

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN UN ENLACE DE BAJADA XGS-PON CON  
AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA HOA**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT  
POPAYÁN  
2021**

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN UN ENLACE DE BAJADA XGS-PON CON  
AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA HOA**

**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

Trabajo de Grado en la modalidad de Investigación para optar al título de  
Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Director  
**M. Sc. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ AGREDO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
GRUPO I+D NUEVAS TECNOLOGÍAS EN TELECOMUNICACIONES - GNTT  
POPAYÁN  
2021**

Página de aceptación

El Director y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio.

---

M. Sc. GUSTAVO ADOLFO GÓMEZ  
AGREDO  
Director

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

Popayán, \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2021.

*Con todo cariño dedico de manera muy especial este logro a  
Mi padre, mi madre, hermano, mis abuelitos desde el cielo y toda mi familia  
por darme su apoyo, paciencia y amor incondicional,  
Y a cada una de las personas que hizo parte de de este camino  
Y confiaron en mi. Gracias totales...*

*Adrián Alexander Burbano Coral*

*Este logro va dedicado a cada una de las personas que siempre  
Me apoyaron y me dieron la mano en los momentos más difíciles,  
A mis padres, por brindarme su apoyo incondicional y su incansable  
Esfuerzo por darme lo mejor y hacerme feliz todos los días,  
A mis abuelos, por acompañarme desde el primer día  
Y siempre tener palabras de aliento para mi,  
y en especial a todos mis familiares que ya no están conmigo  
pero que siempre me acompañan desde el cielo  
y que son mis guías en cada paso que doy...*

*Miguel Alejandro Figueroa Valenzuela*

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos y estima al Ms.C. Gustavo Adolfo Gómez Agredo, director del proyecto, por su orientación y su apoyo en el proceso.

Al comité del programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, al grupo de Investigación de nuevas Tecnologías en Telecomunicaciones – GNTT, por su colaboración en el presente trabajo y a todos los ingenieros y profesores que hicieron parte del proceso en la institución y que se recordarán con mucha alegría y aprecio.

También expresan un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos, por su acompañamiento, paciencia y apoyo incondicional, y sin los cuales no hubiera sido posible culminar con satisfacción este proceso.

# CONTENIDO

	pág.
<b>1. GENERALIDADES DE SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICA, ARQUITECTURAS DE RED FSAN, AMPLIFICACIÓN Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO</b>	<b>5</b>
1.1. ARQUITECTURAS DE RED FSAN	5
1.1.1. XG-PON1	8
1.1.2. XGS-PON	10
1.2. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA	12
1.2.1. Amplificador de Fibra Dopada de Erblio (EDFA)	17
1.2.2. Amplificador Raman (RFA)	20
1.2.3. Amplificador Óptico Híbrido – HOA	23
1.3. FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN ÓPTICA	26
1.3.1. Efectos lineales	26
1.3.2. Efectos No Lineales	31
<b>2. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO, METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>36</b>
2.1. MONITOREO DEL DESEMPEÑO ÓPTICO	36
2.1.1. Parámetros de Desempeño Óptico	37
2.1.2. Métricas para el Monitoreo Óptico	39
2.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	41
2.2.1. Herramientas de simulación	42
2.2.2. Metodología de la Simulación	45
2.2.3. Algoritmo de la simulación	47
2.3. MÉTRICAS, ESCENARIO DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO	47

2.3.1. Métricas	48
2.3.2. Casos de estudio	61
<b>3. ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS</b>	<b>63</b>
3.1. AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA EN SERIE/CASCADA	64
3.1.1. Caso 1. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado	67
3.1.2. Caso 2. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Contra-Propagado	79
3.1.3. Caso 3. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional	92
3.2. AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA EN PARALELO	98
3.2.1. Caso 1. Amplificación en Paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado	100
3.2.2. Caso 2. Amplificación en paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps en Contra-Propagación	107
3.2.3. Caso 3. Amplificación en paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional	114
3.3. AMPLIFICACIÓN HIBRIDA MIXTA	120
3.3.1. Escenario de simulación, amplificación Mixta Serie-Paralelo, EDFA-Raman a 10 Gbps	121
3.3.2. Escenario de simulación, amplificación Mixta Paralelo-Serie, EDFA-Raman a 10 Gbps	127
<b>4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>135</b>
4.1. CONCLUSIONES	135
4.2. RECOMENDACIONES	139
4.3. TRABAJOS FUTUROS	140
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>141</b>

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1.1. Hoja de ruta de evolución de redes PON de FSAN [1].	6
Figura 1.2. Escenario de aplicación de redes FTTx en redes XG-PON [5].	8
Figura 1.3. Diagrama de coexistencia de GPON y XG-PON [5].	9
Figura 1.4. Asignación espectral sistemas PON [9].	10
Figura 1.5. Diagrama referencial de un AO [12].	12
Figura 1.6. Proceso emisión estimulada: (a). Interacción entre partículas. (b). Proceso en cavidad óptica. [12].	13
Figura 1.7. Sistema de bombeo óptico [12].	13
Figura 1.8. Amplificador óptico en aplicación multicanal [13].	15
Figura 1.9. Configuraciones de amplificadores ópticos (a). Amplificador de Línea, (b). Amplificador de Potencia, (c). Preamplificador [14].	16
Figura 1.10. Esquema de un dispositivo EDFA [21].	18
Figura 1.11. Arquitectura de bombeo Co-Propagación [22].	19
Figura 1.12. Arquitectura de bombeo en Contra-Propagación [22].	19
Figura 1.13. Arquitectura de bombeo Bidireccional [22].	20
Figura 1.14. Amplificador EDFA de modelo físico MULTICOM [23].	20
Figura 1.15. Proceso físico de la Dispersión Estimulada de Raman, SRS [25].	21
Figura 1.16. Esquema de amplificación Raman [27].	22
Figura 1.17. Amplificador Raman CISCO, para contra y Co-Propagación tipo DRA [30].	22
Figura 1.18. Amplificador HOA en cascada [31].	24
Figura 1.19. Amplificador HOA en paralelo [31].	25
Figura 1.20. Amplificador HOA FINISAR [34].	25
Figura 1.21. Clasificación efectos lineales [27].	26

Figura 1.22. Dispersión por modo de polarización en fibras tipo monomodo [36].	27
Figura 1.23. Compensación de CD en (a). Pre-Compensación, (b). Compensación simétrica, (c). Post-Compensación [40].	29
Figura 1.24. Curva de Atenuación en función de la Longitud de Onda [35].	30
Figura 1.25. Clasificación de los Efectos No Lineales [35].	31
Figura 1.26. Ampliación y compresión de pulsos debido a SPM [54].	32
Figura 1.27. XPM sobre tres canales ópticos [54].	32
Figura 1.28. Efecto en señales (a) Originales, (b) Por efecto de FWM [43].	33
Figura 1.29. Efecto de transferencia de energía debido a SRS [45].	34
Figura 1.30. Onda dispersada debido al efecto de SBS [43].	34
Figura 2.1. Relación Factor Q vs BER [47].	38
Figura 2.2. Diagrama de ojo [51].	39
Figura 2.3. Factores paramétricos incidentes en el desempeño de la red [52].	40
Figura 2.4. Esquema de ruta crítica o diagrama de PERT [54].	42
Figura 2.5. Algoritmo de simulación para la herramienta OptSim [57].	47
Figura 2.6. Escenario general para arquitecturas GPON [42].	48
Figura 2.7. Esquema Fibras Monomodo y Multimodo [66].	52
Figura 2.8. Splitters en Cascada.	53
Figura 2.9. Escenario general del sistema óptico a 10 Gbps implementado en simulador OptSim.	55
Figura 2.10. Diagrama en bloques (a). OLT, (b). ONT.	56
Figura 2.11. Parámetros <i>Splitters</i> herramienta OptSim.	57
Figura 2.12. Parámetros fibra de última milla a 250 metros de ONT.	57
Figura 2.13. Parámetros bloque ONT.	58
Figura 2.14. Diagrama (a) Ojo Back-to-Back. (b) Espectro óptico Back-to-Back.	59
Figura 2.15. Diagrama (a) ojo en la recepción, (b) Espectro óptico en la recepción.	61

Figura 2.16. Escenarios de simulación y casos de estudio.	62
Figura 3.1. Escenario de Simulación Amplificación EDFA-Raman a 10 Gbps.	65
Figura 3.2. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Co-Propagada EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.	71
Figura 3.3. BER vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.	72
Figura 3.4. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.	73
Figura 3.5. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.	73
Figura 3.6. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA modo En-Línea. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	74
Figura 3.7. Comparación (a) Diagramas de ojo, (b) Diagrama Espectral para el mejor caso modo En-Línea. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	75
Figura 3.8. Presencia fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.	76
Figura 3.9. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.	77
Figura 3.10. Presencia Fenómeno SPM modo En-Línea (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.	78
Figura 3.11. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.	83
Figura 3.12. BER vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.	84

Figura 3.13. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps. 85

Figura 3.14. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps. 86

Figura 3.15. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA modo En-Línea. Fuente de bombeo Contra-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps. 87

Figura 3.16. Comparación (a) Diagramas de ojo, (b) Diagrama Espectral para el mejor caso modo En-Línea. Fuente de bombeo Contra-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps. 88

Figura 3.17. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps. 89

Figura 3.18. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps. 90

Figura 3.19. Presencia Fenómeno SPM modo En-Línea (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps. 91

Figura 3.20. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA, modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagada, para 1 canal a 10 Gbps. 93

Figura 3.21. Diagramas en Transmisión y Recepción (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 94

Figura 3.22. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo EDFA bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 95

Figura 3.23. Diagramas en Transmisión y Recepción Enlace a 180 km (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 97

Figura 3.24. Escenario de Simulación, amplificación en Paralelo EDFA-Raman a 10 Gbps. 99

- Figura 3.25. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Co-Propagado EDFA-Raman en Paralelo, para 1 canal a 10 Gbps. 102
- Figura 3.26. BER vs. Potencia de Recepción (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman Paralelo de 1 canal a 10 Gbps. 103
- Figura 3.27. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 103
- Figura 3.28. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 104
- Figura 3.29. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 105
- Figura 3.30. Presencia fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 106
- Figura 3.31. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Paralelo, para 1 canal a 10 Gbps. 109
- Figura 3.32. (a) BER vs. Potencia de Recepción Booster, (b) BER vs. Potencia de Recepción Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps. 110
- Figura 3.33. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 111
- Figura 3.34. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 111
- Figura 3.35. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 112
- Figura 3.36. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps. 113
- Figura 3.37. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA, modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagada, para 1 canal a 10 Gbps. 115

- Figura 3.38. Diagramas en Transmisión y Recepción (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 116
- Figura 3.39. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 117
- Figura 3.40. Diagramas en Transmisión y Recepción Enlace a 300 km (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 120
- Figura 3.41. Escenario de simulación, amplificación Mixta Serie-Paralelo, EDFA-Raman a 10 Gbps. 121
- Figura 3.42. Amplificación Sección Serial/Cascada EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 123
- Figura 3.43. Amplificación Mixta EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 125
- Figura 3.44. Presencia Fenómeno SPM sección en Cascada (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 126
- Figura 3.45. Presencia Fenómeno SPM amplificación Mixta (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 127
- Figura 3.46. Escenario de simulación, amplificación Mixta Paralelo-Serie, EDFA-Raman a 10 Gbps. 128
- Figura 3.47. Amplificación Mixta sección paralela EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 129
- Figura 3.48. Amplificación Mixta EDFA-Raman implementación inversa (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 131
- Figura 3.49. Presencia Fenómeno SPM sección Paralela (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 132
- Figura 3.50. Presencia Fenómeno SPM amplificación Mixta Inversa (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps. 133

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.1. Comparativo Tecnologías NG-PON1 vs NG-PON2 [4,5,6]	8
Tabla 1.2. Comparativo características GPON vs. NG-PON	11
Tabla 1.3. Parámetros Amplificador EDFA de modelo físico MULTICOM [23]	20
Tabla 1.4. Parámetros Amplificador Raman Cisco [30].	23
Tabla 1.5. Parámetros Amplificador Raman Cisco [27].	25
Tabla 1.6. Comparativo tecnologías ópticas para sistemas DWDM [32].	26
Tabla 2.1. Software comercial de simulación para sistemas ópticos [54].	45
Tabla 2.2. Software libre de simulación para sistemas ópticos [54].	45
Tabla 2.3. Parámetros Terminales de Línea Óptica OLT XGS-PON.	49
Tabla 2.4. Parámetros Moduladores Ópticos XGS-PON.	50
Tabla 2.5. Especificaciones estándar de fuentes de fibra óptica.	51
Tabla 2.6. Parámetros de Multiplexores.	51
Tabla 2.7. Parámetros de fibra óptica.	53
Tabla 2.8. Parámetros de fibra óptica.	54
Tabla 2.9. Parámetros de Terminal de Red Óptica.	54
Tabla 2.10. Características generales del escenario inicial de simulación XGS-PON.	55
Tabla 2.11. Resultados iniciales del escenario general de simulación XGS-PON en el enlace back to back.	58
Tabla 2.12. Resultados del escenario general de simulación en el extremo receptor XGS-PON.	60
Tabla 3.1. Parámetros variables y fijos del sistema.	63

Tabla 3.2. OPM dependientes de la longitud de la fibra dopada EDFA de 1 canal a 10 Gbps.	66
Tabla 3.3. OPM dependientes de la longitud de la fibra Raman LRA de 1 canal a 10 Gbps.	66
Tabla 3.4. Variación de potencias EDFA-Raman y combinación de longitudes de onda de fuentes de bombeo.	67
Tabla 3.5. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Booster Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	69
Tabla 3.6. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Pre-Amplificado Co-Propagado, EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	69
Tabla 3.7. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA En-Línea Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal de 10 Gbps.	70
Tabla 3.8. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	79
Tabla 3.9. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Booster, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	81
Tabla 3.10. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Pre-Amplificado, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	81
Tabla 3.11. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA En-Línea, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	82
Tabla 3.12. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	91
Tabla 3.13. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.	92
Tabla 3.14. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.	92
Tabla 3.15. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.	96
Tabla 3.16. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, en bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	96

Tabla 3.17. Parámetros para una red XGS-PON con amplificación paralela HOA EDFA-Raman.	100
Tabla 3.18. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Booster Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	101
Tabla 3.19. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Pre-Amplificado Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	101
Tabla 3.20. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster y Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	107
Tabla 3.21. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Booster Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	108
Tabla 3.22. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Pre-Amplificado Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.	108
Tabla 3.23. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster y Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.	114
Tabla 3.24. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA paralelo modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.	114
Tabla 3.25. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA paralelo modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.	115
Tabla 3.26. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.	118
Tabla 3.27. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, en bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	118
Tabla 3.28. Región ideal de operación HOA sección Serial/Cascada, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	123
Tabla 3.29. Región ideal HOA para una amplificación Mixta, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	124
Tabla 3.30. Región ideal de operación HOA sección Paralela, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	128
Tabla 3.31. Región ideal de operación HOA amplificación Mixta implementación inversa, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.	130
Tabla 4.1. Robustez de la Solución para una red XGS-PON con amplificación HOA.	138



## ACRÓNIMOS

<b>ADSS:</b>	Cable de Fibra Óptica Todo Dieléctrico Autosoportado ( <i>All Dielectric Self-Supported</i> ).
<b>ASE:</b>	Emisión Espontánea Amplificada ( <i>Amplified Spontaneous Emission</i> ).
<b>BA:</b>	Booster Amplifier ( <i>Amplificador Booster</i> ).
<b>BER:</b>	Tasa de Transmisión de Errores de Bit ( <i>Bit Error Rate</i> ).
<b>CD:</b>	Dispersión Cromática ( <i>Chromatic Dispersion</i> ).
<b>CW:</b>	Láser de Onda Continua ( <i>Continuous Wave Laser</i> ).
<b>DCF:</b>	Fibra Compensadora de Dispersión ( <i>Dispersion Compensating Fiber</i> ).
<b>DCM:</b>	Unidad de Compensación de Dispersión ( <i>Dispersion Compensation Module</i> ).
<b>DFA:</b>	Amplificador de Fibra Dopada ( <i>Doped Fiber Amplifier</i> ).
<b>DGD:</b>	Retardo de Grupo Diferencial ( <i>Differential Group Delay</i> ).
<b>EDFA:</b>	Amplificador de Fibra Dopada de Erblio ( <i>Erbium Doped Fiber Network</i> ).
<b>FSAN:</b>	Red de Acceso de Servicio Completo ( <i>Full Service Access Network</i> ).
<b>FTTB:</b>	Fibra Hasta el Edificio ( <i>Fiber To The Building</i> ).
<b>FTTCell:</b>	Fibra Hasta el Sitio de la Celda ( <i>Fiber To The Cell</i> ).
<b>FTTdp:</b>	Fibra Hasta el Punto de Distribución ( <i>Fiber To The Distribution Point</i> ).
<b>FTTH:</b>	Fibra Hasta el Hogar ( <i>Fiber To The Home</i> ).
<b>FTTO:</b>	Fibra Hasta la Oficina ( <i>Fiber To The Office</i> ).
<b>FTTx:</b>	Fibra Hasta la x ( <i>Fiber Through The x</i> ).
<b>GPON:</b>	Red Óptica Pasiva con Capacidad Gigabit ( <i>Gigabit-capable Passive Optical Network</i> ).
<b>HDTV:</b>	Televisión de Alta Televisión ( <i>High Definition Television</i> ).
<b>HOA:</b>	Amplificador Óptico Híbrido ( <i>Hybrid Optical Amplifier</i> ).
<b>IP:</b>	Protocolo de Internet ( <i>Internet Protocol</i> ).
<b>ISI:</b>	Interferencia Entre Símbolos ( <i>Inter Symbol Interference</i> ).
<b>ITU-T:</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones ( <i>International Telecommunications Union - Telecommunications</i> ).
<b>LA:</b>	Amplificador de Línea ( <i>Line Amplifier</i> ).
<b>LED:</b>	Diodo Emisor de Luz ( <i>Light Emitting Diode</i> ).
<b>LRA:</b>	Amplificador Raman Discreto o Agrupado ( <i>Discrete or Lumped Raman Amplifier</i> ).
<b>MZI:</b>	Interferómetro o Modulador Mach-Zehnder ( <i>Mach-Zehnder Interferometer</i> ).
<b>NAP:</b>	Punto de Acceso de Red ( <i>Network Access Point</i> ).
<b>NB-HA:</b>	Amplificador Híbrido de Banda Estrecha ( <i>Narrowband Hybrid Amplifier</i> ).
<b>NF:</b>	Figura de Ruido ( <i>Noise Figure</i> ).
<b>NG-PON:</b>	Red Óptica Pasiva de nueva Generación ( <i>Next Generation Passive Optical Network</i> ).
<b>NG-PON1:</b>	Red Óptica Pasiva de nueva Generación Fase 1 ( <i>Next Generation Passive Optical Network Phase 1</i> ).
<b>NG-PON2:</b>	Red Óptica Pasiva de nueva Generación Fase 2 ( <i>Next Generation</i>

	<i>Passive Optical Network Phase 2).</i>
<b>NRZ:</b>	<i>No Retorno a Cero (non Return to Cero).</i>
<b>NZ-DSF:</b>	<i>Fibra de Dispersión Desplazada No Nula (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber).</i>
<b>OA:</b>	<i>Amplificador Óptico (Optical Amplifier).</i>
<b>OAN:</b>	<i>Red de Acceso Óptico (Optical Access Network).</i>
<b>OD:</b>	<i>Demultiplexor Óptico (Optical Demultiplexer).</i>
<b>ODN:</b>	<i>Red de Distribución Óptica (Optical Distribution Network).</i>
<b>OEO:</b>	<i>Óptico-Eléctrico-Óptico (Optical-Electrical-Optical).</i>
<b>OFA:</b>	<i>Amplificador de Fibra Óptica (Optical Fiber Amplifier).</i>
<b>OLT:</b>	<i>Terminal de Línea Óptica (Optical Line Terminal).</i>
<b>OM:</b>	<i>Multiplexor Óptico (Optical Multiplexer).</i>
<b>ONE:</b>	<i>Elementos de Red Ópticos (Optical Network Elements).</i>
<b>ONT:</b>	<i>Terminal de Red Óptica (Optical Network Terminal).</i>
<b>ONU:</b>	<i>Unidad de Red Óptica (Optical Network Unit).</i>
<b>OOK:</b>	<i>Llaveo de Encendido Apagado (On-Off Keying).</i>
<b>OPM:</b>	<i>Parámetros de Monitoreo Óptico (Optical monitoring Parameters).</i>
<b>OSNR:</b>	<i>Relación Señal a Ruido Óptico (Optical Signal to Noise Ratio).</i>
<b>PA:</b>	<i>Pre-Amplificador (Pre-Amplifier).</i>
<b>PDH:</b>	<i>Jerarquía Digital Plesiócrona (Plesiochronous Digital Hierarchy).</i>
<b>PMD:</b>	<i>Dispersión por Modo de Polarización (Polarization Mode Dispersion).</i>
<b>PON:</b>	<i>Red Óptica Pasiva (Passive Optical Network).</i>
<b>POTS:</b>	<i>Servicios Telefónicos Antiguos Sencillos (Plain Old Telephone Services).</i>
<b>PtMP:</b>	<i>Punto a multipunto (Point To Multipoint).</i>
<b>PtP:</b>	<i>Punto a Punto (Point to Point).</i>
<b>Q Factor:</b>	<i>Factor de Calidad (Quality Factor).</i>
<b>QoS:</b>	<i>Calidad del Servicio (Quality of Service).</i>
<b>RFA:</b>	<i>Amplificador de Fibra Raman (Raman Fiber Amplifier).</i>
<b>RZ:</b>	<i>Retorno a Cero (Return to Zero).</i>
<b>SBS:</b>	<i>Dispersión Estimulada de Brillouin (Stimulated Brillouin-Scattering).</i>
<b>SDH:</b>	<i>Jerarquía Digital Síncrona (Synchronous Digital Hierarchy).</i>
<b>SPM:</b>	<i>Automodulación de Fase (Self-Phase Modulation).</i>
<b>SRS:</b>	<i>Dispersión Estimulada de Raman (Stimulated Raman-Scattering).</i>
<b>TWDM:</b>	<i>Multiplexación por División de Longitud de Onda y de Tiempo (Time and Wavelength Division Multiplexed).</i>
<b>VoD:</b>	<i>Video Bajo Demanda (Video On Demand).</i>
<b>VoIP:</b>	<i>Voz Sobre Protocolo de Internet (Voice Over IP).</i>
<b>WBF:</b>	<i>Filtros de Bloqueo de Longitud de Onda (Wavelength Blocking Filters).</i>
<b>WB-HA:</b>	<i>Amplificador Híbrido de Banda Ancha (Wideband Hybrid Amplifier).</i>
<b>WDM:</b>	<i>Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing).</i>
<b>WDM1r:</b>	<i>Filtro Óptico de Coexistencia Multiplexado o Filtro de Multiplexación por División de Longitud de Onda (Wavelength Division Multiplexing Filter).</i>
<b>XG-PON:</b>	<i>Red Óptica Pasiva con Capacidad de 10 Gigabit (10-Gigabit-capable Passive Optical Network).</i>
<b>XGS-PON:</b>	<i>Red Óptica Pasiva Simétrica con Capacidad de 10 Gigabit (10-</i>

**XPM:** *Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network*  
**xPON:** *Modulación de Fase Cruzada (Cross Phase Modulation)*  
*Red Óptica Pasiva x (x Passive Optical Network).*

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de Telecomunicaciones basados en fibra óptica son considerados como el futuro de las comunicaciones por parte de proveedores de servicios y usuarios debido, en gran parte, a la constante evolución que presentan con respecto a los medios de transmisión basados en cobre o señales radio, aumentando su capacidad, ancho de banda, seguridad y escalabilidad. Organizaciones como FSAN, se han dado a la tarea de estandarizar e implementar las redes ópticas de nueva generación denominadas NG-PON, que cuentan con tres tipos de arquitecturas: XG-PON, XGS-PON y TWDM-PON, cada una con características diferentes a nivel de capacidad de acceso; entre ellas, XGS-PON se configura como el estándar más idóneo para el soporte de tecnologías ópticas de nueva generación, pues satisface la demanda de velocidad, capacidad y distancia, garantizando servicios de voz, datos y video de alta calidad.

