659
Characteristics of optical components and subsystems	**G.660–G.679**
Characteristics of optical systems	G.680–G.699
DIGITAL TERMINAL EQUIPMENTS	G.700–G.799
DIGITAL NETWORKS	G.800–G.899
DIGITAL SECTIONS AND DIGITAL LINE SYSTEM	G.900–G.999
QUALITY OF SERVICE AND PERFORMANCE – GENERIC AND USER-RELATED ASPECTS	G.1000–G.1999
TRANSMISSION MEDIA CHARACTERISTICS	G.6000–G.6999
DATA OVER TRANSPORT – GENERIC ASPECTS	G.7000–G.7999
PACKET OVER TRANSPORT ASPECTS	G.8000–G.8999
ACCESS NETWORKS	G.9000–G.9999

For further details, please refer to the list of ITU-T Recommendations.

Definitions and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and subsystems

Summary

ITU-T Recommendation G.661 provides the definitions of the relevant parameters, common to the different types of optical amplifiers and the test methods of said parameters to be followed, as far as applicable, for optical amplifier devices and subsystems covered by ITU-T Recommendations.

Source

ITU-T Recommendation G.661 was approved on 29 July 2007 by ITU-T Study Group 15 (2005-2008) under the ITU-T Recommendation A.8 procedure.

5.1 Definitions for OA devices and ONEs containing OAs

The definitions listed in this clause refer to the meaning of the terms used in the specifications of OA devices and ONEs containing OAs.

5.1.1 gain: In an OA, the increase of signal optical power from the input reference point R' to the output reference point S', expressed in dB.

NOTE 1 – Care should be taken to exclude the amplified spontaneous emission power from the signal optical powers at both the input and output.

NOTE 2 – This definition is different from the corresponding IEC definition in that it includes the effects of any connectors directly associated with the OA device at both the input and output.

5.1.2 small-signal gain: The gain of the amplifier, when operated in linear regime, where it is essentially independent of the input signal optical power at a given signal wavelength and pump optical power level.

NOTE – This property can be described at a discrete wavelength or as a function of wavelength.

5.1.3 reverse small-signal gain: The small-signal gain measured in the reverse direction, i.e., from output port to input port.

5.1.4 maximum small-signal gain: The highest small-signal gain that can be achieved when the OA is operated within the stated nominal operating conditions.

5.1.5 maximum small-signal gain wavelength: The wavelength at which the maximum small-signal gain occurs.

5.1.8 small-signal gain variation with wavelength: The peak-to-peak variation of the small-signal gain over a given wavelength range.

5.1.9 small-signal gain stability: The degree of small-signal gain fluctuation expressed by the ratio (in dB) of the maximum and minimum small-signal gain, for a certain specified test period, under nominal operating conditions.

5.1.10 large-signal output stability: The degree of output optical power fluctuation expressed by the ratio (in dB) of the maximum and minimum output signal optical powers, for a certain specified test period, under nominal operating conditions and a specified large input signal optical power.

5.1.11 polarization dependent gain (PDG): The maximum variation of the OA gain due to a variation of the state of polarization of the input signal under nominal operating conditions.

NOTE – A source of PDG in OAs is the polarization dependent loss of the passive components used inside.

5.1.12 saturation output power (gain compression power): The optical power level associated with the output signal at which the gain is reduced by N dB (typically N = 3) with respect to the small-signal gain at the signal wavelength.

NOTE 1 – The wavelength at which the parameter is specified should be stated.

NOTE 2 – The optical pump power, for OFAs, or the pump current, for SOAs, should be stated when applicable.

5.1.13 nominal output signal power: The signal optical power at the output for a specified signal optical power at the input under nominal operating conditions.

5.1.14 maximum output signal power: The highest signal optical power at the output that can be obtained from the OA under nominal operating conditions.

5.1.15 input power range: The range of optical power levels at the input for which the corresponding output signal optical power lies in the specified output power range, where the OA performance is ensured.

5.1.16 channel input power range: The range of optical channel power levels at the input of the OA or ONE over which all of the other parameters of the device are required to remain within the allowed limits.

5.1.17 output power range: The range of optical power levels at the output of the OA for which the corresponding input signal power lies in the specified input power range, where the OA performance is ensured.

5.1.18 channel output power range: The range of optical channel power levels at the output of the OA or ONE that must be present while the corresponding input channels are within the channel input power range.

5.1.19 optical signal-to-noise ratio (OSNR): The optical signal-to-noise ratio (OSNR) is the ratio of the signal power in the wanted channel to the highest noise power density (referred to 0.1 nm) within the channel frequency range.

5.1.19 optical signal-to-noise ratio (OSNR): The optical signal-to-noise ratio (OSNR) is the ratio of the signal power in the wanted channel to the highest noise power density (referred to 0.1 nm) within the channel frequency range.

5.1.20 noise figure (NF) (applicable to OA devices only): The decrease of the signal-to-noise ratio (SNR), at the output of an optical detector with unitary quantum efficiency, due to the propagation of a shot-noise-limited signal through the OA, expressed in dB.

NOTE 1 – The operating conditions at which the noise figure is specified should be stated.

NOTE 2 – This property can be described at a discrete wavelength or as a function of wavelength.