En las arquitecturas de Redes Ópticas Pasivas (PON), los amplificadores ópticos más utilizados están basados en dispositivos de fibra dopados de Erblio (EDFA), debido a su relación Costo/Beneficio y al rendimiento. Estos dispositivos pueden ser configurados de tres maneras posibles para estimular la fibra dopada con Erblio: i) Co-Propagación, ii) Contra-Propagación y iii) Bidireccional.

No obstante, la reaparición de tecnologías de amplificación óptica como los de tipo Raman, que habían sido descartados anteriormente por sus altos costos de implementación y la caída de precios de los módulos EDFA, está siendo adoptada nuevamente como una tecnología prometedora en el mejoramiento de las características de los sistemas de telecomunicaciones ópticos, proponiendo su coexistencia sobre un mismo sistema y dando origen a los Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA). Sin embargo, poco se ha mencionado sobre los efectos de la implementación de este tipo de amplificación híbrida dentro de las arquitecturas de red tipo XGS-PON.

Teniendo en cuenta los factores mencionados anteriormente, el presente trabajo de investigación realizará un análisis de desempeño sobre el efecto que puede generar la implementación de amplificadores híbridos HOA, en el enlace de bajada de una arquitectura de red XGS-PON.

A continuación, se describe el contenido de este informe distribuido en cuatro capítulos, de acuerdo con la información obtenida en el desarrollo de la investigación.

## **Capítulo 1. Generalidades sistemas de comunicación óptica basados en arquitecturas de red FSAN, amplificación y parámetros de monitoreo óptico.**

En este capítulo se definen las principales características de los sistemas de comunicación óptica definidos por FSAN de siguiente generación, se definen las clases de amplificadores ópticos que pueden ser implementados de manera individual o combinada sobre estos sistemas y los parámetros que permiten el monitoreo de las penalidades de potencia, que pueden producir limitaciones sobre el desempeño de la red.

## **Capítulo 2. Parámetros de desempeño óptico, metodología de simulación y casos de estudio.**

En este apartado se seleccionan las diferentes metodologías implementadas para el estudio de los parámetros de desempeño y monitoreo óptico, las metodologías utilizadas para la implementación de los sistemas ópticos para su posterior simulación con base en los escenarios de simulación y casos de estudio determinados.

## **Capítulo 3. Análisis, simulación y resultados.**

Contiene los resultados obtenidos al realizar variaciones de longitud de onda, potencia y posición de los componentes amplificadores, constitutivos de la amplificación híbrida de los escenarios de simulación propuestos, respecto a los parámetros de monitoreo óptico.

## **Capítulo 4. Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.**

Se establecen las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros, con relación a los diferentes resultados obtenidos en la red óptica híbrida que permitieron evaluar el desempeño y las degradaciones que puede experimentar la red óptica amplificada, con el objetivo de establecer las configuraciones más convenientes sobre el sistema.

## ABSTRACT

Telecommunication systems based on optical fiber are considered the future of communications by service providers and users due, largely, to the constant evolution they have compared to transmission media based on copper or radio signals: an increase of capacity, bandwidth, security and scalability. Organizations such as FSAN have set out to standardize and implement the new generation optical networks called NG-PON, which have three types of architectures: XG-PON, XGS-PON and TWDM-PON, each with different characteristics of level access capacity. Among them, XGS-PON is consolidated as the most suitable standard for the support of the new generation optical technologies, as it satisfies the demand for speed, capacity and distance, guaranteeing high quality voice, data and video services.

In Passive Optical Network (PON) architectures, the most widely used optical devices are based on Erbium Doped Fiber Amplifiers (EDFA), due to their cost-benefit ratio and performance. These devices can be configured in three possible ways to stimulate the Erbium-doped fiber: 1) co-propagation, 2) counter-propagation and 3) bidirectional.

Nevertheless, the reappearance of optical amplification technologies like the Raman type—which had previously been discarded due to their high costs of implementation and the fall in prices of the EDFA modules—is being adopted again as a promising technology in improving the characteristics of optical telecommunications systems, by proposing its coexistence on a single system and originating the Hybrid Optical Amplifiers (HOA). However, little has been mentioned about the effects of implementing this type of hybrid amplification within XGS-PON-type network architectures.

Taking into account the aforementioned factors, it is necessary to investigate the effect generated by the implementation of HOA hybrid on the downstream performance of an XGS-PON network architecture.

The following is a description of the contents of this report distributed in four chapters, according to the information obtained in the development of the research.

## **Chapter 1. Generalities of optical communication systems based on fsan network architectures, amplification and optical monitoring parameters.**

The main characteristics of next-generation FSAN-defined optical communication systems are specified, in addition to defining the classes of optical amplifiers that can be implemented individually or combined on these systems and the parameters that allow the monitoring of power penalties that can produce limitations on the network performance.

## **Chapter 2. Optical performance parameters, simulation methodology and case studies.**

In this section the different methodologies implemented for the study of performance parameters and optical monitoring, the methodologies used for the implementation of optical systems for subsequent simulation based on the simulation scenarios and case studies determined are selected.

## **Chapter 3. Simulation, analysis and results.**

On this chapter are the results obtained regarding the optical monitoring parameters when variations of wavelength, power and position of amplifier components that make up the hybrid amplification of the simulation scenarios proposed above.

## **Chapter 4. Conclusions, recommendations and future works.**

Conclusions, recommendations and future works are established, in relation to the different results obtained in the hybrid optical network that allowed to evaluate the performance and degradations that the amplified optical network may experience, with the objective of establishing the most convenient configurations on the system.

# 1. GENERALIDADES SISTEMAS DE COMUNICACIÓN ÓPTICA, ARQUITECTURAS DE RED FSAN, AMPLIFICACIÓN Y PARÁMETROS DE MONITOREO ÓPTICO

El constante crecimiento de la demanda de altas velocidades y mayor ancho de banda por parte de prestadores de servicios de comunicación y aplicaciones, han obligado a que los grupos de investigación relacionados con tecnologías de comunicación de alta velocidad, como lo son las redes de fibra óptica, se enfoquen en proponer soluciones. Sin embargo, las propuestas de nuevas arquitecturas e implementación de diferentes dispositivos ópticos se encuentran continuamente con inconvenientes generados por fenómenos que causan pérdidas en la comunicación, como la atenuación y efectos lineales y no lineales, que conllevan a la degradación de la calidad de transmisión en el sistema.

En este capítulo se detallan aspectos teóricos sobre las arquitecturas de red de nueva generación, NG-PON (*Next Generation Passive Optical Network*) especificadas por el grupo de investigación y desarrollo de estándares de comunicación denominado Red de Acceso de Servicio Completo FSAN (*Full Service Access Network*) y los dispositivos de amplificación óptica de erbio, EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*), Raman y de tipo Híbrido, que pueden ser implementados en dichas arquitecturas, además de los parámetros de monitoreo óptico de potencia, tomando como referencia libros, artículos e investigaciones realizados a nivel mundial, nacional y local, para brindar soporte científico actualizado a los conceptos tratados durante el desarrollo de la investigación.

## 1.1. ARQUITECTURAS DE RED FSAN

La Red de Acceso de Servicio Completo, FSAN (*Full Service Access Network*), es el escenario al cual los proveedores de servicios de telecomunicaciones, distribuidores de equipos y desarrolladores de aplicaciones aportan sus esfuerzos y conocimientos, mediante la búsqueda de acceso a fibra óptica de banda ancha real, impulsando las normativas existentes sobre los productos y servicios de la industria y al mismo tiempo, avanzando en especificaciones propias, diferenciadas y novedosas. La colaboración de los diferentes miembros de la FSAN es ofrecida como contribución al grupo de trabajo 15 – pregunta 2 (SG15/Q2) de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunications*) con el fin de promover el desarrollo de las normas globales de las Redes Ópticas Pasivas, PON (*Passive Optical Network*) [1].

Entre las actividades que FSAN ha impulsado para el desarrollo de las redes PON se encuentra las recomendaciones para las Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de Gigabit, GPON (*Gigabit-Capable Passive Optical Network*) [2] y PON fase 1, NG-PON1 (*Next Generation Passive Optical Network phase 1*) [3], donde se especifican dos tipos de sistemas ópticos denominados: i) Redes Ópticas Pasivas con Capacidad de 10 Gigabit, XG-PON (*10-Gigabit-capable Passive Optical Network*) [4], y ii) Redes Ópticas Pasivas Simétricas con Capacidad de 10 Gigabit, XGS-PON (*10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network*) [5]. De esta manera, FSAN es la responsable de proveer herramientas a la industria de las telecomunicaciones que no solo estimulan la normalización de redes NG-PON1, sino también la evolución de esta tecnología, como lo demuestra la presentación de las pautas o la hoja de ruta (Figura 1.1), para dar paso al avance de estas tecnologías PON existentes.

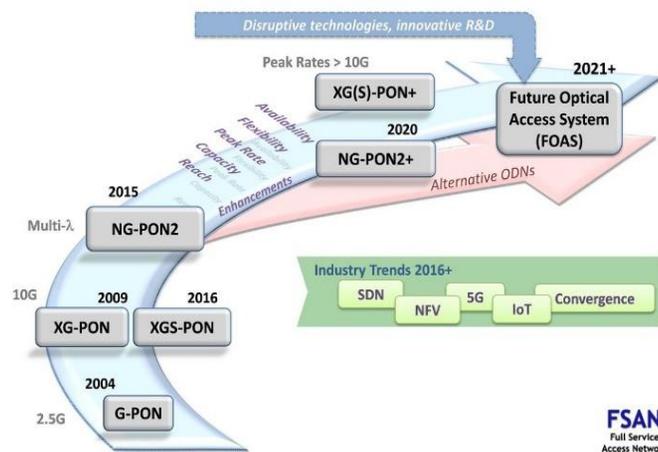


Figura 1.1. Hoja de ruta de evolución de redes PON de FSAN [1].

Esta hoja de ruta, además de acordar un enfoque evolutivo de las tecnologías ópticas, acuerda las técnicas más apropiadas de transmisión a tener en cuenta para las redes pasivas de próxima generación, apuntando a soluciones multiplexadas por división de tiempo y longitud de onda, TWDM (*Time Wavelength Division Multiplexing*) con extensiones de superposición multiplexadas por división de longitud de onda opcional, WDM (*Wavelength Division Multiplexing*), técnicas diseñadas para las redes de nueva generación debido a su escalabilidad, confiabilidad, simplicidad y el aprovechamiento del ancho de banda de la fibra, maximizando su uso.

Las redes xPON, que utilizan soluciones multiplexadas y componentes WDM, son distribuidas a lo largo de su arquitectura en etapas de transmisión, enlace y

recepción. La etapa de transmisión está compuesta por elementos de monitorización de potencia óptica, unidades de ecualización de potencia, canales de gestión y multiplexores ópticos, además de los láseres, encargados de generar pulsos de luz con determinadas y diferentes longitudes de onda que no se interfieren en el medio; la etapa de enlace se relaciona con la red distribución óptica, ODN (*Optical Distribution Network*), que consta de medios físicos como fibra óptica tipo monomodo o multimodo, siendo la primera la más implementada por sus bajos niveles de atenuación en las ventanas de trabajo C y L, además de los filtros, divisores, puntos de acceso de red, NAP (*Network Access Point*) y diferentes clases de amplificadores ópticos, que potencializan la señal en segmentos extensos de fibra óptica; y, finalmente, la etapa de recepción, donde se encuentran elementos como demultiplexores y unidades de red óptica, ONU (*Optical Network Unit*) o también llamadas unidades de terminal óptica, ONT (*Optical Network Terminal*) ONU/ONT.

Considerando el aumento en la demanda de servicios de alta calidad y que los prestadores requieren de grandes anchos de banda de manera ágil y flexible, FSAN propone actividades de desarrollo que procuran la compatibilidad de los diferentes tipos de red óptica heredada de las redes GPON a través de la Red de Distribución Óptica, lo cual proporciona protección a la inversión inicial de los operadores GPON y permite la evolución a las redes de nueva generación. Estas se encuentran divididas en dos etapas y son dirigidas a través del equipo de trabajo de Red de Acceso Óptico, OAN (*Optical Access Network*), donde se vincula el Grupo de Trabajo de Operación e Ingeniería, enfocado en la interoperabilidad completa de todos los sistemas PON y el despliegue de XG-PON1, caracterizada por velocidades de 10 Gbps en el enlace descendente y 2.5 Gbps en enlace ascendente; de igual manera, se vincula el Grupo de Tareas PON de Nueva Generación, dedicado a la estandarización de las redes XGS-PON, encargado del siguiente paso de la evolución de este tipo de redes a Redes de Nueva Generación fase 2, NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network phase 2*), donde se podrían alcanzar velocidades simétricas iguales o superiores a 40 Gbps, como se presenta en la Tabla 1.1.

CARACTERÍSTICAS		NG-PON1		NG-PON2
		XG-PON1	XGS-PON	
Velocidad (Gbps)	Descendente	10	10	40
	Ascendente	2.5	10	40
Rango ancho de banda (nm)	Descendente	1575 – 1580	1575 – 1580	1596 – 1603
	Ascendente	1260 – 1280	1260 – 1280	1524 – 1544, 1528 – 1540 1532 – 1540
Distancia mínima del enlace (km)		20	40	60
Estado de las normas ITU		G.987 – Aprobada		G.987 – En desarrollo.
Disponibilidad comercial		Sin despliegue		No disponible actualmente

Tipo	Punto a Punto Punto a Multipunto	Punto a Punto Punto a Multipunto
Aplicación	Fibra hasta la x (FTTx, <i>Fiber to the x</i> )	Fibra hasta la x (FTTx, <i>Fiber to the x</i> )

Tabla 1.1. Comparativo Tecnologías NG-PON1 vs NG-PON2 [4, 5, 6].

**1.1.1. XG-PON1.** Como se muestra en Tabla 1.1, XG-PON1 está regulada por el estándar ITU-T G.987, definido como un sistema asimétrico con tasas de transmisión de 10 Gbps 2.5 Gbps y en sentido descendente y ascendente, respectivamente, admitiendo distancias de enlace de fibra de al menos 20 km en arquitecturas tipo: i) punto a punto, PtP (*Point to Point*) y ii) punto a multipunto, PtMP (*Point to Multipoint*) [6, 7], para distribuciones de fibra hasta el lugar requerido como Fibra Hasta el Hogar, FTTH (*Fiber To The Home*), Fibra Hasta la Edificación, FTTB (*Fiber To The Building*), Fibra hasta la Oficina, FTTO (*Fiber To The Office*), entre otros (Ver figura 1.2) [7, 8]. XG-PON1 hereda las particularidades de la red de distribución óptica GPON ODN, haciendo viable el despliegue de esta tecnología, dada la reutilización estructural de la fibra óptica estandarizada en la recomendación ITU-T G.652 [9] y dispositivos ya implementados, solo agregando interfaces de 10 Gbps a la Terminal de Línea Óptica, OLT (*Optical Line Terminal*) [3], logrando una moderada evolución entre tecnologías ópticas debido a que se logra incrementar en cuatro veces el ancho de banda de GPON en sentido descendente y dos veces en sentido ascendente.

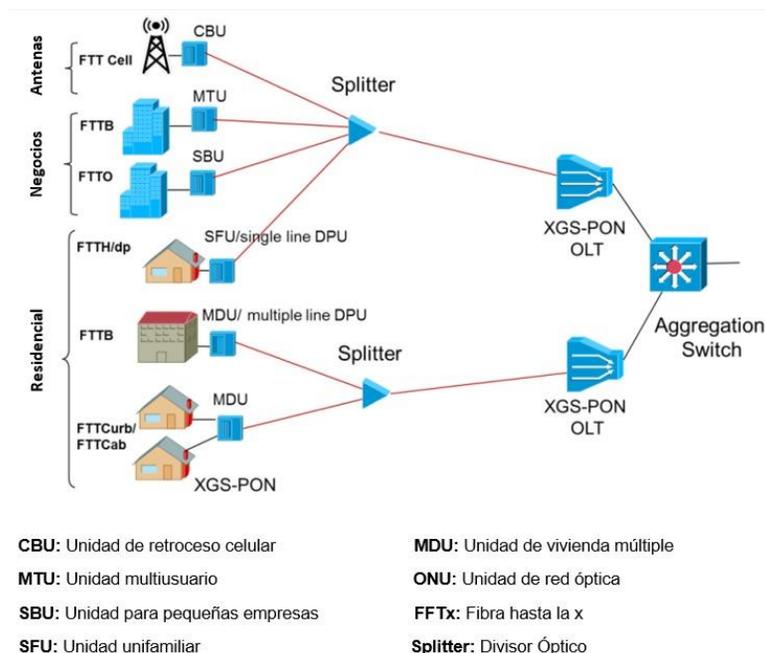


Figura 1.2. Escenario de aplicación de redes FTTx en redes XG-PON [5].

El alcance de compatibilidad entre tecnologías GPON y XG-PON, se logra a través de dispositivos destinados a combinar o aislar longitudes de onda de diferentes tecnologías, situadas en los Terminales de Línea Óptica, denominados Filtros Ópticos de Coexistencia Multiplexados, WDM1r (*Wavelength Division Multiplexing Filter*); además de filtros de Bloqueo de Longitud de Onda, WBF (*Wavelength Blocking Filters*), que se encuentran del lado del usuario y se encargan de multiplexar o demultiplexar longitudes de onda en múltiples señales en sentido ascendente y descendente y, adicionalmente, proveer de aislamiento a las señales por fuera de la banda de guarda. En la Figura 1.3, se muestra el diagrama donde se logra la coexistencia de GPON con XG-PON a través de dispositivos mencionados [5].

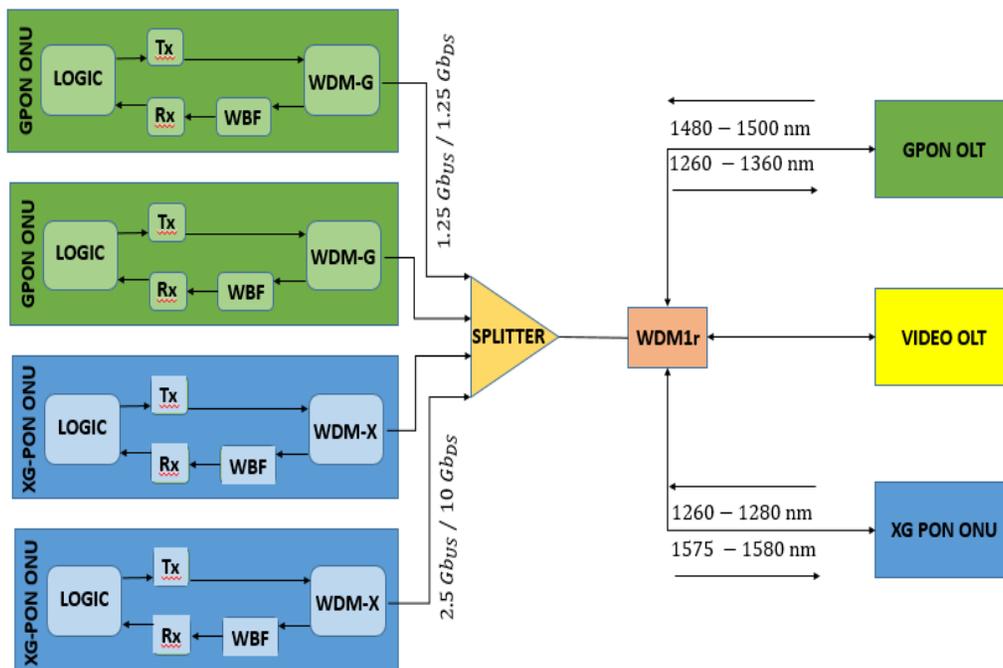


Figura 1.3. Diagrama de coexistencia de GPON y XG-PON [5].

Para garantizar la compatibilidad entre tecnologías y funcionamiento en la misma ODN, XG-PON1 utiliza la longitud de onda de 1575 nm en sentido de descarga o descendente del rango del ancho de banda de 1575 – 1580 nm y 1270 nm en el sentido ascendente, perteneciente al rango de 1260 a 1280 nm, como se muestra en la Figura 1.4. La separación entre las bandas ascendentes y descendentes se hace a través de una banda de guarda para las bandas, previniendo interferencia entre señales que provoquen la degradación mutua de las señales.

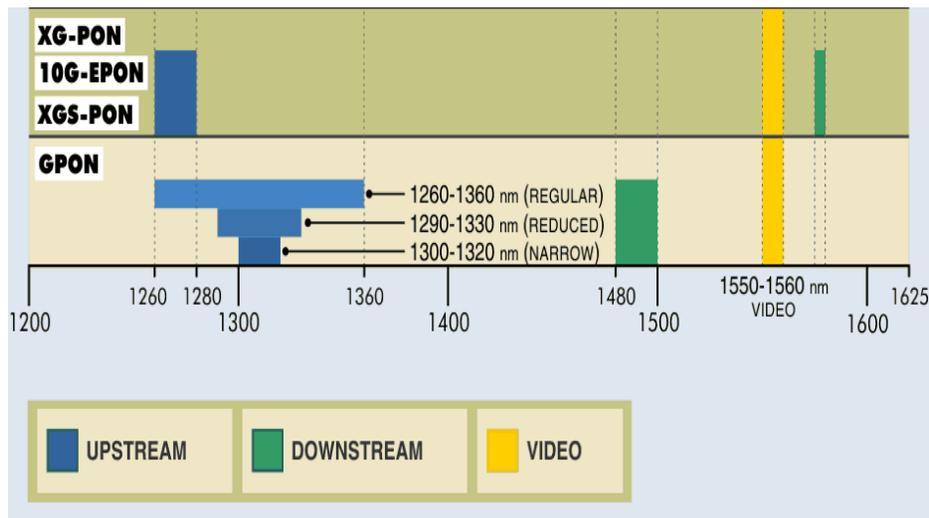


Figura 1.4. Asignación espectral sistemas PON [9].

El estándar XG-PON1 describe dos posibles escenarios de migración de la red óptica GPON a XG-PON1: i) PON Greenfield, cuando no se han desplegado redes PON, resultando viable el despliegue de XG-PON1 sin ser necesario desplegar GPON previamente, y, ii) PON Brownfield, donde se puede encontrar la coexistencia de XG-PON1 y GPON sobre la misma fibra, buscando disminuir las interrupciones a los usuarios dadas por la migración de tecnología.

**1.1.2. XGS-PON.** La Red Óptica XG-PON2 o XGS-PON, es otra tecnología PON estandarizada por la ITU-T en la recomendación G.9807.1 [5], cuya principal característica denota la tasa de velocidad simétrica de 10 Gbps. XG-PON2 reutiliza los rangos de longitudes de onda reservados para XG-PON1, lo cual implica que puede operar sobre la misma ODN que los sistemas XG-PON1, admitiendo la coexistencia entre tecnologías y la posterior evolución a NG-PON2.

Esta tecnología simétrica, además de cuadruplicar la tasa de velocidad de carga presentada en XG-PON1, también admite arquitecturas de tipo PtP y PtMP, extendiendo la distancia del enlace a 40 km y agregando algunos escenarios de distribución como Fibra Hasta el Sitio de la Celda, FTTCcell (*Fiber To The Cell*) y Fibra Hasta el Punto de Distribución, FTTPd (*Fiber To The Distribution Point*), el cual provee la posibilidad de instalar secciones de fibra hasta ubicaciones complicadas, planteando la instalación de una Unidad de Red Óptica, ONU (*Optical Network Unit*) en la puerta del hogar del usuario, mientras que la FTTCcell implica el uso y conexión de equipos de acceso móvil.

XGS-PON implementa OLT para el estándar, con capacidad para permitir varias tecnologías tipo PON de manera simultánea sobre la misma ODN y están preparados para coexistir de manera flexible con el estándar NG-PON2 en el futuro. La ITU-T ha definido la distancia entre los terminales ópticos OLT y las unidades de red ópticas de aproximadamente 20 km, donde dichas OLTs tienen la capacidad de soportar hasta 128 ONUs simultáneamente [5, 10]. La innovación y desarrollo reciente de las Terminales de Red Óptica, ONT (*Optical Network Terminal*) de 10 Gigabit, han reducido drásticamente su costo a niveles cercanos al de las ONT/ONU de 1 Gigabit, donde además se ha integrado una mayor flexibilidad en las ONT de nueva generación para que las aplicaciones FTTH, empresariales y 5G, compartan elementos de hardware; sin embargo, la disponibilidad de los sistemas XGS-PON se verá limitada mientras aún existan sistemas que ofrezcan enlaces de descarga asimétricas, razón por la cual es muy bien vista la implementación de este tipo de tecnología por proveedores de servicios, dados los beneficios que las transmisiones simétricas ofrece a sectores mercantiles y aplicaciones de backhaul<sup>1</sup> móvil requeridas [10, 11].

La intención de los operadores es la coexistencia entre diferentes tecnologías, que asegure un menor impacto económico y de complejidad, por lo cual han decidido apuntar a redes XGS-PON como la tecnología de transición para la evolución a NG-PON2, soportando las necesidades actuales, con el fin de mantener un balance en términos de inversión a corto plazo y funcionamiento a largo plazo y evolución costo-eficiencia de la red óptica NG-PON1 a la red de nueva generación NG-PON2.

La Tabla 1.2, muestra una comparativa de algunas características de alcance y servicios entre las redes NG-PON1 con respecto a las redes GPON desplegadas actualmente.

	<b>GPON (ITU-T G.984)</b>	<b>XG-PON (ITU-T G.987)</b>	<b>XGS-PON (ITU-T 9807.1)</b>
<b>SERVICIOS</b>	Ethernet, Gigabit Ethernet, TDM, VoIP, IPTV, TV Digital.	Ethernet, Gigabit Ethernet, TDM, VoIP, IPTV, TV Digital.	Ethernet, Gigabit Ethernet, TDM, VoIP, IPTV, TV Digital
<b>ALCANCE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máximo 20 km a nivel físico.</li> <li>• Máximo 60 km a nivel lógico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máximo 20 km a nivel físico.</li> <li>• Mínimo 60 km a nivel lógico.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcance máximo definido por los módulos ópticos y calidad de la fibra.</li> </ul>

Tabla 1.2. Comparativo características GPON vs. NG-PON.

<sup>1</sup> Backhaul (Red de Retorno) hace referencia a la interconexión entre el core o núcleo de la red y los diferentes tipos de acceso presentados en las redes alámbricas e inalámbricas.

## 1.2. AMPLIFICACIÓN ÓPTICA

Al igual que otros sistemas de comunicación, las redes ópticas hacen uso de equipos de transmisión y recepción, conectados por medios ópticos que propagan señales con menor atenuación que otros, como el cable de cobre. Inicialmente, la transmisión de información a través de los sistemas de comunicación óptica, hacía uso de estaciones de regeneración de señal en segmentos de red de alrededor de 100 km, cuyo volumen, debido a la cantidad de componentes necesarios para la regeneración, limpieza, amplificación electrónica y posterior retransmisión de la señal sobre el siguiente segmento del enlace, evitaban que las señales fueran bastante ruidosas y degradaran la calidad del sistema [12]. Sin embargo, la aparición e implementación de dispositivos de amplificación óptica, OA (*Optical Amplifier*), han terminado por desplazar la manera en que se hacía este proceso, debido a que generan una amplificación de tipo lineal para determinadas longitudes de onda e incrementan la potencia de la señal de transmisión, reemplazando el proceso Óptico – Eléctrico – Óptico, OEO (*Optical – Electrical – Optical*) y compensando las pérdidas presentadas en el proceso anterior, con lo cual se reduce significativamente el espacio implementado en la estación de comunicación óptica, respecto al tamaño de las estaciones de regeneración.

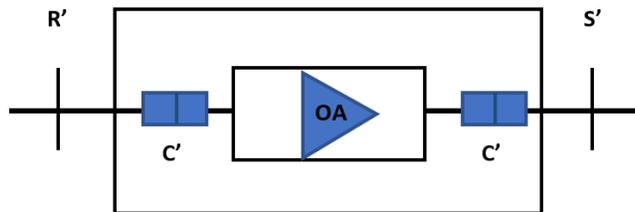


Figura 1.5. Diagrama referencial de un AO [12].

Los OA realizan la amplificación mediante el proceso de emisión estimulada, cuyo principio está dado por la interacción entre un fotón y un átomo que se encuentra inicialmente excitado. Para efectuar este proceso, se requiere que la amplificación del flujo inicial de fotones encuentre un mayor número de átomos en estado excitado que en estado base, en la cavidad en donde se va a llevar a cabo la amplificación, condición denominada Inversión de población. Como resultado de la interacción entre las partículas, los átomos pasan a su estado base emitiendo en el proceso fotones con las mismas características de dirección y fase que los iniciales. Dicho de otra forma, el flujo inicial de fotones ( $S_i$ ), proporcionará a la salida de la cavidad óptica, un flujo final ( $S_f$ ) mayor que el inicial [12], como se muestra en la Figura 1.6.

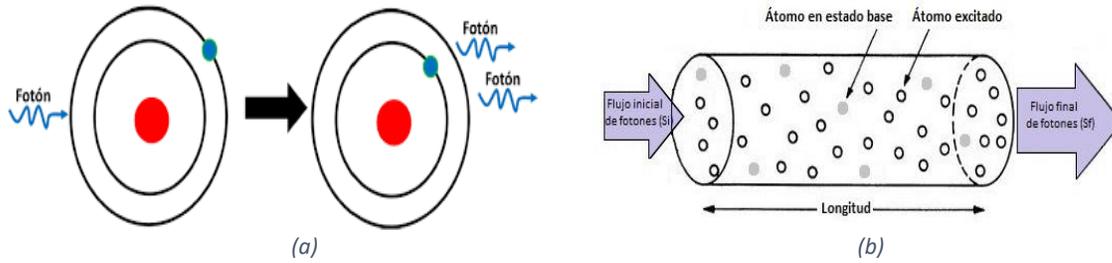


Figura 1.6. Proceso emisión estimulada: (a). Interacción entre partículas. (b). Proceso en cavidad óptica. [12].

La inversión de población se logra a través de la proporción de energía mediante sistemas ópticos de bombeo, que, perfectamente sincronizados con el paso de los pulsos de luz, generan la condición necesaria para la amplificación de la señal de entrada; si el bombeo se da antes o después del paso del pulso al amplificador, dicho pulso no será amplificado.

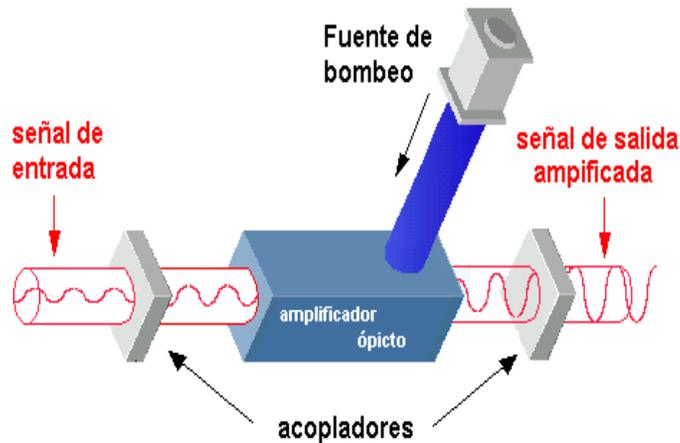


Figura 1.7. Sistema de bombeo óptico [12].

Paralelo al proceso de emisiones estimuladas, se presentan otras espontáneas en el medio amplificador, caracterizadas por no tener una relación de fase entre los fotones emitidos y los incidentes; es decir, algunos fotones decaen de forma espontánea desde un nivel o estado de equilibrio ligeramente estable, a uno más básico (nivel metaestable), emisión que también es amplificada y que da origen al efecto de Ruido Amplificado de Emisión Espontánea, ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), el cual, además de introducir ruido a la señal, disminuye la ganancia producida por el amplificador óptico, pues la potencia ASE contribuye al fenómeno de saturación. Desde el punto de vista de la amplificación, los fotones en su nivel metaestable serán amplificados en la misma medida que aquellos

correspondientes a la señal y serán indistinguibles. La potencia ASE a la salida de un amplificador óptico, puede ser demostrada con la ecuación 1.1:

$$P_N = 2n_{sp}(G - 1)h\nu B_0 \quad (\text{Ec. 1.1})$$

En donde,

- $P_N$ : Potencia de ruido ASE.
- $G$ : Ganancia.
- $B_0$ : Ancho de banda del amplificador óptico.
- $n_{sp}$ : Factor de emisión espontánea.

La acumulación del fenómeno ASE es significativo en los sistemas en que varios amplificadores ópticos son conectados en cascada, lo que podría causar que estos entren en la región de saturación. Sin embargo, la implementación de los amplificadores ópticos en spans más cortos, ha demostrado un incremento en el rendimiento del sistema, generando una disminución de la presencia del fenómeno ruidoso ASE y en las pérdidas generadas por otro tipo de anomalía.

Como se mencionó, las estaciones de regeneración eran distribuidas en secciones de alrededor de 100 km; sin embargo, el uso de amplificadores ópticos, por su tamaño y propiedades, demostró un incremento en la calidad del sistema cuando es implementado en spans más cortos, por las menores pérdidas y por la proporcionalidad del ruido ASE respecto a la ganancia de los amplificadores ópticos, [12].

Los amplificadores ópticos permiten trabajar sobre sistemas multiplexados WDM [11, 13], como se especifica en la recomendación de la ITU-T G.661 [14], que define las características de los componentes y subsistemas de los amplificadores ópticos, referencia que es la base para la configuración típica de un amplificador en una aplicación multicanal, como se muestra en la Figura 1.8. Las aplicaciones de este tipo son realizadas por señales ópticas provenientes de transmisores ópticos separados, cada una con longitudes de onda única y combinada en un Multiplexor Óptico, OM (*Optical Multiplexer*), donde posteriormente son separadas por un Demultiplexor Óptico, OD (*Optical Demultiplexer*) y encaminadas a sus respectivos receptores.

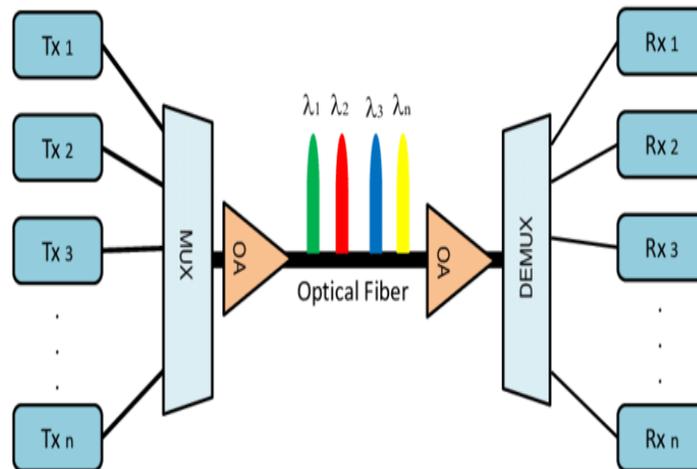


Figura 1.8. Amplificador óptico en aplicación multicanal [13].

En sus diversas aplicaciones, los OA especifican parámetros que condicionan los sistemas como:

**Ganancia:** indicando la cantidad de amplificación óptica obtenida respecto a la señal de entrada, la cual se encuentra típicamente en un rango de 10-20 dB.

**Potencia:** determina los rangos máximos y mínimos admitidos para transmisión y recepción, siendo un parámetro determinante en el costo de los amplificadores. Por las características de ganancia de potencia, los amplificadores pueden ser clasificados como i) de canal simple, que amplificarán solo un canal óptico dentro de una banda especificada y ii) Multicanal: que, en contraste, operan sobre cualquier número de canales dentro de una banda especificada, cuya principal propiedad es la ganancia plana, permitiendo así el correcto reconocimiento de los canales en el extremo receptor.

**Propiedades dinámicas:** su importancia se revela cuando se presentan variaciones en la potencia de entrada, que afectan la operación del amplificador. Estas variaciones son lentamente promediadas por el amplificador óptico, para obtener un valor coherente que no afecte el proceso de amplificación y evitar la presencia de ruido sobre los canales, derivado de los cambios abruptos.

**Ruido:** es un parámetro de análisis fundamental en el rendimiento de un amplificador y está caracterizado por la Figura de Ruido, NF (*Noise Figure*), definida como la Relación Señal a Ruido, SNR (*Signal-Noise Ratio*) en la salida, respecto a la misma de la entrada. Esta relación, que debe mantenerse lo más

baja posible para mantener un óptimo rendimiento en el sistema, depende de la ganancia, por lo que, al utilizar un amplificador de mayor ganancia, generalmente tendrá un NF más bajo.

Además de estos parámetros, la recomendación de la ITU-T para sistemas de transmisión, medios en sistemas digitales y redes, caracteriza los OA respecto a su posicionamiento a nivel físico en los sistemas ópticos [14], en sistemas canal simple y multicanal. De esta manera, configuraciones como los Amplificadores de Línea, LA (*Line Amplifier*), usualmente instalados en cascada, son utilizados para elevar el nivel de potencia de la señal y compensar las pérdidas, aunque también se pueden encontrar configuraciones para amplificación de potencia, BA (*Booster Amplifier*), implementadas para ampliar las longitudes de onda sin necesidad de hacer transformaciones optoelectricas o incrementos en los niveles de potencia de la señal emitida; este tipo de arquitectura utiliza el amplificador óptico a continuación del transmisor. Finalmente, se encuentra la arquitectura en preamplificador, PA (*Pre-Amplifier*), que ubica el OA antes del receptor óptico, logrando el incremento de la sensibilidad y la amplificación de la señal antes de la fotodetección, proporcionando una mejor relación señal a ruido, mayor ganancia y ancho de banda más amplio.

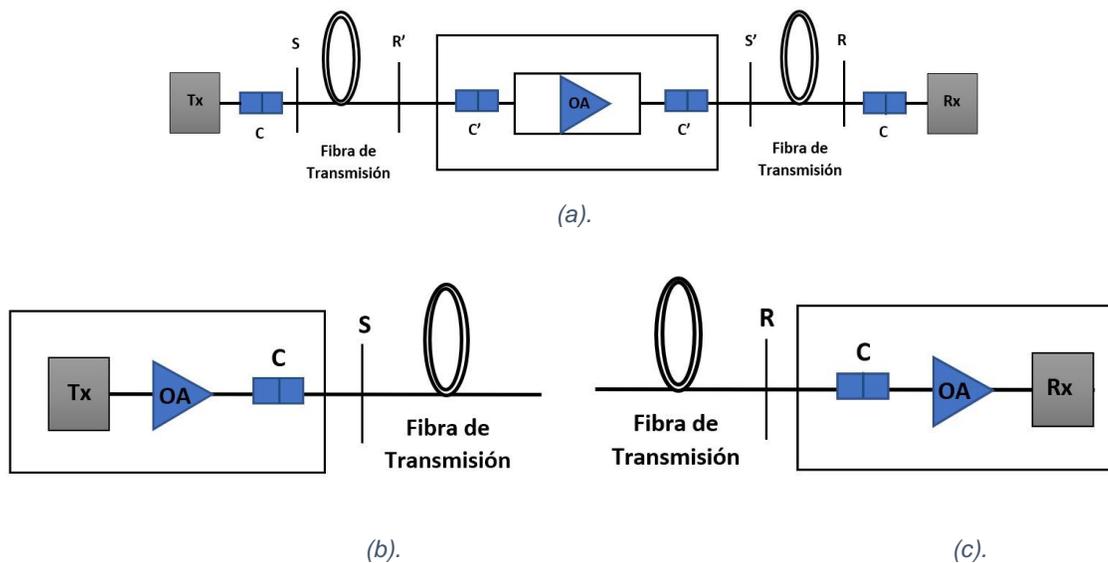


Figura 1.9. Configuraciones de amplificadores ópticos (a). Amplificador de Línea, (b). Amplificador de Potencia, (c). Preamplificador [14].

De manera general, la ITU-T clasifica los amplificadores ópticos en dos tipos: de Semiconductor, SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) y de Fibra Óptica, OFA (*Optical Fiber Amplifier*), siendo el segundo el favorito en los sistemas actuales de

comunicación óptica, debido a que presentan una alta transparencia en la tasa de bits y en la longitud de onda de la señal digital, lo que permite diseñar una red flexible y variable respecto a la demanda de los usuarios. Este tipo de amplificadores se fundamentan en fibras dopadas de tierra rara o en el efecto Raman, de manera que los dos principales tipos de OFAs son el de Fibra Dopada de Erblio, EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) y de Raman, RFA (*Raman Fiber Amplifier*) [13].