NOTE 3 – The noise degradation due to the OA is attributable to multiple contributions, e.g., signal-spontaneous beat noise, spontaneous-spontaneous beat noise, internal reflections noise, signal shot noise, and spontaneous shot noise. Each of these contributions depends on various conditions which should be specified for a correct evaluation of the noise figure.

NOTE 4 – By convention, the noise figure is a positive number.

NOTE 5 – In the case of OAs for analogue applications, the noise figure also represents the ratio between input and the output carrier-to-noise ratios.

5.1.21 forward amplified spontaneous emission (ASE) power level: The optical power in a specified wavelength range associated with the ASE exiting from the output port under nominal operating conditions.

NOTE 1 – This parameter is particularly important for OAs used as pre-amplifiers or line amplifiers and it depends mainly on the filter used.

NOTE 2 – The operating conditions (e.g., the gain and input signal optical power) at which the ASE level is specified should be stated.

5.1.22 reverse ASE power level: The optical power in a specified wavelength range associated with the ASE exiting from the optical input port under nominal operating conditions.

5.1.38 degree of polarization (DOP) (applicable to pumping devices for fibre Raman amplifiers): For each emission wavelength of the optical pump source, the value:

$$\frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}$$

expressed as a percentage, where P_{max} and P_{min} are, respectively, the maximum and minimum optical output powers of the pump source over all states of polarization at that wavelength of emission and measured within a specified bandwidth.

NOTE 1 – Because the Raman effect exploited in Raman amplifiers is polarization dependent, the degree of polarization can influence the polarization dependent gain of the amplifier.

NOTE 2 – Because Raman amplifiers are often pumped with multiple wavelengths and multimode lasers, it is necessary to determine separately the degree of polarization at every wavelength of emission, rather than just the degree of polarization of the total optical output.

5.1.45 effective noise figure (only applicable to distributed amplifiers): The decrease of the signal-to-noise ratio (SNR) at the output of an optical detector with unitary quantum efficiency, due to the propagation of a shot-noise-limited signal through an optical fibre providing distributed amplification when the pumping is active compared to when the pumping is disabled, expressed in dB.

NOTE 1 – The effective noise figure differs from the noise figure in that it does not compare the SNR at the output with the SNR at the input of the amplifier. The increase in signal strength relevant to the change in SNR is thus the effective gain rather than the gain. In particular, the contribution of signal-spontaneous noise figure, which can be calculated from the difference between ASE power and gain expressed in dB, is then reduced in the effective noise figure by the amount of passive loss between the input and output. It is thus possible for the effective noise figure of distributed amplification to be negative, expressed in dB.

NOTE 2 – The effective noise figure can be understood as the noise figure of an equivalent discrete optical amplifier placed at the end of the optical fibre, which produces the effective gain and the same ASE output power as the distributed amplification. Because the ASE produced within the fibre of the distributed amplifier is also partially reduced by the attenuation of this fibre, the ASE output power can be lower than physically realisable from such a discrete amplifier.

5.1.46 equivalent signal-spontaneous noise figure (only applicable to distributed amplifiers): The signal-spontaneous beat noise contribution to the effective noise figure.

5.1.47 ASE bandwidth: The difference between the two wavelengths at which a specified decrease of the output ASE from the peak value of the output ASE spectrum is observed.

NOTE 1 – A decrease of 30 to 40 dB is considered to be adequate.

NOTE 2 – Due to possible distortion of the measured spectrum, e.g., caused by pump leakage, a suitable extrapolation may be necessary.

5.1.48 in-band insertion loss (applicable to OA devices only): In an electrically unpowered condition, the signal insertion loss for the OA at a given input signal wavelength and a given signal power level.

NOTE 1 – This property can be described at a discrete wavelength or as a function of wavelength.

NOTE 2 – Care should be taken to exclude the output ASE contribution in the measurement of this parameter.

NOTE 3 – The in-band insertion loss is a function of the input signal power level.

5.1.49 maximum reflectance tolerable at input and output (applicable to OA devices only): The maximum reflectance of two identical reflectors simultaneously placed at both input and output ports of an OA, for which the OA still meets its specifications.

NOTE 1 – The measurement is performed with a given input signal optical power.

NOTE 2 – The noise figure is the most sensitive parameter to reflectance.

5.1.50 power wavelength band (applicable to power amplifiers only): The wavelength range within which the OA output signal power is maintained in the specified output power range, while the OA input signal power lies within the specified input power range.

5.1.51 available signal wavelength band (applicable to pre-amplifiers with optical filter(s) only): The resulting pre-amplifier OA wavelength band including the effect of the optical filter(s).

5.1.52 tuneable wavelength range (applicable to pre-amplifiers and optically amplified receivers with tuneable optical filter(s) only): The wavelength range within which the tuneable optical filter(s) inside the pre-amplifier OA can be tuned.

5.1.53 channel gain (for multichannel operation): Gain for each channel (at wavelength λj) in a specified multichannel configuration, expressed in dB.

Channel gain (G_j) can be expressed as follows (P_{ij} and P_{oj} being respectively the input and output power levels, in dBm, of the j-th channel and $j = 1, 2, \ldots n$; n total number of channels):

$$G_j = P_{oj} - P_{ij}$$

NOTE – Since the amplifier saturation power level is determined by the combined effect of the input signals at all wavelengths, the channel gain is dependent on the input power level of all signals.

Appendix I

Main differences between optical fibre amplifiers and semiconductor optical amplifiers

(This appendix does not form an integral part of this Recommendation)

This appendix discusses key differences between optical fibre amplifiers and semiconductor optical amplifiers. Broad classes of optical amplifiers including semiconductor amplifiers, optical fibre amplifiers using many types of rare earth dopants and other types of amplifiers are more fully treated in IEC/TR 61292-3, *Optical amplifiers – Part 3: Classification, characteristics and applications*. Additional information on distributed Raman optical amplifiers can be found in [ITU-T G.665].

I.1 General remarks

The physical mechanism providing gain in semiconductor optical amplifiers (SOAs) differs in various aspects from that of optical fibre amplifiers. Basically, SOAs are semiconductor lasers without the optical cavity feedback (the facets of the chip have an anti-reflection coating) and so the population inversion is generated in the active region by an electrical current. The stimulated emission of photons occurs via electron-hole recombination processes induced by the signal photons (at wavelengths included in the amplification band of the semiconductor material). The gain of semiconductor materials per unit length is much greater than that of rare-earth doped active fibres (REDFs); this accounts for the very short lengths of these devices: 0.5 mm against some tens of metres for REDFs. This fact, together with direct pumping via the bias current, renders the SOAs very simple and compact devices compared to OFAs that require long active fibres, laser sources for optical pumping and various fibre-optic components.

Moreover, SOAs are flexible in terms of operating wavelength and, depending on the composition of the semiconductor material, can be used in second (1310 nm) or third (1550 nm) wavelength region while, at present, high-grade OFAs operate typically around 1550 nm.

Another important difference is that the gain dynamics of SOAs is much faster than that of OFAs. The characteristic time required for the gain to recover completely is typically 200 ps in a SOA against 0.5-10 ms in an OFA. Consequently, SOAs are not immune from cross-saturation interference and saturation induced waveform distortion as OFAs are.

The fast gain-dynamics also implies that SOAs are strongly non-linear when operated in the saturation regime, contrary to OFAs which behave linearly in almost all the operating conditions of interest in optical telecommunications. This feature, which may be detrimental for applications of SOAs as line amplifiers in WDM systems, can be turned to advantage in the implementation of some important system functionalities, such as wavelength conversion, optical switching and demultiplexing

---

FOREWORD

The International Telecommunication Union (ITU) is the United Nations specialized agency in the field of telecommunications. The ITU Telecommunication Standardization Sector (ITU-T) is a permanent organ of ITU. ITU-T is responsible for studying technical, operating and tariff questions and issuing Recommendations on them with a view to standardizing telecommunications on a worldwide basis.

The World Telecommunication Standardization Assembly (WTSA), which meets every four years, establishes the topics for study by the ITU-T study groups which, in turn, produce Recommendations on these topics.

The approval of ITU-T Recommendations is covered by the procedure laid down in WTSA Resolution 1.

In some areas of information technology which fall within ITU-T's purview, the necessary standards are prepared on a collaborative basis with ISO and IEC.

NOTE

In this Recommendation, the expression "Administration" is used for conciseness to indicate both a telecommunication administration and a recognized operating agency.

Compliance with this Recommendation is voluntary. However, the Recommendation may contain certain mandatory provisions (to ensure e.g. interoperability or applicability) and compliance with the Recommendation is achieved when all of these mandatory provisions are met. The words "shall" or some other obligatory language such as "must" and the negative equivalents are used to express requirements. The use of such words does not suggest that compliance with the Recommendation is required of any party.

INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

ITU draws attention to the possibility that the practice or implementation of this Recommendation may involve the use of a claimed Intellectual Property Right. ITU takes no position concerning the evidence, validity or applicability of claimed Intellectual Property Rights, whether asserted by ITU members or others outside of the Recommendation development process.

As of the date of approval of this Recommendation, ITU had received notice of intellectual property, protected by patents, which may be required to implement this Recommendation. However, implementers are cautioned that this may not represent the latest information and are therefore strongly urged to consult the TSB patent database at http://www.itu.int/ITU-T/ipr/.

Finally, the geometry of SOA active guides does not match with that of optical fibres, producing quite high coupling losses with the fibres of the line and, due to the rectangular symmetry, can cause a marked PDG.

These structural differences among SOAs and OFAs do reflect on the performance of the devices. The scope of this appendix is to compare the characteristics of the two types of optical amplifiers. The list of the main optical parameters that should be considered to characterize and to compare the optical performance of the SOAs and EDFA is given in clause I.2. In the following, some indications are given about the values that can be associated with the mentioned SOA parameters and a comparison with the corresponding values for the OFAs. The values reported for OFAs are those typical for EDFAs.

In fact EDFAs represent the most mature OFA technology; EDFA technology is very well consolidated and EDFAs have been distributed on the market for several years and are produced by various manufacturers worldwide. On the other hand, SOAs are still at the R&D stage. Today, very few manufacturers produce them and the yield is very low. Even though the technology of SOAs is based on the very well assessed semiconductor laser technology, several important problems related to packaging, pig tailing, anti-reflection coating and polarization sensitivity have not found yet satisfactory mass scale production solutions.