**1.2.1. Amplificador de Fibra Dopada de Erblio (EDFA).** Los amplificadores de fibra dopada de erblio hacen parte de una amplia y variada gama de mecanismos físicos para la amplificación de señales de luz en sistemas de comunicación óptica. Estos amplificadores utilizan fibras dopadas con tierras raras, que son utilizadas como medio de ganancia para la amplificación de la señal y actualmente ocupan el primer lugar entre los amplificadores ópticos más utilizados [15].

El principio de funcionamiento de un EDFA se basa en una sección corta de fibra, que contiene en su núcleo una cantidad controlada de Erblio, añadido al vidrio que forma un ion ( $\text{Er}^{+3}$ ). Con este principio, se excitan los iones de Erblio por medio del mecanismo de emisión estimulada<sup>2</sup>, que bombea una señal externa y de esta manera se consigue la ganancia sobre las longitudes de onda de las bandas en las que se opera con este amplificador.

Los amplificadores EDFA pueden ser catalogados según el tipo y las características técnicas que influyen sobre el sistema de comunicación. Se pueden encontrar amplificadores de ganancia fija o saturable, de potencia de salida y de modelo físico, cada uno con su propio modo de empleo, para amplificar uno o más canales al mismo tiempo, con diferentes longitudes de onda y sin la presencia de crosstalk<sup>3</sup> entre canales [16], tanto en banda C (1525-1565 nm) como en banda L (1565-1620 nm) [17]. Estos dispositivos emplean dos tipos de longitudes de onda para el bombeo de la señal de amplificación, con sus respectivas potencias. La primera longitud de onda empleada es de 980 nm y potencias entre 100 mW a 350 mW, que, frente al sistema, presenta mejores prestaciones respecto a la figura de ruido (entre 5 y 6 dB), pero menores niveles de ganancia y potencia de salida; la segunda, de 1480 nm y potencias entre 120 mW a 350 mW, consigue mayores niveles en ganancia y potencia de salida, pero también mayores niveles de Figura de Ruido (NF) (entre 6 y 7 dB). Además de estos valores, los amplificadores EDFA

---

<sup>2</sup> El mecanismo de emisión estimulada es el proceso en el cual un ion se encuentra en su estado más alto de energía y un fotón de luz estimula al ion para que done energía y regrese a su estado más bajo de energía (Estado más estable).

<sup>3</sup> Crosstalk: transferencia de potencia a una longitud de onda de otro canal, dentro de un mismo sistema de comunicaciones.

están diseñados para obtener ganancias muy altas con señales de entrada cuya potencia es menor. La ganancia del dispositivo se puede calcular teóricamente mediante la ecuación 1.2 [18]:

$$g = 10 \log \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Donde,

- $g$ : Ganancia del Amplificador (dB).
- $P_{out}$ : Potencia de Salida del Amplificador (mW)
- $P_{in}$ : Potencia de Entrada del Amplificador (mW)

La ecuación anterior determina que el ruido de los amplificadores EDFA es proporcional a la ganancia de dicho amplificador, lo que implica que, al incrementar la señal de entrada a un sistema, este también amplificará cualquier tipo de ruido que esté presente. A continuación, se puede observar un esquema del dispositivo EDFA, que además de contar con una sección de fibra dopada de Erblio, cuenta con acopladores de selección de onda WDM y aislantes ópticos situados a la entrada y salida, para no permitir la propagación del ruido ASE y señales reflejadas hacia el EDFA. Adicionalmente, Las fuentes de bombeo mostradas usan transiciones entre las longitudes de onda características del dispositivo (980 nm y 1480 nm), inyectando la señal óptica de entrada hacia el EDFA y generando una señal de salida completamente amplificada [16, 19, 20].

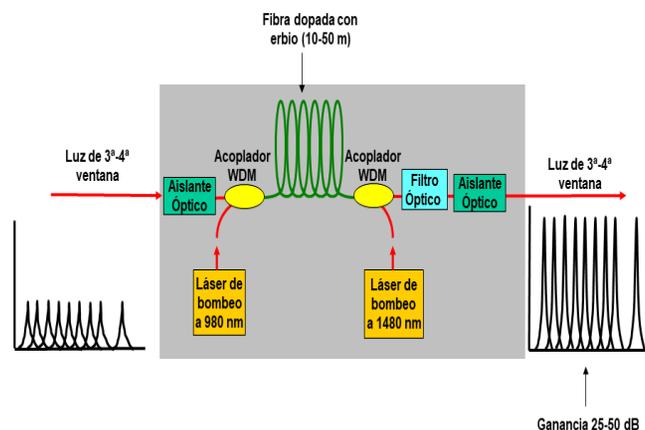


Figura 1.10. Esquema de un dispositivo EDFA [21].

La disposición de los amplificadores EDFA con relación a la manera en que se desea bombear y, por consiguiente, amplificar las señales por el dispositivo, presentan una forma similar a las arquitecturas de amplificación ya presentadas, diferenciándose en que la configuración de EDFA se hace con respecto a la fibra dopada del dispositivo [21, 22]. Las configuraciones del amplificador EDFA son las siguientes:

**Co-Propagación:** el bombeo se introduce a la fibra mediante un acoplador, en conjunto con la señal de entrada, propagándose ambos en el mismo sentido (Unidireccional).

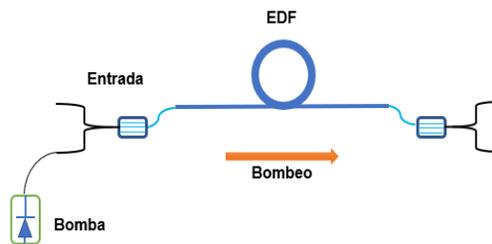


Figura 1.11. Arquitectura de bombeo Co-Propagación [22].

**Contra-Propagación:** El bombeo se propaga en sentido contrario a la señal que se va a amplificar, lo cual permite una ganancia más alta que la unidireccional, pero con niveles de ruido más elevados.

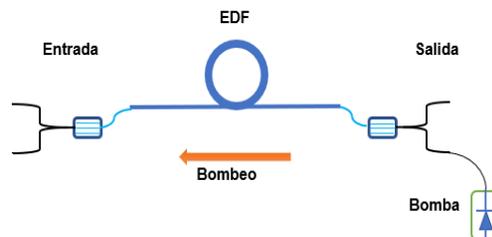


Figura 1.12. Arquitectura de bombeo en Contra-Propagación [22].

**Bidireccional:** Los bombes Co-Propagado y Contra-Propagado se efectúan en el mismo amplificador, permitiendo poder llegar a duplicar la ganancia presentada.

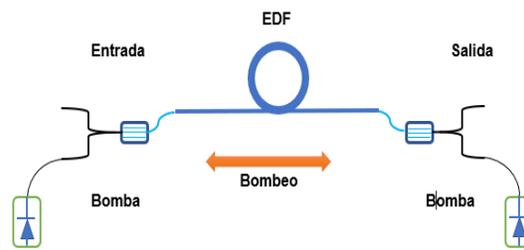


Figura 1.13. Arquitectura de bombeo Bidireccional [22].

En la Figura 1.14, se puede observar un amplificador EDFA, usualmente utilizado dentro de los sistemas ópticos como amplificador Booster, con potencia máxima de 12 dBm, amplificador de línea con una ganancia de 10 o 20 dBm o como preamplificador con una amplificación alrededor de 24 dBm. En la Tabla 1.3, se observan los parámetros principales del amplificador.



Figura 1.14. Amplificador EDFA de modelo físico MULTICOM™ [23].

PARÁMETROS AMPLIFICADOR EDFA MULTICOM MUL-EDFA-V-32-37		
Longitud de Onda (nm)	Mínimo	1545
	Máximo	1565
Potencia de Entrada (dBm)	Mínimo	-5
	Máximo	10
Potencia de Salida (dBm)	Máximo	37
Figura de Ruido (dB)	Típico	5
Estabilidad de Potencia de Salida (dBm)	Típico	+/- 5

Tabla 1.3. Parámetros Amplificador EDFA de modelo físico MULTICOM™ [23].

**1.2.2. Amplificador Raman (RFA).** Los amplificadores de fibra Raman, RFA (*Raman Fiber Amplifier*), al igual que los dispositivos tipo EDFA, son una tecnología basada en sistemas ópticos puros que hacen posible la transmisión a grandes distancias, permitiendo amplificar señales ópticas de manera directa; es decir, no se requiere realizar una conversión eléctrica previa [16].

Este tipo de amplificación está basada en un fenómeno físico no lineal, originado por la interacción de un haz luminoso bombeado desde una fuente y las

vibraciones moleculares que ocurren sobre el medio de propagación, denominado físicamente como fonones [24]. La señal luminosa dispersada se desplaza, en frecuencia, con un valor igual a la diferencia entre las frecuencias de bombeo y la vibración molecular del cristal. La señal desplazada se conoce con el nombre de campo de Stokes, y el efecto lineal no relativo a dicho desplazamiento se denomina dispersión Raman. El campo de Stokes se mezcla nuevamente con la señal óptica para proporcionar frecuencias adicionales, al tiempo que estas señales dirigen las vibraciones inducidas en el cristal, resultando un campo de Stokes más intenso; al proceso se le denomina Dispersión Estimulada de Raman, SRS (Stimulated Raman Scattering) (Figura 1.15) [25].

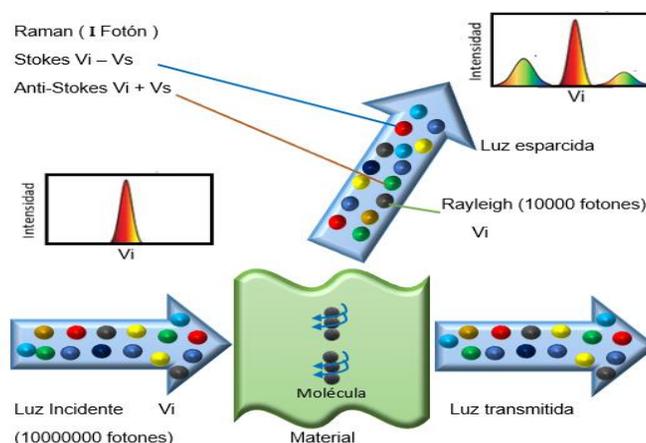


Figura 1.15. Proceso físico de la Dispersión Estimulada de Raman, SRS [25].

Este efecto se presenta en longitudes de onda entre los 1440 nm y 1550 nm, rango en el que puede presentar repercusiones negativas sobre transmisiones ópticas multicanal, debido a la transferencia de potencia desde canales de mayor frecuencia a otros con menor frecuencia, produciendo fenómenos como diafonía. Sin embargo, las aplicaciones ópticas toman ventaja de este fenómeno debido a su utilización sobre la fibra como medio de ganancia, aplicando las señales de bombeo de forma similar a como se aplican en los amplificadores EDFA para la amplificación de las señales ópticas [25, 26].

La Figura 1.16, muestra el esquema de amplificación Raman, donde la fuente de bombeo ( $w_p$ ) es inyectada en la fibra en dirección Co-Propagada o Contra-Propagada de la señal de entrada ( $w_s$ ), considerando que  $w_s < w_p$  [27].

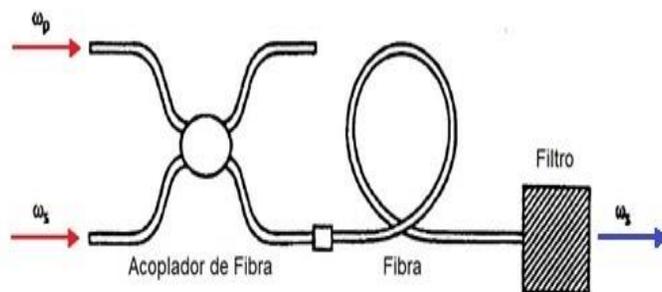


Figura 1.16. Esquema de amplificación Raman [27].

Con la implementación de estos amplificadores, es posible obtener una ganancia de hasta 13 THz, es decir, 100 nm por debajo de la longitud de onda de bombeo, aplicando potencias de bombeo de 1 a 1.2 W.

La manifestación del efecto de dispersión Raman dentro de la fibra óptica, brinda la posibilidad de encontrar dos tipos de amplificadores: el Raman Distribuido, DRA (*Distributed Raman Amplifier*), que tiene características adquiridas a través de una porción de fibra óptica usada para transmisión; y, el Amplificador Raman Agrupado, LRA (*Lumped Raman Amplifier*) que, además de beneficiarse de los efectos de SRS, lo hace también de los componentes físicos que están contenidos dentro del dispositivo amplificador [27, 28, 29].

Los Amplificadores de Fibra Raman, RFA (*Raman Fiber Amplifier*) comercializados en el mercado de las comunicaciones ópticas, están diseñados para disminuir las penalizaciones no lineales, permitiendo realizar transmisiones sobre distancias equivalentes o superiores a las provistas por los EDFA, altas velocidades de transmisión y espaciamentos de canal más estrecho. A continuación, se puede observar un amplificador de fibra óptica Raman marca Cisco, disponible en el mercado con los parámetros de funcionamiento mostrados en la Tabla 1.4 [30].



Figura 1.17. Amplificador Raman CISCO, para contra y Co-Propagación tipo DRA [30].

PARÁMETROS AMPLIFICADOR EDFA MULTICOM MUL-EDFA-V-32-37		
Longitud de Onda en Banda C	Mínimo	1500
	Máximo	1567
Potencia de Bombeo en Co-Propagación y Contra-Propagación (mW)	Mínimo	100
	Máximo	1000
	Típico	500
Potencia de Salida en Po-Propagación y Contra-Propagación (mW)	Típico	1200
Figura de Ruido (dB)	Típico	5
Estabilidad de Potencia de Salida (dBm)	Típico	+/- 5

Tabla 1.4. Parámetros Amplificador Raman Cisco [30].

**1.2.3. Amplificador Óptico Híbrido – HOA.** Los Amplificadores Ópticos Híbridos (HOA, *Hybrid Optical Amplifier*), son el resultado de la conjunción de amplificadores ópticos de diferentes clases, siendo una tecnología prometedora respecto al aumento de la demanda de transmisión de alta capacidad y disminución de las degradaciones en los sistemas de comunicación [31]. Los amplificadores HOA se clasifican como: i) de Banda Ancha, WB-HA (*Wideband Hybrid Amplifier*), el cual obtiene la ganancia usando diferentes tipos de amplificadores ópticos y ii) de Banda Estrecha, NB-HA (*Narrowband Hybrid Amplifier*), que, al igual que el anterior, combina diferentes tipos de amplificadores para obtener menor ruido producido por ASE y mayor ganancia de la señal amplificada [31].

Actualmente, los diferentes amplificadores de fibra dopada, DFA (*Doped Fiber Amplifiers*), pueden ser combinados con amplificadores tipo SOA y Raman para disponer de amplificación tipo híbrida. En sistemas DWDM se ha probado que la combinación SOA-EDFA puede ser usada en caso de que sea necesario ampliar el espectro de ganancia de un EDFA, siendo esta la opción más rentable para la implementación en los sistemas ópticos; sin embargo, este tipo de amplificador híbrido genera una mayor cantidad de ASE, afectando significativamente el rendimiento del sistema de transmisión con respecto a los fenómenos no lineales que se presentan, por lo cual no es aplicado usualmente en transmisiones de larga distancia [32, 33]. En consecuencia, el uso de amplificadores Raman aparece como un componente tipo híbrido esencial en la amplificación, debido a que su figura de ruido es mucho más baja que la de los EDFA y aún más baja que los SOA [32, 33], así que la manera de adquirir una ganancia más alta con una figura de ruido más baja en sistemas ópticos, es la conformación de un amplificador híbrido Raman tipo DRA con un EDFA (DRA-EDFA). La ecuación 1.3 representa la ganancia que puede ser proporcionada por la red que conforma el amplificador híbrido [31, 32, 33]:

$$G_{Hibrido} = G_{EDFA} + G_{Raman} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

En donde,

- $G_{Hibrido}$ : Ganancia amplificador híbrido.
- $G_{EDFA}$ : Ganancia amplificador EDFA.
- $G_{Raman}$ : Ganancia amplificador Raman.

Los amplificadores HOA presentan configuraciones dentro de las arquitecturas de los sistemas de comunicaciones ópticas, que permiten extender la capacidad y evitar los diferentes fenómenos que se puedan presentar. En la Figura 1.18, se observa la arquitectura en cascada HOA, cuya implementación es generalmente utilizada para evitar problemas relacionados con la ganancia plana, donde las configuraciones pueden ser tipo EDFA-Raman o Raman-EDFA, tanto para banda C como para banda L.

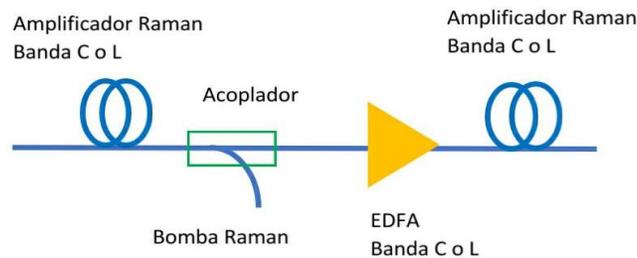


Figura 1.18. Amplificador HOA en cascada [31].

La arquitectura de amplificadores híbridos en paralelo se implementa con el fin de obtener de mayor ancho de banda, con un espectro de ganancia más plano, en la búsqueda de unir las bandas de amplificación de cada amplificador y lograr una más ancha.

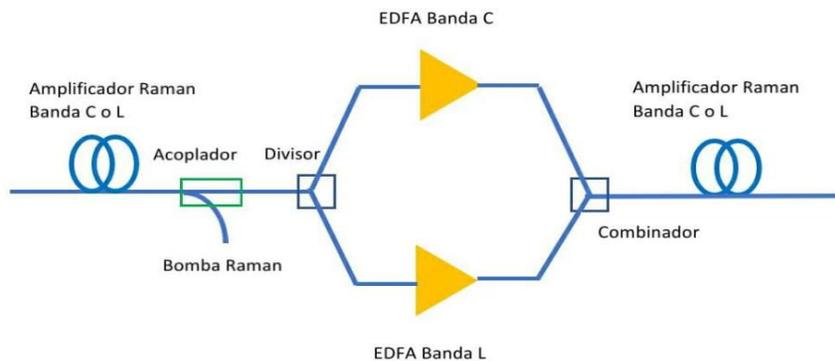


Figura 1.19. Amplificador HOA en paralelo [31].

Fabricantes como FINISAR™ han desarrollado módulos híbridos integrados EDFA-Raman, con la capacidad de unificar el control de la ganancia de cada dispositivo, lo que permite realizar implementaciones de redes extensas o la extensión de estas sin necesidad de regeneración de señal, suministrando una muy baja figura de ruido y una ganancia plana acorde al diseño y funcionamiento del sistema. El módulo EDFA-Raman marca FINISAR™ de la Figura 1.20, incorpora mecanismos de seguridad láser, que aseguran que el módulo y la red óptica operen con altos estándares de comunicación, requeridos por los actuales sistemas de comunicación [34].



Figura 1.20. Amplificador HOA FINISAR™ [34].

Las características del módulo híbrido EDFA-Raman, están descritas en la Tabla 1.5.

PARÁMETROS FINISAR HYBRID EDFA-RAMAN MODULE		
Rango de Longitud de Onda (nm)	Mínimo	1528
	Máximo	1567
Potencia de Bombeo (dBm)	Mínimo	-35
	Máximo	11
Rango de Ganancia (dB)	Mínimo	15
	Máximo	40
Figura de Ruido (dB)	2 bombas: $G \geq 24$	1
	3 bombas: $G \geq 28$	0

Tabla 1.5. Parámetros Amplificador Raman Cisco [27].

La Tabla 1.6 muestra un comparativo entre tecnologías para sistemas de comunicación DWDM de corta distancia usando dispositivos EDFA, Raman o HOA, recomendados para sistemas de alta capacidad, en donde se requiere de altas ganancias [31]. Las fichas de datos pueden ser observadas en el Anexo A.

CARACTERÍSTICA	EDFA	Raman	HOA
Longitud de Onda de Operación	1525 nm a 1565 nm	Cualquiera, depende de la fuente de bombeo	Cualquiera con alta ganancia
Longitud de Onda de	980 nm, 1400 nm a 1500	Por debajo del cambio de	980 nm, 1400 nm a 1500

CARACTERÍSTICA	EDFA	Raman	HOA
Bombeo Óptico	nm	señal de Stoke	nm
Ganancia de ancho de banda	10 nm a 40 nm	20 nm a 50 nm	Mayor a 80 nm con ganancia plana alta
Ruido	Bajo	Muy bajo	Bajo
Potencia Óptica de Bombeo	20 a 50 mW	100 a 1000mW	100 a 600 mW

Tabla 1.6. Comparativo tecnologías ópticas para sistemas DWDM [32].

### 1.3. FENÓMENOS DE PROPAGACIÓN ÓPTICA

En los sistemas ópticos se pueden encontrar múltiples fenómenos que causan perturbaciones en la propagación y desempeño del sistema de comunicación, limitando la velocidad y la distancia de transmisión. Estos fenómenos, denominados efectos lineales y no lineales, degradan y modifican la señal de información original de forma no deseada, generando considerables disminuciones en el desempeño del sistema de comunicación óptica. Los efectos lineales son aquellos que no tienen la capacidad de crear nuevas componentes en frecuencia; por el contrario, los efectos no lineales agregan nuevas componentes en frecuencia a la señal de entrada. Estos fenómenos son definidos con más profundidad a continuación.

**1.3.1. Efectos lineales.** Los efectos lineales (Figura 1.21), son degradaciones ópticas que no dependen de la potencia de transmisión y no tienen la capacidad de generar nuevas componentes en frecuencia, pero limitan de manera considerable el desempeño de la red [27, 35]. Como consecuencia de la linealidad de este tipo de degradación, se encuentran los efectos de dispersión clasificados como Dispersión por Modo de Polarización, PMD (*Polarization Mode Dispersion*) y Cromática, CD (*Chromatic Dispersion*), así como por los efectos de pérdidas correspondientes a Atenuación y Ruido.