Moreover, field trials with SOAs have started recently and there is today only a limited experience in using SOAs in the field [b-REID].

In this appendix, only the amplifying characteristics of the SOAs are taken into consideration as their possible use for the implementation of other functionalities is outside the scope of this appendix.

1.2 Comparison of optical performance characteristics between SOA and OFA

The values of SOA parameters reported in the following comparison are only indicative and reflect the present state-of-art in SOA technology; they can be subject to changes as SOA technology evolves.

- *Small-signal gain*

  The small-signal gain of SOAs is affected by the fibre-amplifier coupling loss (negligible in the case of EDFAs). Typical values are around 30 dB for lab prototypes, not including the coupling loss, and 10-15 dB fibre-to-fibre for pigtailed commercial units. For EDFA units, small-signal gain is typically greater than 30 dB.

- *Wavelength bandwidth*

  The width of wavelength band of SOAs is typically 40 nm or more, compared to 35 nm for EDFAs. SOAs can be used in second (1310 nm) or third (1550 nm) wavelength region, depending on the composition of the semiconductor material. Recent experiments on multi-quantum well SOAs demonstrated the possibility to achieve a wavelength bandwidth as wide as 120 nm.

- *Small-signal gain variation with wavelength*

  The use of very good anti-reflection coatings on the facets of the chip has allowed to reduce, in commercial SOAs, the peak-to-peak small-signal gain variation with wavelength to less than 1 dB over the width of the wavelength band.

- *Saturation output power*

  Saturation output power can be as high as +15 dBm for lab prototype SOAs (fibre-to-fibre). The obtained values for this parameter begin to be comparable to those of commercial EDFA units (+17/+20 dBm and more).

- *Noise figure (NF)*

  The NF of SOAs is affected by the quite high coupling loss with fibres. In SOA lab modules, values around 5-6 dB have been obtained while, in commercial pigtailed units, values ranging from 7 to 9 dB are typical. Typical values for commercial EDFAs are 5-6 dB for 980 nm pumped EDFAs, and 6-7 dB for 1480 nm pumped EDFAs.

- *Polarization dependent gain (PDG)*

  In lab SOA prototypes, the PDG has been reduced down to negligible values (0.2 dB). In commercial SOAs, typical values are 2-5 dB. PDG is negligible in EDFAs (0.2 dB).

- *Gain-dynamic crosstalk*

  Under study.

ANEXO B: AMPLIFICADOR BOOSTER

ITU-T

TELECOMMUNICATION
STANDARDIZATION SECTOR
OF ITU

G.663
(04/2011)

SERIES G: TRANSMISSION SYSTEMS AND MEDIA, DIGITAL SYSTEMS AND NETWORKS

Transmission media and optical systems characteristics – Characteristics of optical components and subsystems

Application-related aspects of optical amplifier devices and subsystems

5.1 Booster (power) amplifier

The booster (power) amplifier (BA) is a high saturation-power OA device to be used directly after the optical transmitter to increase its signal power level. The BA does not need stringent requirements for noise and optical filtering. The operation, administration and maintenance (OAM) functions for the BA may or may not be shared with the optical transmitter.

The application of BAs (often in conjunction with pre-amplifiers) is very attractive, especially in those cases where intermediate locations with active equipment are either undesirable or inaccessible, as in submarine systems. In any case, fewer intermediate locations imply easier maintenance for the network operator. The most direct and simple means to increase the available power budget is to use either a BA directly after the regular transmitter or an optically amplified transmitter (see clause 5.4).

Because of the relatively high level of input power, the undesirable amplified spontaneous emission (ASE) noise, inherently present due to the statistical process of photon generation inside the OA, is usually negligible. However, application of BAs may result in fibre non-linearity induced system penalties due to the high optical power levels produced by BAs and the long interactive lengths provided by the optical path.

ANEXO C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EDFA

ANEXO C-1: DATASHEET SINGLE-CHANNEL C- BAND EDFA AMPLIFIER

tyco Electronics

Fiber Optic Products Catalog

Catalog 1307895
Revised 9-04

AMP

Single-Channel C-Band EDFA

Product Facts

- High gain
- Low power consumption
- Low noise figure
- Integrated control electronics
- Input & output isolation
- Compact size (90 x 70 x 12 mm)
- Alarms & monitoring capability (TTL logic)
- PC controllable software
- Fully customizable design
- Designed for compliance to GR-1312-CORE

Applications

- Long Haul & Metro
- Pre-amplifier, Inline amplifier, or Booster amplifier
- Narrow Band Amplification
- R&D Laboratory
- Environments with PC Control Software

Tyco Electronics' Single-Channel C-Band EDFA is a low-cost, compact, and flexible optical amplifier solution optimized for a variety of applications within your network systems or subsystems. The high gain profile and low noise figure enables its use as a Pre, Inline, or Booster amplifier for metro and long haul applications. It is capable of signal gains up to 35 dBm with a noise figure of less than 4.5 dB and total output power of up to +10 dBm for inline applications 9 +17 dBm for booster applications.

This heightened performance EDFA is available as a cooled inline amplifier with powerful integrated control electronics or a gain block with input and/or output monitoring capabilities to meet your needs. The control electronics design includes a built-in laser and TEC drive circuit with alarms and monitors. The optional RS-232 electrical interface module and included software bundle are designed for control, ease of use, and/or evaluation in your laboratory.

Tyco Electronics is customer driven and is capable of delivering low-cost, customized functionality for your application. Tyco Electronics can quickly optimize the EDFA design to meet your specific optical, electrical, mechanical and environmental requirements. (Rack mount options available)

Product Specifications

Optical Parameters	Min	Typical	Max	Unit
Wavelength Range	1530		1570	nm
Input Power Range*	-30		-10	dBm
Gain Range**		25	35	dB
Output power (@ -10 dBm input power)§			10	dBm
Output Power Stability §§		0.2		dB
Polarization Dependent Gain			0.3	dB
Polarization Mode Dispersion			0.4	ps
Noise Figure		4.5		dB

Electrical Parameters	Min	Typical	Max	Unit
Pump Laser Diode Threshold Current			35	mA
Pump Laser Diode Forward Current			250	mA
Pump Laser Diode Reverse Voltage			2	V
Monitor Photodiode Forward Current	0.1		3	mA
Monitor Photodiode Reverse Voltage			20	V
Power Consumption			3.5	W

Environmental Parameters	Min	Typical	Max	Unit
Operating Temperature Range	-5		70	°C
Storage Temperature Range	-40		85	°C
Operating Humidity	5		95	%RH

* Booster amplifier range is -10 to +3 dBm
** Typical gain range of 15 to 25 dBm
§ Absolute maximum output power is +17 dBm
§§ Across the operating temperature range of -5°C - 70°C

ANEXO C-2: DATASHEET 8 to 64 CH WDM / C- BAND EDFA AMPLIFIER

Gain Flattened EDFA for R&D Application

The Optilab EDFA-GR series is a line of Gain-Flattening Benchtop Erbium Doped Fiber Amplifiers designed for laboratory testing and research applications of a DWDM system. When a standard EDFA is used to amplify multi-channel DWDM signals, the output power level of various channels will vary according to the gain profile of the erbium fiber. The gain variation can be as great as 6 dB in magnitude. The EDFA-GR is unique in its dual-stage amplification and internal Gain Flattening Filter (GFF) to compensate the erbium fiber gain variation. This design enables the EDFA-GR to reduce the gain variation to ± 0.5dB over its full operating wavelength range, 1529 nm to 1561 nm. Depending on the input power level of each channel, an EDFA-GR is able to amplify up to 64 DWDM channels. The EDFA-GR is a versatile and powerful fiber amplifier, incorporating four pump sources (two 980nm lasers and two 1480nm lasers). With all four pump lasers set to maximum operating current, the total output power level of the EDFA-GR can reach +24 dBm (200mW). To provide maximum flexibility, each pump laser's operating current can be individually adjusted for optimal gain characteristics for different input channels/power level requirements. Housed inside a laboratory-grade benchtop case, EDFA-GR has easy-to-use control interface and clear LCD display. This amplifier is constructed with 100% Telcordia-qualified components to ensure 15+ years of continuous operating life.

Features

- Compatible with 10 Gb/s and 40 Gb/s
- Channel spacing of 100 GHz or 50 GHz
- Flatten gain amplification from 1529 nm to 1561 nm
- Amplify 8 to 64 DWDM channels
- Output level can be varied up to +24 dBm
- Four pump sources can be controlled individually
- Two 980 nm pump lasers
- Two 1480 nm pump lasers

Gain Flattened EDFA for R&D Application | EDFA-GR

OPTIONS

EDFA-GR-xx-R

xx Output power level 18 – 24 dBm

TECHNICAL INFO

For technical questions and support, please contact us by email at:

sales@optilab.com

Optical Specifications	
Operating Range	1529 nm to 1561 nm
Amplifier Design	Dual-stage with Internal Gain Flattening Filter
Output Power Levels	+18 dBm to +24 dBm
Number of Pump Lasers	4 total, 980 nm (2) and 1480 nm (2)
Input Signal Level per Channel	-7 dBm to -15 dBm, for gain flatness to ± 0.5dB *
Number of Channels	Can accommodate 8 - 64
Optical Gain per Channel	13 dB to 21 dB, depending on input
Gain Flatness	± 0.5 dB
Noise Figure	5.0 dB typ.
Polarization Dependent Gain (PDG)	0.2 dB max.
Polarization Mode Dispersion (PMD)	0.5 ps max.
Power Stability	± 0.05 dB over 8 hours
Input/Output Isolation	30 dB min.
Optical Fiber	Single Mode, SMF-28

ANEXO C-3: DATASHEET PUMP SOURCE FOR EDFA AMPLIFIER

Opto-Link Corporation Ltd

Pump Laser Bench Top

(Wavelength: 980nm, 1480nm)

The Pump Laser Bench Top is designed as a pump source for Erbium-doped fiber amplifier (EDFA) applications, including high power EDFA wavelength division multiplexing and pre-amps broadband CATV networks.