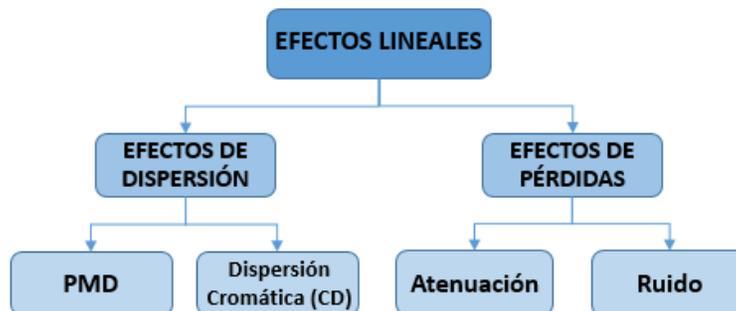


Figura 1.21. Clasificación efectos lineales [27].

**Efectos de Dispersión:** la dispersión por modo de polarización es un efecto presentado principalmente en la fibra óptica tipo monomodo (Figura 1.22), debido a la forma física de la fibra resultante del proceso de fabricación o de tensiones externas [35]. Esta fibra presenta dos tipos de polarización modal: horizontal o lenta y vertical o rápida, donde la diferencia de los tiempos de llegada es medida en picosegundos ( $ps$ ). Debido a que estos modos de polarización no se mantienen, se presentan interacciones entre los pulsos y, en consecuencia, ensanchamiento y distorsión de ellos, generando un Retardo de Grupo Diferencial, DGD (*Differential Group Delay*) y una gran cantidad de errores en los bits de transmisión o interferencia entre símbolos, ISI (*Intersymbol Interference*), lo que a su vez produce un aumento en la BER de la señal recibida [36].

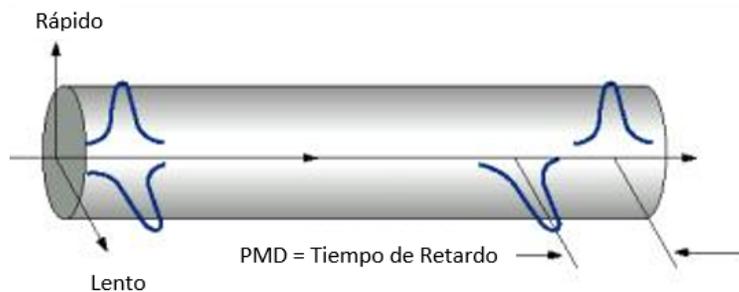


Figura 1.22. Dispersión por modo de polarización en fibras tipo monomodo [36].

PMD es un efecto variable con el tiempo y la longitud de onda y, por lo tanto, más complejo de compensar que la dispersión cromática. Actualmente se toleran coeficientes inferiores a  $0.5 ps/\sqrt{km}$ , extendidos hasta valores máximos de  $10 ps$ , para velocidades de transmisión de  $10 Gbps$  [37]. Sin embargo, este fenómeno puede mitigarse no excediendo una determinada longitud de fibra, asegurando la compensación de la PMD. Se debe tener en cuenta que cuando la señal óptica, ensanchada por efectos de la modulación, se propaga a través del enlace de fibra teniendo una PMD no despreciable, cada componente espectral podría tener un estado de polarización distinto al final de la fibra.

El efecto denominado dispersión cromática, puede ser originado por la dispersión del material y de la guía de onda, siendo la primera la mayor causante de este fenómeno, debido al índice de refracción característico de material. En general, la CD se define como la máxima dispersión que se puede tolerar en una distancia límite y se presenta cuando las distintas longitudes de onda que viajan por el medio óptico a diferentes velocidades llegan en diferentes tiempos al receptor, ocasionando un ensanchamiento del pulso y cambio de su forma, causando inconvenientes en la calidad de los sistemas de comunicación óptica [38, 39]. Al ser un fenómeno lineal, los efectos de la dispersión cromática

aumentan a medida en que lo hacen la longitud del enlace y la velocidad de transmisión, lo que es un limitante para las transmisiones de alta velocidad, dada la relación existente entre estos parámetros; sin embargo, no está influenciada significativamente por la reducción en el espaciado entre los canales o el incremento de su número [35, 39]. Este efecto se puede representar matemáticamente, como se muestra en las ecuaciones 1.4 y 1.5, a continuación:

$$BR < \frac{1}{4\Delta t} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

En donde,

- $BR$ : Tasa de transmisión [hz\*km].
- $\Delta t$ : Valor máximo de dispersión cromática [ps].

Además,

$$\Delta t = D(\lambda) * l * \Delta \lambda \quad (\text{Ec. 1.5})$$

En donde,

- $D(\lambda)$ : Dispersión cromática de la fibra óptica [ps/nm\*km].
- $l$ : Longitud de la fibra óptica [km].
- $\Delta \lambda$ : longitud de onda [nm].

La dispersión cromática puede ser remediada con el uso de Compensadores de Dispersión Electrónica, EDC (*Electronic Dispersion Compensator*) y rejillas compensadoras de dispersión; sin embargo, el uso de Fibra Compensadora de Dispersión, DCF (*Dispersion Compensating Fiber*), acompañada de amplificadores de potencia que recuperan los niveles de atenuación introducidos al sistema óptico por la misma DCF (alrededor de 0.5 dB/km), es el método más usado y eficiente, ya que la fibra DCF presenta una alta dispersión negativa (entre -100 y -200 ps/nm\*km), produciendo una pendiente negativa con valores nominales diez veces más grandes, lo que permite la compensación de la dispersión positiva de la fibra [36, 40]. Este tipo de remediación puede hacerse bajo los tres esquemas presentados en la figura 1.23, denominados: Pre-Compensación, en la cual se ubica el tramo de fibra compensadora DCF antes de la fibra de transmisión;

compensación de tipo simétrico, que ubica los tramos de DCF antes y después de las fibras de transmisión; y, Post-Compensación, donde el tramo de DCF se ubica a continuación del segmento de fibra óptica.

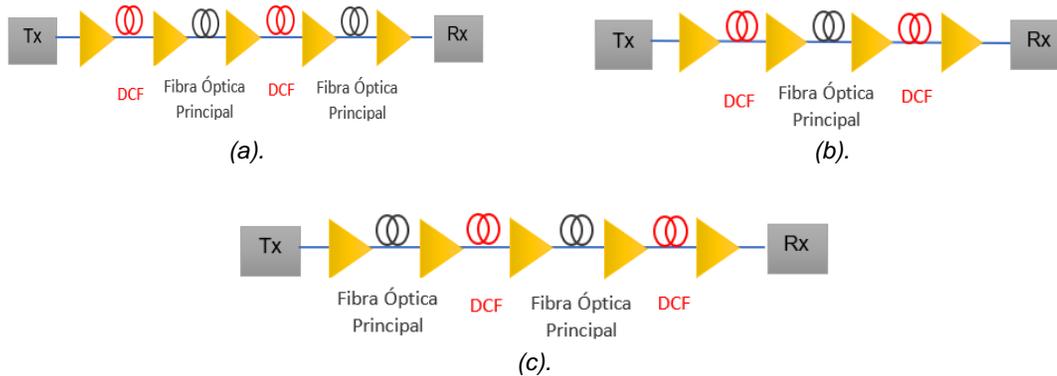


Figura 1.23. Compensación de CD en (a). Pre-Compensación, (b). Compensación simétrica, (c). Post-Compensación [40].

Los efectos de dispersión en los enlaces ópticos, también pueden darse por cuenta de la afectación producida por la atenuación y el ruido [43]. El efecto de pérdidas es representado por la ecuación 1.6.

$$P_T = (P|0)^{-\alpha l} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

En donde,

- $P_T$ : Potencia transmitida [W].
- $P_0$ : Potencia de la señal óptica en la señal de la entrada de la fibra [W].
- $l$ : Longitud de la fibra [km].
- $\alpha$ : Constante de atenuación [np/km].

La atenuación comprende cualquier tipo de fenómeno que cause la disminución de potencia de la señal propagada. En fibra óptica, este fenómeno de tipo lineal es originado por factores intrínsecos y extrínsecos al material. La ecuación 1.7 describe matemáticamente las pérdidas de potencia, medida en un kilómetro de fibra, provocadas por la atenuación en la fibra óptica y se expresa en unidades de [dB/km].

$$A = 10 \log \frac{P_{out}}{P_i} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

Donde,

- $A$ : Atenuación [dB].
- $P_{out}$ : Potencia a la salida del extremo final de la fibra óptica [W].
- $P_i$ : Potencia a la salida del extremo inicial de la fibra óptica [W].

La atenuación producida por factores intrínsecos está dada por pequeñas variaciones en la densidad del vidrio, además de impurezas como iones metálicos que absorben la luz. Sin embargo, estas pérdidas se reducen mediante la utilización de vidrios ultrapuros para la fabricación de fibras ópticas. Los factores extrínsecos relacionados con el entorno físico (pérdidas por conectores, empalmes, edad de la fibra, macrocurvaturas) y procesos de fabricación, también generan atenuación. Se estima que las menores pérdidas de la fibra por atenuación ocurren en la tercera ventana de trabajo óptico o banda C (1530 nm y 1565 nm), como se observa en la figura 1.24, con valores menores o iguales a 0.2 dB/km.

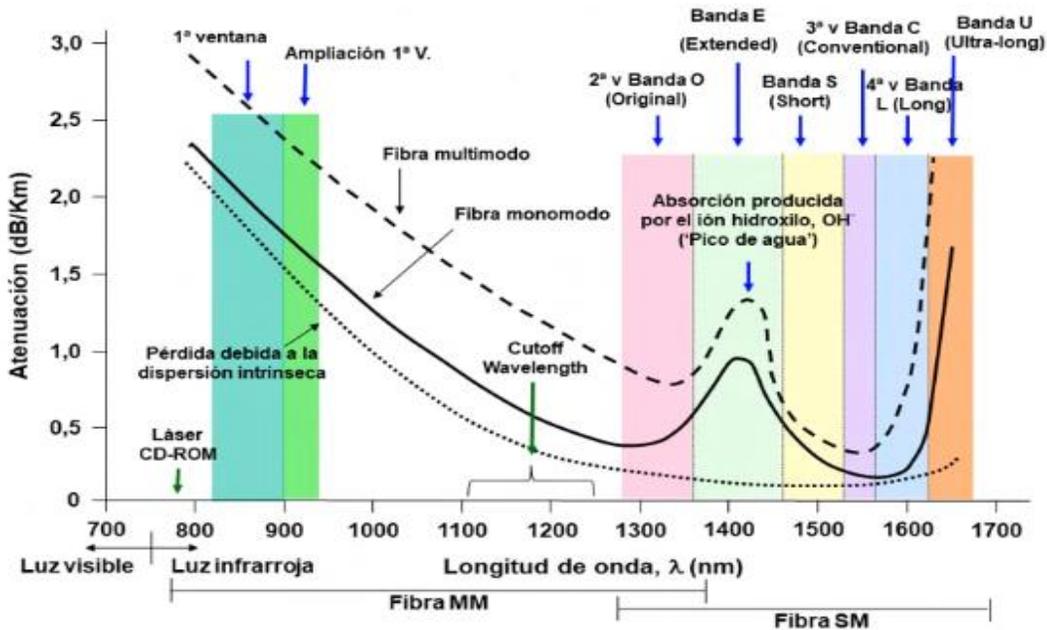


Figura 1.24. Curva de Atenuación en función de la Longitud de Onda [35].

Como es de esperarse, la atenuación en fibra óptica es compensada principalmente usando amplificadores ópticos, por lo que es importante analizar sus propiedades respecto a las características descritas por la ITU-T y la

atenuación y distancias determinadas para los enlaces, de manera que se puedan prever las pérdidas del enlace y potencia óptica requerida para la planificación de la red [35].

Finalmente, las pérdidas por ruido en sistemas ópticos, específicamente en los cables de fibra óptica, no se ven afectados por fuentes de ruido externo, como sí lo hacen los medios de cobre, salvo en los extremos del transmisor y receptor. Esto se debe principalmente al recubrimiento exterior de la fibra, que a su vez no permite que la luz abandone el medio. Además, la transmisión de la luz en la fibra óptica no genera interferencia en otro cable, lo que significa que no se presentará diafonía como si lo hace en los medios de cobre [35, 36].

**1.3.2. Efectos No Lineales.** Es común asumir que las señales se propagan por la fibra óptica con un comportamiento lineal, relacionado con la dependencia de la longitud de la fibra y el índice de refracción del núcleo del material óptico; esta es una aproximación adecuada para potencias de transmisión del rango de los mW y velocidades de transmisión inferiores a los 10 Gbps. No obstante, en el caso de las redes de banda ancha, el mínimo de velocidad de transmisión es de 25 Mbps [42], por lo cual, junto con las técnicas más eficientes de multiplexación, se generan fenómenos que hacen que la fibra no se comporte de manera lineal, conllevando a la aparición y clasificación de fenómenos no lineales como los descritos en la figura 1.25.

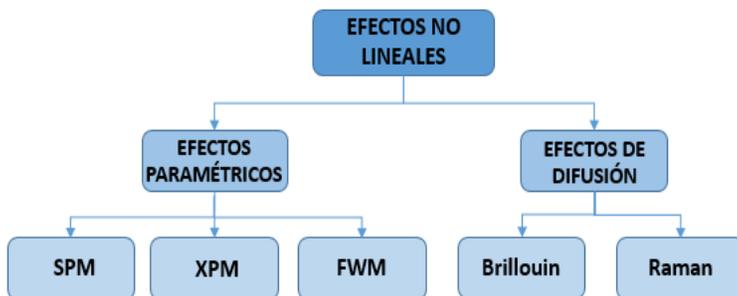


Figura 1.25. Clasificación de los Efectos No Lineales [35].

**Efectos paramétricos:** el primero de los efectos paramétricos es la Automodulación de Fase, SPM (*Self-Phase Modulation*), considerado para sistemas de transmisión que operan a velocidades iguales o superiores a 10 Gbps o menores con potencias de transmisión más elevadas, ya que estos tienen unas limitaciones significativas debido a la dispersión cromática. SPM presenta un aspecto positivo, ya que introduce un “chirp”<sup>4</sup> de signo contrario al que genera la dispersión cromática, por lo que se puede asociar este fenómeno a un tipo de

<sup>4</sup> Fenómeno en el láser, donde la longitud de onda de la luz emitida cambia durante la modulación.

compensación de dicha dispersión. En la figura 1.26, se muestra la forma en que un pulso puede sufrir expansión o compresión por efecto de la SPM en un canal, viajando por un medio óptico [42].



Figura 1.26. Ampliación y compresión de pulsos debido a SPM [54].

La Modulación de Fase Cruzada, XPM (*Cross Phase Modulation*) es generada usualmente en sistemas WDM, teniendo un efecto similar al de SPM en cuanto a la manera en que un canal puede afectar la fase del otro, generando ensanchamiento de pulsos cruzados (Figura 1.27); sin embargo, SPM es más favorable cuando dos pulsos a distinta longitud se superponen en el tiempo. El efecto de XPM puede ser reducido en los sistemas WDM, haciendo que los canales se encuentren en frecuencias muy distantes o incrementando simultáneamente el espaciado entre los canales transmitidos, permitiendo que la dispersión de las constantes de propagación sea diferente y evitando que los canales incidan entre sí y que la potencia de la señal cambie la fase de una señal adyacente.



Figura 1.27. XPM sobre tres canales ópticos [54].

Finalmente, el efecto paramétrico de Mezcla de Cuatro Ondas, FWM (*Four-Wave Mixing*) se presenta en sistemas DWDM, donde se transmite más de una longitud de onda por el mismo canal óptico, presentándose una combinación de dos o más de ellas debido a la dependencia del índice de refracción no lineal de la

fibra con respecto a la potencia de la señal, además del espaciamiento entre canales WDM, condiciones denominadas *phase-matching*, que generan nuevas componentes interferentes de la señal (Figura 1.28) y un medio de propagación no lineal [36, 43], lo que influye en la transmisión de la información y causa, principalmente, daño espectral, atenuación de potencia de las señales y efectos de diafonía.

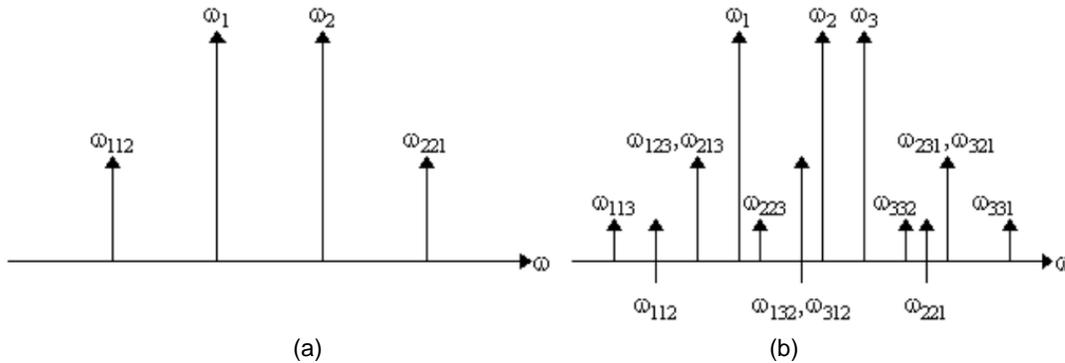


Figura 1.28. Efecto en señales (a) Originales, (b) Por efecto de FWM [43].

FWM pueden ser compensadas en sistemas DWDM haciendo uso de fibras dispersivas tipo NZ-DSF (*Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber*), como se menciona en la recomendación G.655 [44], ya que permiten la desadaptación de las fases e incorporan valores reducidos de dispersión, sin que estos lleguen a ser nulos, previniendo la aparición de efectos no lineales y dispersivos.

**Efectos de difusión:** están relacionados con los fenómenos de dispersión estimulada, que conducen a una disminución del nivel de potencia e introducen fenómenos degenerativos sobre la calidad de transmisión. Es el caso del efecto de la Dispersión Estimulada de Raman, SRS (*Stimulated Raman-Scattering*), mencionado previamente; pese a esto, no se ha realizado alguna mención como parte de los efectos no lineales sobre los sistemas ópticos. Este es un efecto de banda ancha producido cuando se introducen dos o más señales de diferentes longitudes de onda sobre la misma fibra, generando una transferencia de potencia desde los canales con mayor frecuencia (menor longitud de onda) a los canales que tienen frecuencia inferior (mayor longitud de onda). Además, el acoplamiento de potencia se puede producir tanto en el sentido de la propagación de las señales como en el sentido inverso, siempre y cuando en ese momento haya presencia de potencia en los dos canales [44, 45]. El efecto de SRS sobre los enlaces ópticos se muestra en la figura 1.29, a continuación:

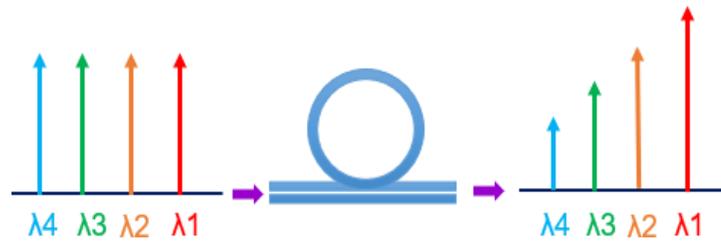


Figura 1.29. Efecto de transferencia de energía debido a SRS [45].

El efecto de Dispersión Estimulada de Brillouin, SBS (*Stimulated Brillouin-Scattering*) difiere del SRS en que los fonones generados son acústicos en lugar de ópticos, lo que trae como consecuencia que la onda de Stokes para el efecto Brillouin solo se propague en sentido Contra-Propagante a la dirección de la onda incidente y con una frecuencia inferior, mientras que el SRS podía propagarse en los dos sentidos. Además, en el SBS, la ganancia de Brillouin tiene una anchura de aproximadamente 20 Mhz y también depende de la composición del núcleo de la fibra. En la figura 1.30 se presenta el efecto de la dispersión estimulada de Brillouin en una señal a una longitud de onda de 1550 nm [45, 43].

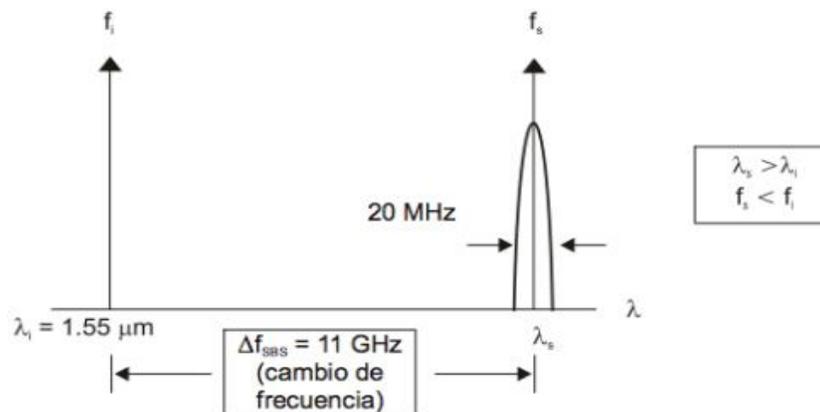


Figura 1.30. Onda dispersada debido al efecto de SBS [43].

Como consecuencia, se presenta atenuación de la señal y el regreso al transmisor de una porción de la potencia transmitida, por lo que se utiliza generalmente un apantallado o rejilla que ayuda a evitar la retroalimentación de la potencia transmitida.