Types

- 980 nm Pump Lasers
- 1480 nm Pump Lasers

Opto-Link Corporation Ltd

SPECIFICATIONS

Pump Lasers (980nm)

Parameter		Min.	Typ.	Max.
Output power:	OLPL - 98 - G -	100mW		350mW
Center wavelength			974nm	
Wavelength stability				±0.5nm
Output connector		FC/APC, others on request		
Output fiber		HI980		

Pump Lasers (1480nm)

Parameter		Min.	Typ.	Max.
Output power:	OLPL - 48 - I -	120mW		350mW
	OLPL - 48 - G -	140mW		350mW
Center wavelength (OLPL - 48 - I -)		1460nm		1480nm
3dB Spectral width (OLPL - 48 - I -)				8nm
Center wavelength (OLPL - 48 - G -)		1460nm		1490nm
Wavelength stability (OLPL - 48 - G -)				±1.0nm
10dB Spectral width (OLPL - 48 - G -)				4.5nm
Output connector		FC/APC, others on request		
Output fiber		SMF-28/PMF		

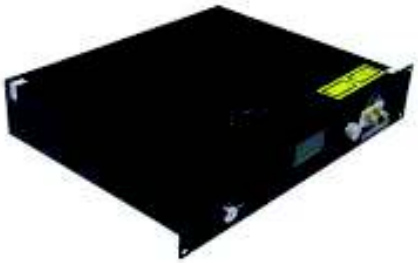
-G- version is grating stabilized and -I- version is integrated with isolator.

ANEXO D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RAMAN

ANEXO D-1: DATASHEET 2-CHANNEL C-BAND RAMAN AMPLIFIER

Optilab

2-Channel C-Band Raman Amplifier — Datasheet v1.0



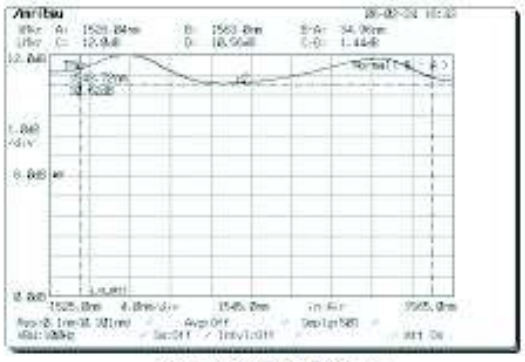
The Optilab 2-Channel C-band Raman Amplifier is a high power laser source for distributed amplification of optical signals in the C-band.

Two pumping wavelengths are combined to achieve gain-flattened optical amplification, ideal for use in DWDM networks amplification, ultra long-haul (ULH) and 40Gb/s network applications.

Optilab Raman Amplifiers are equipped with broadband pump/signal combiners and separate power monitoring for each channel. Each wavelength is powered by two pump lasers that are combined through polarization. The amplifiers are housed in 2U rack-mountable cases for easy installation. Remote operation via RS232 is included. Optional network accessibility via RJ45 is available.

Features

- Applications: DWDM amplification, ultra long-haul (ULH) networks, 40G networks, lab instrumentation/testing
- Incorporates 4 high power pump laser modules with 2 lasers combined for each wavelength
- Compatible with ITU-T G.652 (Standard SMF), ITU-T G.654, and ITU-T G.655 fiber
- LCD front panel digital display and status indicators
- Flat gain over low noise figure
- Standard RS232 interface
- Optional remote access via Ethernet



Sample Gain Profile for Optilab C-band Raman Amplifier

Ordering Information

- ARA-C-_ _-R
- Choose up to two of the following:
  - ❶ - 1426nm
  - ❷ - 1440nm
  - ❸ - 1444nm
  - ❹ - 1455nm

Technical Specifications

Technical Specifications	
Operating Wavelength Range	1525 nm - 1567 nm
Optical Gain	11 dB typical with 50km SMF-28
Gain Flatness	±1.0 dB
Pump Wavelength Channels	2 each
Pump Lasers per Channel	2 each
Pump power each channel	430 mW minimum
Total Pump Power	800 mW Typical
Effective Noise Figure	-1.3 dB Typical
Signal Insertion Loss	0.5 dB Typical
Degree of Polarization	5% Typical
Environment / Mechanical Specifications	
Temperature Range	0°C to +50°C (Operating) -10°C to +70°C (Storage)
Power Supply	80 – 240 V, 43 – 63 Hz AC
Dimensions	482mm (L) x 350mm (W) x 84mm (H)
Control	ACC, APC
Display	LCD: Total Output Power, Input power, Pump Laser Power, Current, and TEC Temperature
Computer Interface	RS232 (Labview Software and Cable included) Optional RJ45 port for remote operation via Ethernet
Protection	Pump Laser Over Temperature Shut Down, Loss of Signal warning
Optical Connectors	FC/APC, SC/APC
Optical Fiber	SMF-28

ANEXO D-2: RAMAN AMPLIFIER, RACKMOUNT RA-R

Raman Amplifier, Rackmount| RA-R

OPTIONS

RA-xx-yy-R

xx C, C-Band; CL, C+L - Band

yy Optical Signal Gain

TECHNICAL INFO

For technical info and support:

sales@optilab.com

www.optilab.com

WEB ORDER

To order, please click below.