**Nota de los autores:**

*En este capítulo se caracterizaron diferentes tecnologías de red de los sistemas de comunicación ópticos, dando una visión general de las arquitecturas de tipo PON, así como algunos tipos de amplificación que podrán ser utilizados en*

*conjunto con estas arquitecturas. Por otra parte, se definieron los fenómenos de propagación que se pueden presentar dentro de los sistemas ópticos, identificando las degradaciones o fenómenos más significativos a velocidades iguales o superiores de 10 Gbps.*

## 2. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO ÓPTICO, METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

Para tener una visión acerca del comportamiento de los sistemas ópticos y la influencia de los efectos lineales y no lineales, la ITU-T en la recomendación G.697 propone una serie de parámetros de Monitoreo de Desempeño Óptico, OPM (*Optical Performance Monitoring*), con el fin de alcanzar el objetivo de funcionamiento óptimo de las redes ópticas y ofrecer una aceptable calidad de servicio, QoS (*Quality of Service*) [27, 46]. Este tipo de monitoreo se hace respecto a la calidad de la señal presentada en el sistema a nivel físico, indicando el mínimo de parámetros ópticos que pueden ser usados para el despliegue exitoso de servicios de comunicación y elementos de red ópticos, ONE (*Optical Network Elements*), particularmente aquellos que no efectúan conversiones óptico-eléctrico-óptico. Así, OPM ofrece una perspectiva amplia respecto a la metodología y las herramientas necesarias para la implementación de los escenarios a considerar en la evaluación de los sistemas ópticos de comunicación a implementar.

Este capítulo toma como referencia las publicaciones de investigaciones y recomendaciones relacionadas con los parámetros de desempeño óptico especificados por la ITU-T, de donde se extraerá la información relacionada con las herramientas de simulación más apropiadas para plantear una metodología y algoritmo de simulación en diferentes escenarios.

### 2.1. MONITOREO DEL DESEMPEÑO ÓPTICO

Los parámetros de monitoreo están citados en la recomendación G.697 de la ITU-T, que describe las diferentes formas de obtener datos significativos sobre el nivel de calidad del enlace presente en los sistemas ópticos. Esta metodología es comúnmente utilizada para el monitoreo de las redes ópticas a nivel físico y la calidad de la señal, dada la precisión de la documentación y la facilidad con que aporta evidencias determinantes para la implementación de un diagnóstico y reparación en caso de presencia de fallas del sistema, mejorando la calidad del servicio óptico.

La metodología OPM implementa un conjunto de procedimientos y técnicas de análisis de las degradaciones presentes en cada bloque del sistema óptico (transmisor, medio, amplificación, elementos de red y recepción) de arquitectura DWDM. Cada uno de estos elementos puede ser monitoreado, siguiendo tres esquemas propuestos por la especificación, definidos como: i) Parámetros de

Desempeño Óptico, donde se busca analizar las variables y los parámetros más importantes denominados como Tasa de Error de Bit, BER (*Bit Error Rate*), Factor de Calidad (*Q Factor*), Relación Señal a Ruido Óptico, OSNR (*Optical Signal to Noise Ratio*) y Diagrama de Ojo; ii) Parámetros de Monitoreo Óptico, donde se analizan factores definidos en cada etapa del sistema como atenuación, ruido, penalidades de potencia, entre otros; y iii) Técnicas de Monitoreo Óptico, las cuales relacionan la forma en la que se puede realizar la medición [47].

**2.1.1. Parámetros de Desempeño Óptico.** Las redes ópticas tipo DWDM cuentan con parámetros que brindan información acerca del desempeño del sistema de comunicación, encontrándose entre los más importantes:

**Relación Señal a Ruido Eléctrica (ESNR, *Electrical Signal to Noise Ratio*) o Factor de Calidad (*Q Factor*):** es la medida en la entrada de un circuito de decisión de un receptor; muestra el deterioro generado por los defectos ópticos y eléctricos en un punto examinado de la red. Este parámetro es útil para evaluar la calidad esperada en el funcionamiento del sistema óptico, cuando no se puede realizar una correcta medición de la BER.

El factor de calidad  $Q$ , se define en la ecuación 2.1, como:

$$q[L] = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

En donde,

- $q$ : Factor de calidad.
- $\mu_0, \mu_1$ : Niveles lógicos.
- $\sigma_0, \sigma_1$ : Desviaciones típicas definidas por la distribución de ruido Gaussiano.

Medida en decibelios (dB), esta expresión se muestra en la ecuación 2.2:

$$Q[dB] = 20 \log(q) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

**Tasa de Error de Bit (BER, Bit Error Rate):** representa el número de bits que se transmiten erróneamente, siendo este uno de los parámetros más importantes. Según la ITU-T, el valor típico de BER se encuentra alrededor de  $10^{-12}$  para redes WDM [48]; es decir, por cada billón de bits transmitidos, se tiene solamente un bit errado.

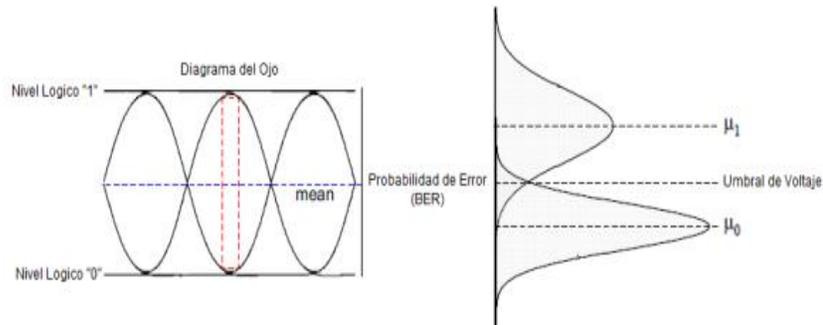


Figura 2.1. Relación Factor Q vs BER [47].

**Relación Señal a Ruido Óptica (OSNR, Optical Signal to Noise Ratio):** esta medida de calidad relaciona el nivel de señal óptica que transporta la información, respecto al nivel de ruido que se presenta; el parámetro no está limitado solo a dispositivos activos como los láseres y amplificadores ópticos, que son las fuentes predominantes de ruido, sino también a dispositivos pasivos como la fibra óptica y los conectores que pueden adicionar componentes de ruido al sistema. Esta relación se calcula como se muestra a continuación:

$$OSNR(dB) = 10 \log \left( \frac{P_i}{N_i} \right) + 10 \log \left( \frac{B_m}{B_r} \right) \quad (\text{Ec. 2.3})$$

En donde,

- $P_i$ : Potencia de la señal óptica.
- $N_i$ : Valor promedio de la potencia de ruido medido en el ancho de banda.
- $B_m$ : Ancho de banda.
- $B_r$ : Ancho de banda óptico de referencia seleccionado típicamente para 0.1 nm.

**Diagramas de Ojo:** permiten el estudio de los parámetros anteriores de manera gráfica; su análisis ofrece las formas de onda de los pulsos que se propagan en un

enlace de comunicaciones, mostrando desfases, niveles de ruido, potencia de las señales y permitiendo extraer los parámetros de BER y factor de calidad [46, 49], además de medir el tiempo de subida correspondiente al valor promedio del nivel de un uno lógico y bajada al de un cero lógico, periodo de bit correspondiente a la apertura y cierre del ojo, obtenido a partir del cruce de la amplitud y el tiempo; proporciona, además, el jitter, que corresponde a una desviación de fase respecto a la posición ideal en el tiempo, de una señal digital que se propaga en un canal de transmisión; este efecto completamente indeseable, introduce una serie de problemas al canal y de no ser tratado de forma adecuada, puede degradar completamente la calidad y desempeño del enlace [49].

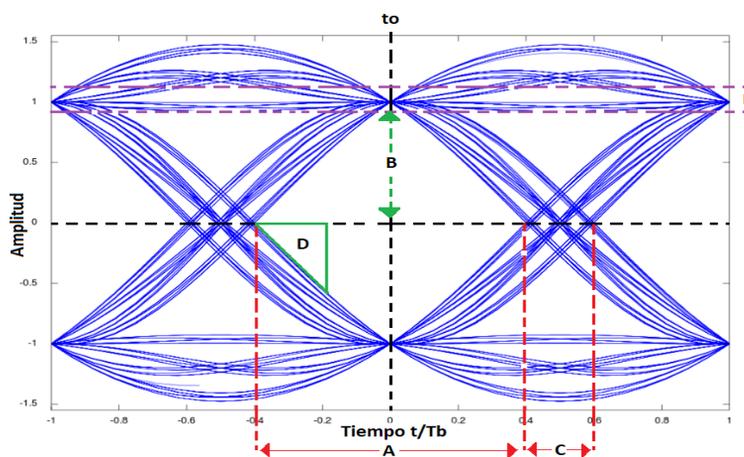


Figura 2.2. Diagrama de ojo [51].

En la figura anterior:

- A: Intervalo de tiempo en el que se puede muestrear la señal para decidir (Periodo de Bit).
- B: Margen de ruido.
- C: Distorsión de cruce por cero (Jitter).
- D: Pendiente: Sensibilidad a errores en el instante del Muestreo.
- E: Distorsión máxima.
- $t_0$ : Instante óptimo de decisión medido con respecto al origen del tiempo.

**2.1.2. Métricas para el Monitoreo Óptico.** Las redes ópticas deben ser capaces de monitorear el estado de la red, simultáneamente con la calidad de la señal de datos propagada, ofreciendo diagnóstico, métodos de reparación y de redistribución de tráfico y recursos de la red, razón por la cual se deben tener en cuenta las métricas para monitoreo de redes ópticas, con el fin de analizar,

localizar y aislar los efectos degradantes, de manera que se puedan tomar acciones para la corrección y prevención de dichos impedimentos. Por este motivo, OPM también define para cada nivel o bloque de la arquitectura de red óptica (Figura 2.3), variables asociadas con la degeneración del desempeño del sistema, las cuales se convierten en medidas relacionadas a la calidad de la señal y desempeño de la red.

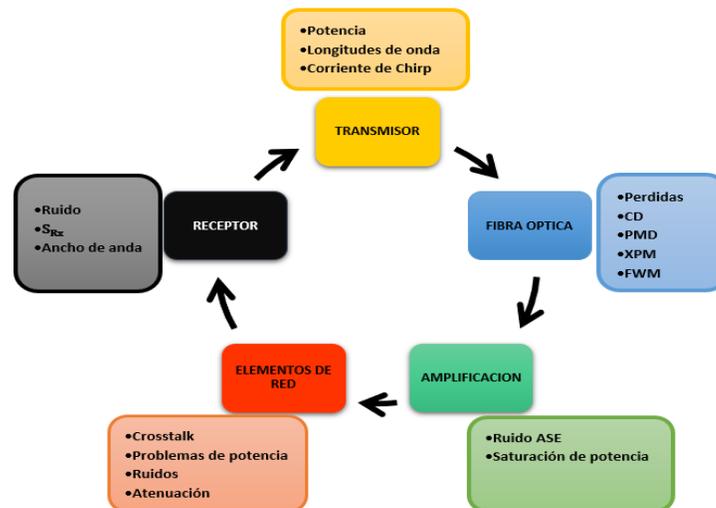


Figura 2.3. Factores paramétricos incidentes en el desempeño de la red [52].

Como se puede observar en la gráfica anterior, OPM da seguimiento a los diferentes bloques del sistema de comunicación óptica, dirigiendo su atención a aquellos que pueden generar penalidades de potencia, sea por efecto de incorrectas instalaciones o configuraciones en los dispositivos transmisores o por rupturas a lo largo del medio óptico, que posteriormente causarán reducción de potencia en diferentes puntos de la transmisión y llegan a convertirse en excesos de ruido, el cual a la postre se verá reflejado en el espectro óptico. Además, dada la adopción de redes DWDM, también se monitorea cualquier tipo de variante en las longitudes de onda que puedan perjudicar los canales, así como la frecuencia y amplitud de señal emitida por el láser y que ocasionan un ensanchamiento del espectro no deseado (Chirp) [50, 51].

Al igual que en el nivel anterior, OPM está dispuesto para el análisis del bloque de medios de transmisión óptica, respecto a las penalidades de potencia generadas por efecto de altos niveles de saturación que violan los límites de potencia tolerados en sistemas de comunicación tipo WDM y que dan pie a la aparición de fenómenos no lineales como XPM y FWM, los cuales generan pérdidas y distorsión en la señal de transmisión en que se implementan dos o más canales ópticos, simultáneamente, en una fibra. El efecto de XPM puede causar

que la potencia de un canal afecte la fase de otro, generando ensanchamiento de pulsos cruzados. De manera similar, la aparición de FWM provoca efectos que deterioran la calidad del sistema, como la mezcla de señales, la cual genera nuevas componentes en frecuencia interferentes de la señal óptica y un medio de propagación no lineal, influyendo en la calidad de transmisión de la información y causa principalmente daño espectral, atenuación de potencia de las señales y efectos de diafonía. Además, efectos no lineales como SBS y SRS, también pueden ser monitoreados y analizados por OPM en este bloque [36, 43, 51].

OPM también se encarga de la realización de monitoreo en relación a las penalidades de potencia en la sección de amplificación, en donde, además de realizar el monitoreo de OSNR, en simultáneo puede verificar la ganancia de potencia y el ruido saturado generado, por lo cual se deben tener en cuenta las limitaciones que genera la acumulación de ruido ASE [51], que además de degradar la relación señal a ruido, limita severamente el producto entre la tasa de bit y la distancia máxima de propagación. Otros fenómenos como crosstalk, ruido y atenuación, monitoreados en los elementos de red, degeneran los datos en los canales ópticos; se hace énfasis sobre en el estudio del último, ya que en gran medida depende de los métodos de fabricación de los elementos que ofrecen diferentes valores de atenuación y están directamente relacionados con la disminución exponencial en la potencia de la señal transmitida respecto a la distancia de transmisión [50, 51]. Además, el registro de la sensibilidad en el receptor beneficia el monitoreo del bloque final del sistema óptico, ya que aporta información del estado y reconocimiento de la señal transmitida a través del sistema.

## **2.2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN**

Un conjunto de procedimientos y técnicas que se aplican de manera ordenada y sistemática para el desarrollo investigativo determina la metodología que se efectúa para establecer la manera en que la investigación recabará y analizará los datos obtenidos. De esta manera, la metodología que se implementa otorga validez y rigor científico a los resultados que serán obtenidos posteriormente.

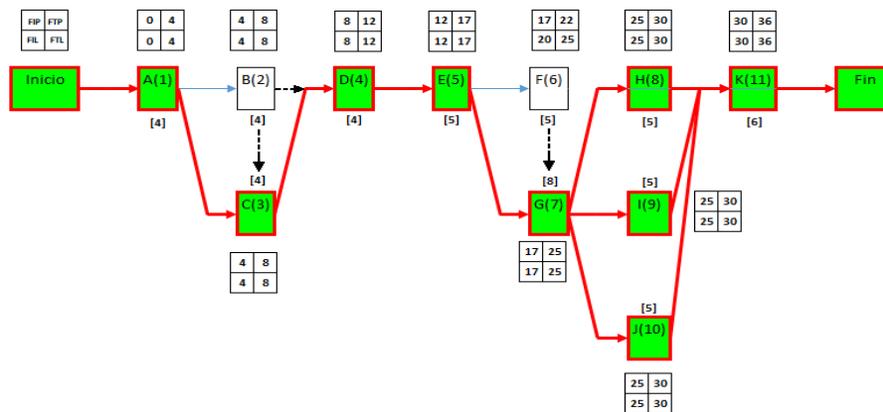


Figura 2.4. Esquema de ruta crítica o diagrama de PERT [54].

En la figura anterior:

- FIP: Fecha de inicio más próxima de una actividad.
- FIL: Fecha de inicio más lejana de una actividad.
- FTP: Fecha de terminación más próxima de una actividad.
- FTL: Fecha de terminación más próxima de una actividad.

La popularidad de las metodologías tradicionales se basó en que fueron modelos bien estructurados y centrados principalmente en la planificación. Sin embargo, las nuevas tendencias presentan direccionamientos ágiles que definen principalmente modelos incrementales, con menor documentación y actitud cooperativa [53]. Una de ellas, de gran uso, es la denominada Técnica de Revisión y Evaluación de Programas, PERT (*Program Evaluation and Review Techniques*), que define un modelo metodológico ágil de seguimiento y gestión aplicado al sector de las tecnologías, en el que deben ser consideradas operaciones independientes e interrelacionadas para planificar proyectos e identificar flujos de trabajo optimizados. Este método presenta ventajas significativas dadas las facilidades para su aprendizaje, planteamiento exacto para los procesos de realización del proyecto, facilidad de control, rapidez en la concepción e introducción de modificaciones y manejo total sobre el proyecto [52], lo que adicionalmente permite la definición de herramientas, algoritmos y métodos de simulación, que admitirán precisar los escenarios y comportamientos del sistema en un enfoque práctico.

**2.2.1. Herramientas de simulación.** En el mercado se encuentra una alta variedad de software dedicado a la simulación de sistemas ópticos de comunicación, que ofrecen entregar simultáneamente indicadores, métricas y reportes de funcionamiento; son herramientas desarrolladas para uso comercial,

cuya amplia gama de funciones satisface diferentes tipos de requerimientos que agregan valor a los resultados obtenidos. En la Tabla 2.1, se pueden observar algunas de las aplicaciones software de tipo comercial licenciado que actualmente se pueden encontrar en el mercado [54].

Igualmente, se encuentra software para el diseño y prueba de enlaces de fibra óptica de tipo libre, cuya funcionalidad está enfocada en brindar soluciones más elementales, que no permiten la resolución de procesos complejos; sin embargo, existe la posibilidad de adquirir estas aplicaciones bajo licencia, extendiendo algunas de sus funcionalidades y eliminando el carácter de software libre, pero que continua sin cubrir las necesidades de desarrollo requerido en este trabajo de investigación.

<b>OptSim</b>	
	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>RSoft Design Group</i>
<b>PROPIETARIO</b>	SYNOPSYS
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p>Permite el diseño y la simulación de sistemas de comunicación óptica monomodo a nivel de propagación de la señal, entre los cuales se encuentra FTTx/PON.</p> <p>Define los modos de simulación como modo Muestra y modo Bloque, que son utilizados dependiendo de los resultados requeridos.</p> <p>La simulación modo Muestra simula un componente, pasando una muestra de datos a otro en cada paso de tiempo de la simulación, permitiendo que la señal de datos pase entre componentes y represente una muestra única en cada instante de tiempo.</p> <p>La simulación en modo muestra presenta dos tipos de técnicas diferentes: i) Técnica de Propagación Espectral, SPT (<i>Spectral Propagation Technique</i>), la cual trabaja en el dominio del espectro; y ii) Técnica de Ancho de Banda Variable de Simulación, VBS (<i>Variable Bandwidth Simulation</i>), trabaja en el dominio del tiempo, donde las señales son propagadas a través de las redes como muestras en el dominio del tiempo.</p> <p>La simulación modo Bloque, la secuencia de entrada se analiza en bloque hasta la salida.</p>
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	<p>Posee una interfaz gráfica simple que simula instrumentos de medición a nivel de laboratorio. Además, posee interfaces de diseño con herramientas de terceros como MATLAB, Cadence Spectre, Luna Optical Vector Analyzer y adicionalmente posee librerías de componentes predefinidos de fabricantes, lo cual facilita el modelado de dispositivos comercialmente disponibles.</p>
<b>ModeSYS</b>	
	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>RSoft Design Group</i>

<b>PROPIETARIO</b>	SYNOPTSYS
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Permite el diseño y simulación de sistemas de comunicación óptica multimodo FTTx/PON, presentando especial atención en las aplicaciones de comunicación de datos.
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	Permite el análisis de rendimiento a través de modelos estadísticos de efectos de fibra multimodo, además de poseer un conjunto de herramientas de medición que permite analizar las características principales de sistemas de comunicación óptica multimodo.
<b>OptiSystem</b>	
	
<b>PROPIETARIO</b>	<i>Optiwave Photonic Software</i>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Software que permite el diseño que permite panificar, probar y simular enlaces ópticos en la capa de transmisión de las redes ópticas.
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	<p>Permite simular tecnologías emergentes PON, como las diversas técnicas de Acceso Múltiple Óptico por División de Código, OCDMA (<i>Optical Code-Division Multiple-Access</i>) para arquitecturas OCDMA-PON, además de una variedad de redes ópticas pasivas BPON, GPON, EPON.</p> <p>Posee herramientas de análisis como diagramas de BER, Q Factor, Signal Chirp, además de interfaces con otras herramientas como MATLAB, Simulink, Agilent.</p>
<b>VPI Transmission Maker</b>	
	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>VPI Photonics Design Automation (División de VPISystems)</i>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Herramienta para el diseño de nuevos sistemas ópticos de corto y largo alcance, permitiendo la actualización de tecnología y sustitución de componentes para redes ya existentes.
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	<p>Diseño de sistemas WDM de alta capacidad, incluyendo nuevos sistemas de modulación, detección de colisiones, compensación de PMD, amplificadores tipo Raman e híbridos, procesamiento de señales ópticas y monitoreo de canales ópticos.</p> <p>Permite la selección entre tecnologías tipo PON y diferentes topologías de agregación y distribución de redes.</p> <p>Incluye la cuantificación de pérdidas de señales inducidas en la fibra con modelos de CD, Kerr, PMD, SRS, SBS y reflexiones.</p>
<b>MATLAB</b>	
	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>MathWorks</i>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Herramienta de diseño y simulación basada en modelos llamada Simulink, el cual es un entorno visual de diagramas en bloque que funciona sobre el entorno de programación de Matlab y no requiere redactar ningún tipo de código.

<b>FUNCIONES GENERALES</b>	Modelado y simulación de sistemas ópticos, así como generación de código automático de un modelo y posteriores pruebas de manera anticipada o frecuente, procesamiento de señales de diferentes fuentes (audio, imágenes, texto), diseño, prueba e implementación de sistemas de control, así como importación de datos, desarrollo de algoritmos, depuración de código, aumento de potencia de procesamiento, creación de modelos y análisis de datos.
----------------------------	---

Tabla 2.1. Software comercial de simulación para sistemas ópticos [54].

En la Tabla 2.2, se observan algunos de los diferentes tipos de software libre de simulación óptica disponibles y algunas de sus características.

<b>Optical WDM Network Simulator (OWNs)</b>	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>Dawn Networking Research Lab</i>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Facilita el estudio de esquemas de conmutación y enrutamiento en redes WDM.
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	Diseñado como una extensión del simulador de red NS (Network Simulator), es ampliamente usado para investigación y se encuentra disponible al dominio público.  Incorpora características para simulación de redes multiprotocolo WDM como: algoritmos de enrutamiento, construcción virtual de topologías, enlaces con múltiples longitudes de onda y nodos de conmutación óptica.
<b>Asons (An Automatically Switched Optical Network Simulator)</b>	
<b>DESARROLLADOR</b>	<i>NTUA (National Technical University of Athens) Telecommunications Laboratory</i>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	Software de simulación que permite experimentar con redes ópticas automáticamente suicheadas.
<b>FUNCIONES GENERALES</b>	Está basado en el simulador NS-2. Permite definir enlaces de fibra basados en WDM. Soporta simulaciones de fallas de fibra óptica, aumento de modelos de red por capas y diseño e implementación de algoritmos de control de red.

Tabla 2.2. Software libre de simulación para sistemas ópticos [54].

Teniendo en cuenta las herramientas para simulación de sistemas de comunicación óptica mencionadas, para el desarrollo del presente trabajo de grado se ha considerado el software comercial OptSim como herramienta de diseño, simulación y evaluación del desempeño del sistema óptico, haciendo uso del tipo de simulación modo Muestra mediante la técnica VBS, debido a que satisface las necesidades y requerimientos para la investigación por las características y facilidades para la visualización, análisis, procesamiento y obtención de los datos requeridos, que llevarían a buen término el presente desarrollo investigativo [47, 55, 56].

**2.2.2. Metodología de Simulación.** El establecimiento metodológico respecto a los procesos de simulación es necesario para la obtención de resultados

coherentes. Varios autores coinciden y se complementan al definir el proceso metodológico de simulación, como el modelado del comportamiento de sistemas reales conforme evoluciona en el tiempo, reduciéndolo a una estructura más simple mediante el uso de herramientas software [55] y con el desarrollo de las etapas de la metodología, dividiéndola en tres grandes bloques, definidos de la siguiente forma [57, 58, 59]:

**Planeación:** en donde toma lugar la planificación del desarrollo del proceso de simulación más apropiado, determinando los objetivos del estudio y modelado del problema.

**Desarrollo:** distingue las siguientes actividades:

*Recolección de Datos:* etapa que se enfoca en la reunión de información de diversas fuentes, a fin de obtener un concepto más detallado para el proceso de investigación y desarrollo.

*Conceptualización:* esta etapa involucra actividades como la definición del modelo lógico, asunciones y simplificación. Sin embargo, también considera qué información va a ser intercambiada entre los componentes del modelo de simulación, además de las variables globales.

*Realización:* define el lenguaje de programación o herramienta de simulación a utilizar, de acuerdo con las necesidades y objetivos del sistema modelado.

*Integración:* en esta fase se integra y prueba el ambiente de simulación, seleccionado para la posterior ejecución del modelo.

**Experimentación:** incluye las siguientes fases donde se realiza la ejecución del diseño experimental y por consiguiente se obtienen los datos requeridos. Este bloque lo conforman:

*Ejecución de la simulación:* esta fase verifica si el modelo implementado cumple con los requerimientos del modelado; de lo contrario, se procede a la corrección de los parámetros necesarios para volver a proceder con la simulación.

*Análisis de datos y evaluación de resultados:* es la fase final de la metodología, en la cual se obtendrá la documentación técnica en la cual estará descrito el resultado del procesamiento de los datos que describen el modelo desarrollado.

**2.2.3. Algoritmo de la simulación.** El algoritmo de simulación que se observa a continuación es generado siguiendo los parámetros de las metodologías de la Univertsitat Politècnica de Valencia [57], Gibrán García [58] y Fullana y Urquía [59], y que, en concordancia con lo establecido en el modelo metodológico seleccionado, se configura conceptualmente en el algoritmo más apropiado para el desarrollo y análisis de la simulación del sistema óptico, que es planteado más adelante.

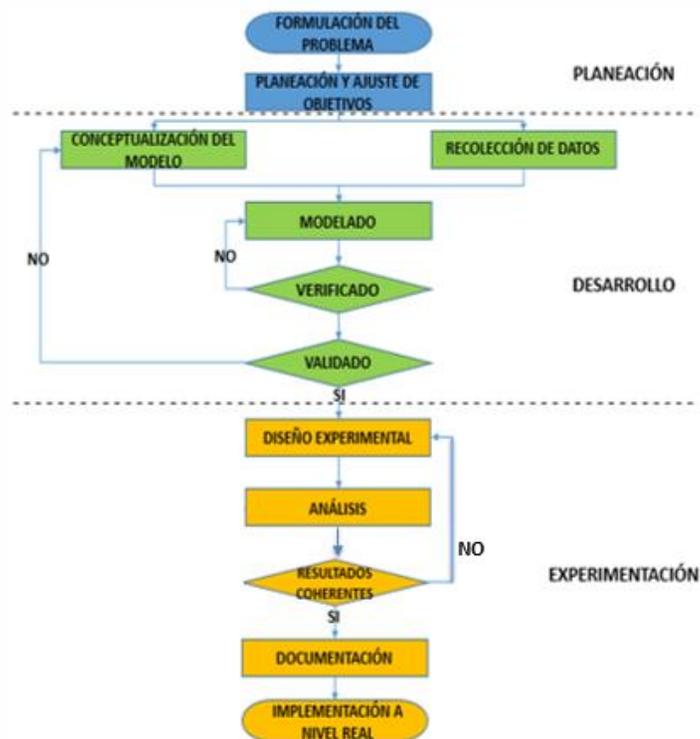


Figura 2.5. Algoritmo de simulación para la herramienta OptSim [57].

## 2.3. MÉTRICAS, ESCENARIO DE SIMULACIÓN Y CASOS DE ESTUDIO

Tomando como fundamento teórico los apartes presentados en estos capítulos, el desarrollo de actividades está dirigido al análisis del comportamiento de redes ópticas XGS-PON, en enlaces de bajada tipo punto a punto y aplicaciones de arquitectura FTTH. La definición de los parámetros establecidos para el análisis del desempeño del enlace óptico a caracterizar está definida por las métricas de

los equipos comerciales del mercado provistas por los fabricantes, previa verificación de que dichos parámetros corresponden a la mejor opción, para posteriormente realizar variaciones dirigidas a determinar su influencia en el sistema óptico.

**2.3.1. Métricas.** XGS-PON está propuesto para ser capaz de soportar servicios de red coexistentes basados en paquetes, acceso a internet de alta velocidad, televisión, voz sobre IP (VoIP) y servicios heredados como telefonía tradicional, POTS (*Plain Old Telephone Services*), así como múltiples servicios emergentes que se puedan presentar en el mercado. De esta forma, XGS-PON presenta capacidades que requieren gran cantidad y calidad de transmisión, basándose en los requerimientos generales de las redes GPON y XG-PON1, debido al empleo de una arquitectura convergente a la estructura general de las redes ópticas ya implementadas, desarrolladas para ampliar el alcance y crecimiento de las de nueva generación.

Esta tecnología se basa en la capacidad de la fibra óptica para el transporte de diferentes longitudes de onda simultáneamente sin mutua interferencia; cada una de ellas representa un canal óptico y permite un mayor número de canales, reduciendo la dispersión cromática de cada canal mediante el uso de un láser de mayor calidad, fibras de baja dispersión y módulos compensadores de dispersión, DCM (*Dispersion Compensation Modules*) para el mejoramiento de la calidad de transmisión de tecnologías NG-PON1, lo que agrega características de compatibilidad y proporciona atributos que permitirán la transición a redes NG-PON2. Estas redes son representadas en la Figura 2.6.

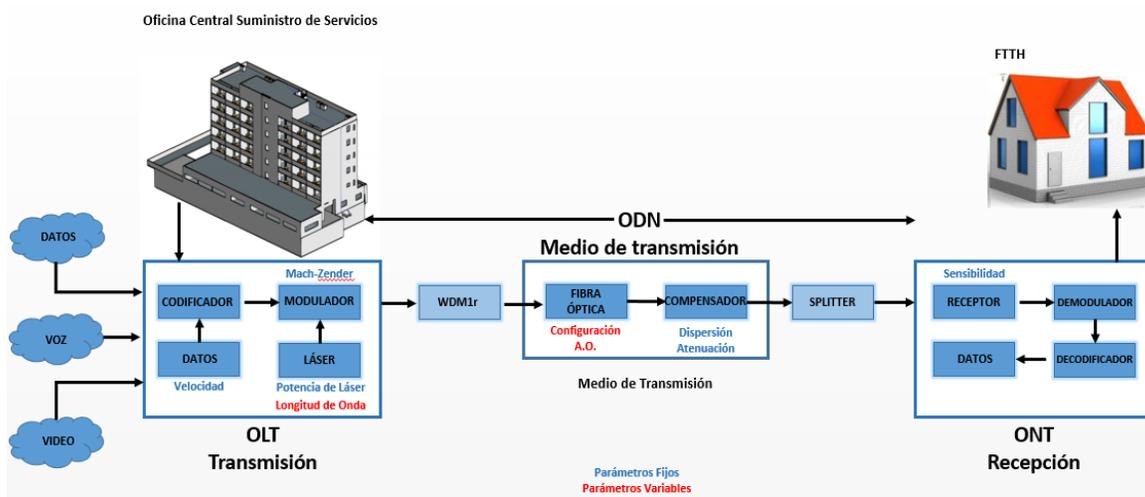


Figura 2.6. Escenario general para arquitecturas GPON [42].

**1. El bloque de transmisión**, también definido como cabecera o punto de partida de la red óptica de suministro, tiene la capacidad de soportar y proveer servicios a nivel de acceso PDH (*Plesiochronous Digital Hierarchy*) y SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*) como Triple Play, telefonía, voz sobre IP (*VoIP*), juegos en línea, HDTV, videoconferencia, video bajo demanda (*VoD*) e internet. En esta etapa se encuentra:

**Terminal de Línea Óptica (OLT):** es el hardware activo situado en la central de la empresa proveedora de servicios, que ejecuta funciones de enrutamiento para ofrecer los servicios demandados por los usuarios. El objetivo de la OLT es realizar funciones de control en la red de distribución respecto a la corrección de errores y control de las potencias de transmisión y recepción, además de coordinar la multiplexación del extremo de los terminales de red óptica (ONT) de los canales de subida y bajada, agregando la capacidad de configurar y controlar el acceso a servicios específicos. Como se puede observar en la Figura 2.6, la OLT adquiere sus datos de diferentes fuentes de información, actuando como concentrador de todas ellas.

Países como España, Australia y Pakistán, están desplegando las primeras redes ópticas de arquitectura XG-PON2, haciendo uso de OLTs XGS-PON Combo en redes ya desplegadas (Brown Field), debido a que los módulos ópticos de este tipo de OLT implementan un puerto dual que funciona simultáneamente en modo GPON y XGS-PON, mientras que para el despliegue de nuevas redes ópticas (Green Field), hacen uso de Terminales de Línea Óptica XGS-PON puros [60, 61]. La Tabla 2.3, presenta algunas de las marcas proveedoras de este Hardware para despliegues XG-PON2 y sus principales características.

PARÁMETROS	RAISECOM	HUAWEI	ISKRATEL
Modelo	ISCOM6800 xPON	EA5800-X17	SI3000 LUMIA (SPG)
Ventana de operación [nm]	1490 – 1577	1550	1550
Velocidad Uplink [Gbps]	10.3125	10	10
Velocidad Downlink [Gbps]	10.3125	10	10
Throughput	1.28 Tbps	3.6 Tbps	120 Gbps
MTBF	>15 Años	>20 años	N/A

Tabla 2.3. Parámetros Terminales de Línea Óptica OLT XGS-PON.

La operación de estos dispositivos en aplicaciones FTTH está basada en los requerimientos definidos por el estándar G.9807.1 de la ITU, especificado para tasas de transmisión nominales a nivel de acceso y velocidades de transmisión de datos tipo STM-64, para tecnologías ópticas SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*),

con velocidades simétricas de 9953.28 Mbps, presentando adicionalmente facilidades en la multiplexación y demultiplexación de las señales en el sistema.

**El empleo de modulación óptica** puede realizarse de dos maneras: i) Modulación Directa, generada por medio de la modulación de la portadora óptica a través de láseres modulando directamente; y, ii) Modulación Externa, producida por dispositivos externos al láser que modulan su luz radiada, antes de ser transmitida por el medio óptico. En la Figura 2.6, se presenta el uso de un modulador externo electroóptico Mach-Zehnder, MZI (*Mach-Zehnder Interferometer*), que son los más usados en los sistemas ópticos debido a las prestaciones que ofrece sobre el sistema, así como por su economía en el diseño [62]. Entre los desarrolladores de moduladores MZI se pueden encontrar los siguientes fabricantes:

PARÁMETROS		SHF 46213A	SHF 46211A			
Modulación		DPSK y DQPSK	ASK y DPSK			
Longitud de Onda		Banda C y L	Banda C y L			
Pérdidas por Inserción [dB]	Mínimo	11	11			
	Máximo	13	13			
Ancho de Banda Electroóptico de datos modulados [GHz]		15	11			
Tasa de Bit [Gbps]	Mínimo	N/A	NRZ	2	RZ	8
	Máximo	N/A		12.5		12.5
Potencia de Entrada Óptica Máxima [dBm]		16	16			
Potencia de Entrada del Amplificador (dBm)		4	10			
Temperatura de Operación (°C)	Mínimo	10	10			
	Máximo	35	35			

Tabla 2.4. Parámetros Moduladores Ópticos XGS-PON.

**El uso de Diodos Láser de Onda Continua** genera una intensidad óptica constante, que es recibida por el modulador electroóptico externo al que se hace llegar la señal moduladora y donde posteriormente estará modulada de la forma deseada. Este tipo de láser puede ser sintonizado para que el patrón de salida de luz sea menor y más estrecho, lo que permite la emisión de diferentes longitudes de onda por medio de cambios eléctricos. Las fuentes láser pueden ser de varios tipos y utilizadas en los diferentes sistemas de fibra óptica, según sea las características de estos dispositivos [63].

TIPO DE DISPOSITIVO	LONGITUD DE ONDA [nm]	POTENCIA DENTRO DE LA FIBRA [dBm]	ANCHO DE BANDA	TIPO DE FIBRA
LED	850, 1300	-30 a -10	< 250MHz	Multimodo
Láser Fabry-Perot	850, 1300 (1280 – 1300), 1550 (1480 – 1650)	0 a 10	> 10GHz	Multimodo Monomodo

Laser DFB	1550 (1480 – 1650)	0 a 13 (25 con amplif. óptica)	> 10GHz	Monomodo
VCSEL	850	-10 a 0	> 10GHz	Multimodo

Tabla 2.5. Especificaciones estándar de fuentes de fibra óptica.

**Los sistemas ópticos** hacen uso de dispositivos de multiplexación en la oficina central, debido a que esta tecnología permite la transmisión de varias señales independientes sobre una sola fibra óptica, mediante el uso de diferentes longitudes de onda procedentes de los haces de luz láser o LED, multiplicando el ancho de banda efectivo de la fibra óptica y facilitando las comunicaciones Bidireccionales. En sistemas que hacen uso de DWDM, permite el transporte de cualquier formato de transmisión en cada canal óptico y el uso de diferentes longitudes de onda para enviar información síncrona y asíncrona, analógica o digital, por la misma fibra.

PARÁMETROS	USource	Televes	HiLink
Longitud de Onda [nm]	1260 – 1620	1550	1528 – 1565
Espaciado del Canal [nm]	0.20	0.8	0.22
Pérdida de Inserción [dB]	1.4 – 1.7	< 1.8	1.2 – 3.9
Pérdida de Retorno [dB]	45	> 45	> 45
Máxima potencia óptica [mW]	300	158	500

Tabla 2.6. Parámetros de Multiplexores.

**2. En el segundo bloque o Red de Distribución Óptica (ODN)** se encuentran elementos pasivos, es decir, aquellos que no tienen la capacidad de modificar la señal transmitida por medio de otra señal eléctrica, ya que no están alimentados por fuentes externas. Entre estos elementos se encuentra el cable de fibra óptica, fibra compensadora de dispersión, conectores y splitters para la conexión de terminales ONT, permitiendo la repartición de la fibra óptica a los usuarios y posibilitando la configuración de la atenuación. El uso de los diferentes tipos de fibra óptica como elemento principal de la ODN, está determinado por factores como distancia máxima, velocidad de transmisión, ancho de banda y nivel de atenuación, presentándose fibras tipo Monomodo y Multimodo.

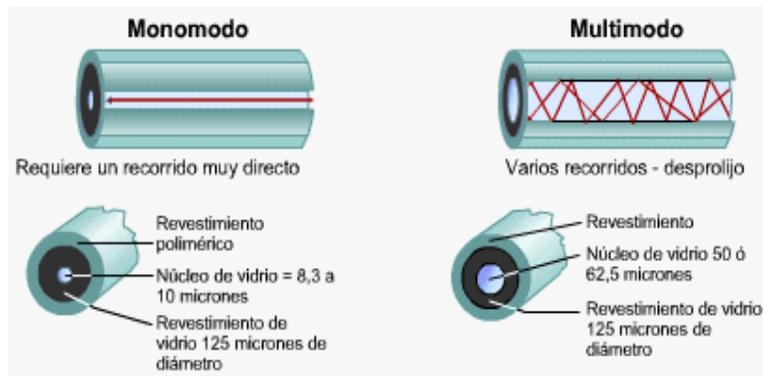


Figura 2.7. Esquema Fibras Monomodo y Multimodo [66].

**La Fibra Multimodo** puede circular haces de luz en más de un camino o modo de propagación, debido a que el tamaño del núcleo está entre 50  $\mu\text{m}$  y 100  $\mu\text{m}$ , siendo el más común el de 62.5  $\mu\text{m}$ . Este tipo de fibra es utilizada normalmente en escenarios de alto ancho de banda y altas velocidades en distancias no superiores a los 2 km, debido a que por sus múltiples trayectorias de luz se puede generar distorsión de la señal en el extremo receptor, resultando en una transmisión de datos poco clara e incompleta. Este tipo de fibras puede ser de dos tipos: i) De índice Escalonado, en donde la refracción del núcleo es ligeramente mayor a la de las demás fibras de su tipo y el revestimiento es uniforme, por lo que el cambio de índice de refracción al pasar de una zona a otra cambia es brusco; y, ii) De índice gradual, en donde el núcleo varía gradualmente desde el centro hasta el revestimiento. Por sus características, esta fibra reduce la dispersión modal, ya que se consigue reducir la diferencia de caminos que recorren los distintos modos que se propagan por la fibra [66].

**La fibra monomodo**, contrario a la multimodo, tiene un solo modo de propagación de luz, debido al diámetro de su núcleo que varía entre 8.3  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ , menor al de las fibras multimodo, transmitiendo el haz de luz en paralelo al eje de la fibra. Cuenta entre sus características con un ancho de banda prácticamente ilimitado y bajos niveles de atenuación, lo que la convierte en un medio de transmisión habitualmente utilizado en escenarios de larga distancia. Entre las fibras monomodo destaca la fibra SMF estándar G.652, que presenta una atenuación de 0.2 dB/km y CD de 16 ps/km\*nm y está optimizada para funcionar en la banda de 1310nm y 1550nm.

Los proveedores de servicios de comunicación por fibra óptica implementan fibras monomodo tipo ADSS (*All Dielectric Self-Supporting*) para despliegues soportados en estructuras compartidas de línea eléctrica o Drop para implementaciones subterráneas o de condiciones de alta resistencia, distancias superiores a 2 km y características de tráfico específicos para la transmisión.

PARÁMETRO	Corning SMF-28e+ LL	FURUKAWA SM332	FIBERHOME ADSS-6 G652D	KP PRYSMIAN
Longitud de Onda [nm]	1550 (Otras longitudes de onda)	1550	1550	1550
Máxima Atenuación Óptica (1550 nm) [dB/km]	≤ 0.18	≤ 0.21	≤ 0.210	≤ 0.23
Dispersión [ps/(nm*km)]	≤ 18.0	≤ 18.0	≤ 18.0	N/A
Temperatura de Operación [°C]	-60 a +85	-60 a +75	-20 a +65	-20 a +70

Tabla 2.7. Parámetros de fibra óptica.

Los divisores o *splitters* son elementos que se integran a los despliegues de redes FTTH, siendo los encargados de repartir la señal óptica de cada fibra conectada. La configuración y despliegue de estos dispositivos depende del diseño de la red, donde se usan divisores 1:n, lo que implica que por cada entrada de fibra conectada al dispositivo, este podrá ser dividido en n usuarios, siendo n = 2, 4, 8, 16, 32 y 64, según sea el caso, e introduciendo niveles de atenuación de 3 dB por cada división.

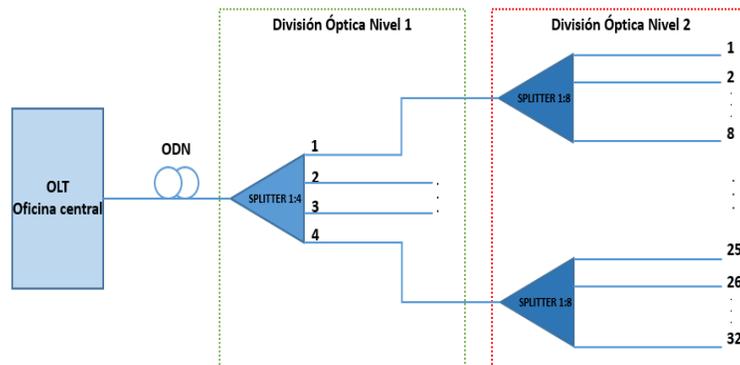


Figura 2.8. Splitters en Cascada.