OEQuest.com

Optilab Advantage

- Innovation
- Performance
- Quality
- Customization
- warranty

Optical Specifications	
Wavelength Range	RA-C: 1525 nm to 1565 nm, RA-CL: 1528 nm to 1605 nm
Signal Gain Average	RA-C: 11 dB to 13 dB, RA-CL: 10 dB to 12 dB
Gain Flatness	RA-C: ±0.75 dB, RA-CL: ±0.90 dB
Pump Laser	RA-C: 4; RA-CL: 6
Input Signal Level	-40 to +5 dBm per channel
Effective Noise Figure	~1.3 dB typ.
Polarization Mode Dispersion (PMD)	0.2 ps max.
Polarization Dependent Gain (PDG)	0.2 dB max.
Power Stability	±0.1 dB over 8 hours
Input / Output Isolation	30 dB min.
Optical Input Connectors	Bare fiber, SMF-28 with 3mm standard; High Power rated SC/APC, FC/APC, LC/APC (Optional)
Optical Output Port	SC/APC Connector, FC/APC, LC/APC (Optional)
Mechanical Specifications	
Operating Temperature	0° to +50° C
Storage Temperature	-10° to +70° C
Power Supply	80-240 V, 43-63 Hz AC, 40 - 58 V DC (Optional) Dual Power Supply Standard
Power Consumption	80 W max.
Display	Output Power Level, TEC Temperature
Controls/Monitoring	Pump Laser Temperature and Current
Communication Interface	RS-232 interface cabling from PC to rackmount units
Alarms	Over Temperature, Over Current
Dimensions	2RU: 19" x 20.5"x 3.5"

ANEXO D-3: 2-CHANNEL L- BAND RAMAN AMPLIFIER

Optilab

2-Channel L-Band Raman Amplifier — Datasheet v1.0

The Optilab 2-Channel L-band Raman Amplifier is a high power laser source for distributed amplification of optical signals in the L-band.

Two pumping wavelengths are combined to achieve gain-flattened optical amplification, ideal for use in DWDM networks amplification, ultra long-haul (ULH) and 40Gb/s network applications.

Optilab Raman Amplifiers are equipped with broadband pump/signal combiners and separate power monitoring for each channel. Each wavelength is powered by two pump lasers that are combined through polarization. The amplifiers are housed in 2U rack-mountable cases for easy installation. Remote operation via RS232 is included. Optional network accessibility via RJ45 is available.

Features

- Applications: DWDM amplification, ultra long-haul (ULH) networks, 40G networks, lab instrumentation/testing
- Incorporates 4 high power pump laser modules, with 2 lasers combined for each wavelength
- Compatible with ITU-T G.652 (Standard SMF), ITU-T G.654, and ITU-T G.655 fiber
- LCD front panel digital display and status indicators
- Flat gain over low noise figure
- Standard RS232 interface
- Optional remote interface via Ethernet

Ordering Information

- ARA-L-__-R
- Choose up to two of the following:
  - - 1455nm
  - - 1462nm
  - - 1487nm

Technical Specifications

Technical Specifications	
Operating Wavelength Range	1560 nm - 1605 nm
Optical Gain	11 dB typical with 50km SMF-28
Gain Flatness	±1.0 dB
Pump Wavelength Channesl	2 each
Pump Lasers per Channel	2 each
Pump power each channel	430 mW minimum
Total Pump Power	800 mW Typical
Effective Noise Figure	-1.3 dB Typical
Signal Insertion Loss	0.5 dB Typical
Degree of Polarization	5% Typical
Environment / Mechanical Specifications	
Temperature Range	0°C to +50°C (Operating) -10°C to +70°C (Storage)
Power Supply	80 – 240 V, 43 – 63 Hz AC
Dimensions	482mm (L) x 350mm (W) x 84mm (H)
Control	ACC, APC
Display	LCD: Total Output Power, Input power, Pump Laser Power, Current, and TEC Temperature
Computer Interface	RS232 (Labview Software and Cable Included) Optional RJ45 port for remote operation via Ethernet
Protection	Pump Laser Over Temperature Shut Down, Loss of Signal warning
Optical Connectors	FC/APC, SC/APC
Optical Fiber	SMF-28

ANEXO E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS SOA

ANEXO E-1: C-BAND SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIER, NON-LINEAR, SOA 1117S

THORLABS

C-Band Semiconductor Optical Amplifier, Non-linear

SOA1117S
SM Fiber

Description

Thorlabs' SOA1117S is a polarization-insensitive optical amplifier with advanced epitaxial wafer growth and opto-electronic packaging techniques that enable a high output saturation power, low noise figure, and large gain across a broad spectral bandwidth.

Specifications

T_{CHIP} = 25 °C, T_{CASE} = 0 - 70 °C

SOA1117S				
	Symbol	Min	Typical	Max
Operating Current	I_{OP}	-	500 mA	600 mA
Operating Wavelength Range (C-Band)	λ	1528 nm	-	1562 nm
Center Wavelength	λ_C	-	1550 nm	-
Small Signal Gain across λ @ P_{IN} = -20 dBm	G	15 dB	20 dB	-
Gain Ripple (p-p) @ I_{op}	δG	-	0.2 dB	0.5 dB
Polarization Dependent Gain	PDG	-	1 dB	2.5 dB
Noise Figure	NF	-	10 dB	11.5 dB
Forward Voltage	V_F	-	1.4 V	2.0 V
TEC Operation (Typ. / Max @ T_{CASE} = 25 °C / 70 °C)				
-TEC Current	I_{TEC}	-	0.2 A	1.5 A
-TEC Voltage	V_{TEC}	-	0.4 V	4.0 V
-Thermistor Resistance	R_{TH}	-	10 kΩ	-

Semiconductor Optical Amplifier | SOA

OPTIONS

SOA-xxxx-y-z

	Operation Wavelength
xxxx	1310 nm 1480 nm 1550 nm 1600 nm
y	S: Single Mode P: Polarization Maintaining
	Housing
z	M: Module B: Benchtop R: Rackmount

TECHNICAL INFO

For technical info and support:

Optical Specifications	
Operation Wavelength	1310 ±30 nm, SOA-1310 1480 ±30 nm, SOA-1480 1550 ±30 nm, SOA-1550 1600 ±30 nm, SOA-1600
Saturated Output Power @-3dB input	+16 dBm
Fiber-to-fiber Gain	Up to 20 dB @ small signal input
Noise Figure	7 dB typ.
Gain Ripple	0.3 dB typ.
Input Optical Return Loss	-55 dB typ.
Input / Output Isolation	30 dB min. (w/ Isolator option)
Polarization Dependent Gain (PDG)	0.5 dB max
Polarization Extinction Ratio (PM type)	20 dB typ.
Power Stability	±0.1 dB over 8 hours
Output Current Control	10% to 100% operating current
Mechanical Specifications	

ANEXO E-2: SOA 1310 nm OPTICAL AMPLIFIER

Amonics

AMONICS LTD.

Semiconductor Optical Amplifier (SOA)

Applications

- Booster and In-line Amplification in WDW Metro Network Systems
- Network Loss Compensation

Description

Amonics SOA is a polarization maintaining optical amplifier with high fiber-to-fiber gain. It is designed for transmitter applications to increase optical launch power to compensate for the loss of other optical devices.

The benchtop version incorporates a user-friendly front panel housing a LCD monitor display, key switch, power control knob and optical connectors. RS232 computer interface is also equipped on the rear panel. 1MHz with 10ns pulse width intensity modulation is available.

The OEM module version is an ideal building block for OEM system integration, especially in optical communication network and CATV applications. It requires only a single +5V power supply.

Key Features

- 1310nm and 1550nm wavelength coverage
- High fiber-to-fiber gain
- 1MHz with 10ns pulse width
- Modulation available
- PM Panda fiber input
- Good spectral stability
- Compact size
- Good performance cost ratio

SOA Amplifier Technical Specifications

Operating Wavelength Range	1290 to 1325 nm
AvailableOutput Power Levels	+10 dBm minimum
Input Signal Level	-15 to 3 dBm per channel
Date Rate	155 Mbps to 10 Gbps.
Noise Figure	7 dB typical
Input /Output Isolation	30 dB minimum

Environment / Mechanical Specifications

Temperature Range	0°C to +50°C (operation), -10°C to +70°C (storage)
Power Supply	80 – 240 V, 43 – 63 Hz AC, 40 - 58V DC (Optional)
Power Consumption	40 W Maximum
Housing Dimensions	1RU: 19"(W) x 14"(D) x 1.75"(H)
Control / Monitoring	Laser Temperature and Current
Computer Interface	Ethernet for web interface (Optional)
Display	Output Power Level, TEC Temperature
Alarms	Over Temperature , Over Current
Optical Connectors	FC/APC, SC/APC or LC/UPC

AMONICS LT

plifier (SOA)

SOA Specifications

	ASOA13-20	ASOA15-15	ASOA15-20
Operation Wavelength	1300nm to 1360nm	1530nm to 1565nm	1530nm to 1565nm
Saturated Output Power @ -3dB input	Typ. 13dBm, Min. 11dBm	Typ. 16dBm, Min. 14dBm	Typ. 16dBm, Min. 14dBm
Fiber-to-fiber Gain	Min. 20dB	Min. 15dB	Min. 20dB
Noise Figure @0dB	Typ. 12dB, Max. 14dB	Typ. 8dB, Max. 9dB	Typ. 8dB, Max. 9dB
Gain Ripple	Typ. 0.3, Max. 0.6	Typ. 0.25, Max. 0.5	Typ. 0.25, Max. 0.5
Input Optical Return Loss	Typ. -55		
Input / Output Isolation	Min. 30dB (standard), Min. 40dB (optional)		

ANEXO F: SIMULACIONES DE LOS AMPLIFICADORES ÓPTICOS

Los Anexos correspondientes a las simulaciones de cada uno de los amplificadores se encuentran en formato digital en el CD adjunto a este documento.

ANEXO F-1: SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR EDFA EN SUS DIFERENTES ESCENARIOS.

ANEXO F-2: SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR RAMAN EN SUS DIFERENTES ESCENARIOS.

ANEXO F-3: SIMULACIÓN DEL AMPLIFICADOR SOA EN SUS DIFERENTES ESCENARIOS.