Los *splitters* pueden estar conectados en cascada, siendo los de primer nivel los que se conectan directamente a un puerto de la OLT en la oficina central a través de la ODN, donde cada una de las fibras que se desprenden de este dispositivo es conectada a un terminal de acceso que alberga una serie de divisores de segundo nivel. En la figura 2.8 se puede observar un escenario total de 32 fibras (1-4 - 8) que llegaría a 32 ONTs de usuario final. Se debe considerar que al hacer implementaciones punto a punto, es decir, que la ODN llega a una sola ONT, no es necesario considerar este tipo de dispositivos [36, 65].

PARÁMETROS	FURUKAWA		SHINING FIBER		MULTICOM	
Atenuación [dB]	Típica	0.15	Típica	0.15	Típica	0.16
	Máxima	0.30	Máxima	0.30	Máxima	0.30
Máxima pérdida de inserción [dB]	17.1 (1X32) - 20.5 (1X64)		17.2 (1x32) - 21.0 (1x64)		16.8/17.0 (1x32) - 20.2/20.4 (1x64)	
Directividad [dB]	>55		>55		>50	
Pérdida de Retorno [dB]	>55		>55		>55	
Longitud de Onda de Operación [nm]	1310, 1490, 1550		1260 a 1650		1260 a 1650	
Temperatura de Operación [°C]	-25 - +70		N/A		-20 - +75	

Tabla 2.8. Parámetros de fibra óptica.

**3. Sobre el bloque de Recepción** de redes FTTH se incluyen componentes ópticos y no ópticos. Estas terminaciones de red son instaladas para suministrar al usuario final acceso a los servicios FTTH o pueden utilizarse como nodo para dar servicio a usuarios finales que requieren un menor ancho de banda.

**El dispositivo más importante** en la etapa de recepción es la Terminal de Red Óptica (ONT), encargada de la conversión de la señal óptica a eléctrica. La ONT puede enviar, agregar y gestionar diferentes tipos de datos provenientes del cliente y enviarlos en sentido ascendente a la OLT. La ONT se comunica con la OLT a través de un puerto óptico donde gestiona el enrutamiento para redes inalámbricas, además de poseer varios puertos Ethernet para la conexión de varios usuarios en el mismo segmento de red. Normalmente las ONT son referenciadas como ONU, teniendo su mismo propósito, pero siendo ubicado para aplicaciones en exteriores.

PARÁMETROS	Zyxel PM7320-B0		Baudcom ONU		HUAWEI HG8546M ONT		FULLWELL FWG-HGU8040WC ONT	
Velocidad [Gbps]	Uplink	9.95328	Uplink	1.244	Uplink	1.244	Uplink	1.244
	DownLink	9.95328	DownLink	2.488	DownLink	2.488	DownLink	2.488
Longitud de Onda [nm]	Uplink	1270	Uplink	1310	Uplink	1310	Uplink	1310
	DownLink	1577	DownLink	1490	DownLink	1490	DownLink	1490
Sensibilidad del Receptor [dBm]	-28		-28		-28		N/A	
Distancia Física [km]	20		20		N/A		20	
Temperatura de Operación [°C]	0° a 40		0 a 50		0 a 50		-25 a +65	

Tabla 2.9. Parámetros de Terminal de Red Óptica.

Teniendo en cuenta las diferentes características para la implementación de redes de arquitectura XGS-PON, la definición de los parámetros generales de desempeño se realiza respecto a los dispositivos comerciales utilizados en el mercado y sus características, así como las recomendaciones de la ITU, lo cual



Considerando los fundamentos teóricos mencionados en este capítulo y en apartes del anterior, la caracterización del escenario de simulación inicial se realiza con relación al cumplimiento de las condiciones OPM objetivo, razón por la cual se seleccionaron las características generales del sistema siguiendo las especificaciones de la ITU-T para redes DWDM basados en el estándar XGS-PON y los parámetros de los equipos comerciales del mercado, implementados para el despliegue de estas redes por parte de los prestadores de servicios de comunicación óptica, lo que permite el posterior análisis de este escenario de simulación y los distintos casos de estudio que determinarán el desempeño del enlace óptico a caracterizar. La Figura 2.9, referencia una arquitectura de red XGS-PON para un enlace descendente de 10 Gbps, la cual cuenta con los dispositivos que conforman la OLT, ODN y ONT, que modelan una red PON estándar y se presentan en la Figura 2.10.

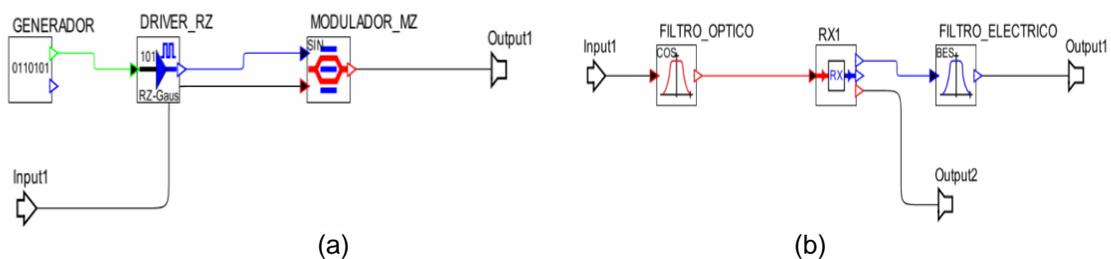


Figura 2.10. Diagrama en bloques (a). OLT, (b). ONT.

Inicialmente se observa el uso de un dispositivo láser y el bloque OLT, cuyas características para efectuar una transmisión óptica son provistas por los fabricantes y cumple con los requerimientos y necesidades de la red. Para este caso, se tiene un láser de onda continua (CW) que puede operar con potencias de salida óptica de 20 mW, corriente de 150 mA y en el rango de longitudes de onda de 1470 nm a 1610 nm, rango adecuado con el uso de los parámetros de banda convencional C (1530 nm – 1565 nm) prevista para el diseño de la red. Posteriormente, se observa el bloque OLT conformado por un generador óptico de señal a una tasa de bit de 10 Gbps, un modulador tipo Mach-Zehnder, así como el controlador para el tipo de modulación propuesta.

La red de distribución óptica ODN, encargada de la conexión entre la OLT y ONT, está integrada por un segmento de fibra, el compensador ideal y el uso de dos etapas de distribución por medio de *splitters* ópticos. En la arquitectura se implementa una fibra óptica monomodo Furukawa SM332 1550, cuyas características definidas en la hoja de comercialización del producto, presentan una atenuación de 0.21 dB/km, dispersión de 18 ps/nm/km y PMD  $\leq 0.5$  ps/ $\sqrt{\text{km}}$ . Adicionalmente, se observa el uso de un compensador ideal mediante dispositivo de rejilla de Bragg, cuya función será la compensación de fenómenos lineales

complejos como la CD y por consiguiente la disminución de los niveles de ISI y la mejora de BER en el sistema [66, 67], teniendo en cuenta parámetros como frecuencia o longitud de onda de referencia para los parámetros de dispersión, que son la dispersión y pendiente de dispersión total.

SPLITTER			
Parameter	Value	Units	Range
Attenuation on each output	3	dB	[ 0, Inf )
Attenuation on each output	0.70795	lin	( 0, 1 ]

Figura 2.11. Parámetros *Splitters* herramienta OptSim.

La red tendrá una carga máxima de 64 usuarios (peor de los casos), distribuidos por medio de *splitters* en dos etapas. La primera distribuirá la señal óptica por medio de un *splitter* de una entrada y cuatro salidas (1:4), que se habilitarán como entradas para una segunda etapa de 16 salidas (1:16), generando la capacidad máxima estipulada por la ITU-T para esta clase de sistemas. Para esta arquitectura se analizará solamente un terminal ONT, de la totalidad de los 64 presentes en el enlace.

En la Figura 2.11, se observa la configuración de los *splitter* 1:4 y 1:16, respecto a la atenuación de 3 dB que estos insertan a la salida de cada etapa del enlace. Además de proveer las características dadas por los fabricantes, esta configuración se efectúa con el fin que los componentes no se comporten como divisores ideales, es decir, que no presenten ninguna pérdida de inserción, lo cual implicaría que divida perfectamente la señal de entrada en el simulador OptSim.

Un segundo segmento de fibra denominado Fibra de Última Milla (Figura 2.12), es utilizado entre los divisores de segunda etapa y las ONT, con el fin de generar una aproximación más fiel a las implementaciones FTTH que se basan en las redes de tipo GPON. Para efectos de simulación, se tendrán en cuenta segmentos de 250 metros a 2 kilómetros, con el fin de profundizar en el análisis de los diferentes resultados que esta pueda proveer al sistema.

Fibra_UM2			
Parameter	Value	Units	Range
Length	= 0.25	Km	[ 0, Inf )
Length Statistical Variation %	0.0		[ 0, 100 ]

Figura 2.12. Parámetros fibra de última milla a 250 metros de ONT.

Finalmente, el bloque de recepción ONT, compuesto por los elementos mostrados en la figura 2.13, contiene un receptor cuyas características incluyen la tasa de bit a la cual se comporta el sistema, el tipo de modulación y la sensibilidad del receptor, como se observa en la gráfica de configuración del dispositivo.

Parameter	Value	Units	Range
Bit Rate	= 10.0	Gbit/s	( 0, Inf )
Optical test pulse shape	"RZ_Rectangular"		
Duty Cycle	0.5		( 0, 1 ]
Normalized FWHM	0.5	fraction of bit...	( 0, 1 ]
Sensitivity under test condition	-28	dBm	( -48.87299, 1e+32 ]
Sensitivity reference error probability	1.0E-9		( 1e-015, 0.1 )
Overall Receiver Responsivity	1.0	A/W or V/W	

Figura 2.13. Parámetros bloque ONT.

La implementación del sistema general de comunicación XGS-PON con las características anteriores en la plataforma de simulación OptSim, posibilita la obtención de resultados que permiten analizar las condiciones iniciales de la red, tanto a la salida del bloque de transmisión, como del bloque de recepción.

La tabla 2.11 muestra las condiciones iniciales respecto a las recomendaciones de distancia máxima sin amplificación del sistema óptico (ODN) y frecuencias sugeridas por la ITU-T a la salida del bloque de transmisión óptico (OLT), haciendo uso del canal 195.5 THz del plan de frecuencias recomendado para la implementación y simulación del sistema, dado que introduce bajos niveles de atenuación al poseer la mayor longitud de onda de las frecuencias presentadas en la recomendación. Los resultados son obtenidos a través de un receptor Back to Back, con el propósito de no afectar las mediciones a causa de las degradaciones de los diferentes elementos del sistema y realizar un posterior análisis comparativo con los diferentes casos de estudio.

Distancia ODN [km]	Canal [THz]	BER	Factor Q [dB]	PTx [dBm]	PRx [dBm]	Jitter [ns]	OSNR (Falso) [dB]	OSNR (Real) [dB]
80	195.5	1e-40	40	0	-28	0	49.565456	42.7906

Tabla 2.11. Resultados iniciales del escenario general de simulación XGS-PON en el enlace back to back.

Los resultados obtenidos inicialmente y que serán de utilidad para realizar un análisis comparativo con los efectos logrados en el extremo receptor (ONT), muestran a la salida de la OLT una BER y un factor de calidad Q superiores a los mínimos requeridos para una transmisión óptica eficiente ( $1 \times 10^{-12}$  y 22 dB respectivamente), según lo recomendado por la ITU-T en la consideración G. Sup39. Además, los resultados obtenidos de OSNR medidos desde el piso de ruido del espectro óptico hasta el pico de máxima potencia entregado por el simulador (OSNR falso), así como un valor medido desde la sensibilidad del receptor (-28 dB) hasta el pico máximo del espectro óptico (OSNR real), son valores altos que confirman la alta calidad del sistema en el extremo transmisor y que pueden ser observados a través del diagrama de ojo y espectro óptico del sistema transmisor OLT.

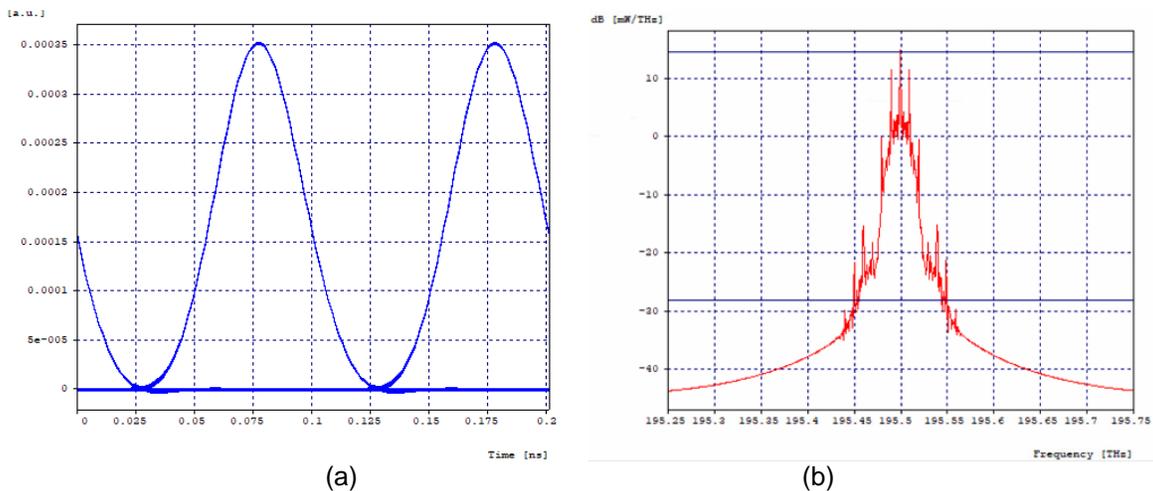


Figura 2.14. Diagrama (a) Ojo Back-to-Back. (b) Espectro óptico Back-to-Back.

La gráfica resultante del espectro óptico muestra la presencia de tres picos máximos, característica propia de las modulaciones tipo RZ (RZ-OOK para este caso) y que ha sido implementada en el sistema debido a la robustez que presenta respecto a las no linealidades, siendo detectable de forma balanceada gracias a que requiere un OSNR de 3dB, lo cual provee capacidad de alcanzar las BER requeridas, mejorando la eficiencia espectral, el comportamiento de la señal frente a la dispersión cromática y PMD, así como posibilitar el incremento del alcance de transmisión con una menor potencia para enlaces WDM a 10 Gbps como a 40 Gbps.

De la misma manera que se obtuvieron los datos iniciales en el extremo transmisor OLT, se extraen los resultados en el receptor ONT detallados en la Tabla 2.12. Estos tienen en cuenta, además de la distancia ODN, las variaciones

de la longitud de la fibra de última milla, con el propósito de observar el comportamiento de la señal a través del sistema receptor y que además acercan al esquema general a una implementación tipo FTTH.

Distancia [km]	Canal [THz]	P <sub>Tx</sub> [dBm]	Ultima Milla [km]	Factor Q [dB]	BER	Jitter [ns]	PRx [dBm]	OSNR (Falso) [dB]	OSNR (Real) [dB]
10	195.5	0	0.50	32.667116	1e-40	0.00084224	-22.092118	50.555362	6.93626
			1	32.549367	1e-40	0.00058683	-22.199053	51.474778	6.68161
			1.5	32.388868	1e-40	0.00087178	-22.293013	50.786423	6.4115
			2	32.009890	1e-40	0.00095916	-22.374309	50.538342	6.49058
20			0.5	25.599245	1e-40	0.00426966	-23.928718	49.848047	5.085541
			1	25.537360	1e-40	0.00454203	-23.992985	50.113982	5.02372
			1.5	25.324372	1e-40	0.00491593	-24.073970	50.129209	4.94607
			2	25.037804	1e-40	0.00486202	-24.167735	50.101257	4.85176
30			0.5	18.283788	1.144e-16	0.00453872	-25.676836	49.372275	3.32787
			1	18.046573	3.385e-15	0.00502568	-25.791767	48.563663	3.1969
			1.5	17.493757	5.41e-14	0.00517301	-25.991569	47.100768	3.1958
			2	17.309155	3.028e-13	0.0149472	-26.007800	48.644940	2.892458
40			0.5	11.319263	0.000142	0.0147593	-27.517344	52.036069	1.71028
			1	11.886507	4.404e-5	0.017617	-27.613202	51.547037	1.10226
			1.5	10.686977	0.000309	0.018719	-27.740197	48.786293	1.09487
			2	11.228941	0.000170	0.0176805	-27.807311	49.402579	1.03817
50	0.5	6.020600	0.0227	0.0205689	-29.357610	52.491666	-0.289226		
	1	6.020600	0.0227	0.0187263	-29.443520	52.704639	-0.037099		
	1.5	6.020600	0.0227	0.0190115	-29.539866	53.373017	-0.620214		
	2	6.020600	0.0227	0.0204563	-29.645009	53.178212	-1.07927		

Tabla 2.12. Resultados del escenario general de simulación en el extremo receptor XGS-PON.

Se puede observar en la Tabla 2.12 a la salida de la ONT, resultados de parámetros como la OSNR falsa y la potencia de recepción, que están dentro de los límites de la sensibilidad del receptor para métricas de distancia menores o iguales a 45 km (43 km de distancia ODN + 2 km distancia última milla). Sin embargo, el resultado del factor de calidad y la BER con respecto a la salida de la OLT son deficientes, ya que posterior a la marca de 30 km de la distancia ODN, estos valores se encuentran por fuera de los parámetros objetivo recomendado. Adicionalmente, posterior a 51 km (49 km de distancia ODN + 2 km distancia última milla), los resultados obtenidos a nivel de simulación no son concluyentes para el análisis del sistema.

Los resultados presentados a continuación, muestran la necesidad de realizar procesos adicionales para lograr una correcta transmisión de datos en el sistema óptico, como la implementación de módulos de amplificación para la generación de mejoras sobre la red, ya que el sistema se degrada hasta el punto de no poder detectar la señal óptica transmitida, como se puede determinar por medio del diagrama de ojo y el gráfico espectral en recepción mostrado en la Figura 2.15.

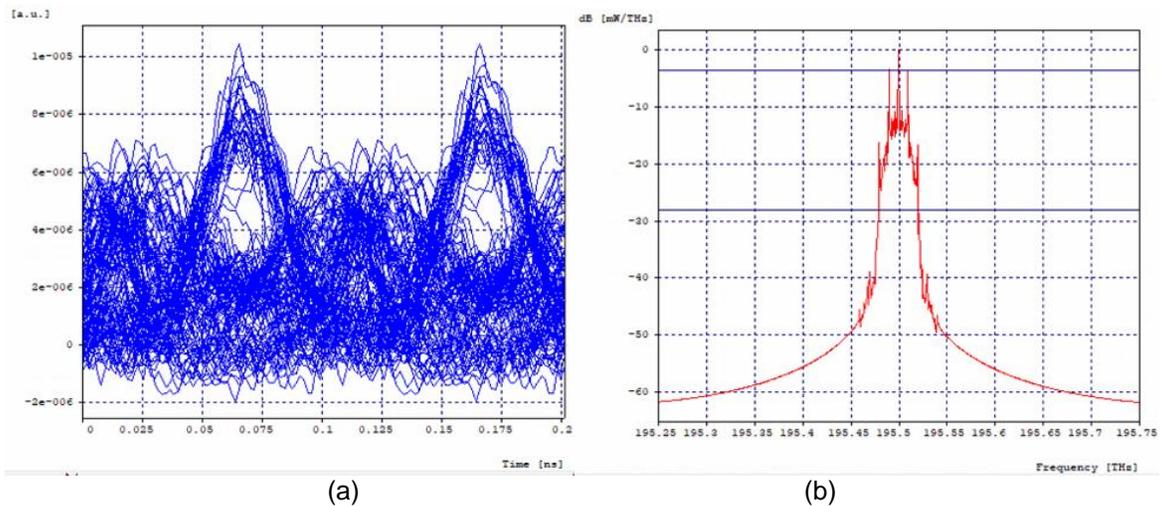


Figura 2.15. Diagrama (a) ojo en la recepción, (b) Espectro óptico en la recepción.

**2.3.2. Casos de estudio.** Para realizar el análisis del impacto de los amplificadores ópticos sobre el sistema de arquitectura XGS-PON, se hace uso de amplificación híbrida HOA; se definen los diferentes escenarios de simulación con sus respectivos casos de estudio, como se muestra en la figura 2.16, analizando la forma cómo afectan el comportamiento y desempeño sobre el sistema óptico.

Los correspondientes análisis del impacto de la amplificación HOA sobre la arquitectura de red óptica XGS-PON, obtenidos mediante la herramienta de simulación OptSim, consideran además de las métricas mencionadas en el capítulo, los tipos de amplificación híbrida: i) En cascada, donde se analizará el tipo de amplificación EDFA-Raman, ii) En paralelo, donde se analizará la amplificación híbrida y la disposición de los amplificadores ópticos que conforman la amplificación HOA sobre la red, tomando como base los resultados obtenidos en el escenario anterior en una longitud de 80 km; y. iii) Mixto, el cual será analizado haciendo uso de una configuración compuesta por las dos anteriores disposiciones, con el fin de estudiar los efectos que se pueden presentar en los tres escenarios de amplificación, así como los fenómenos de Kerr y las penalidades de potencia que se pueden presentar con respecto a las diferentes posiciones de amplificación o cambios en la fuente de bombeo, además de variar la longitud del enlace con el propósito de alcanzar la máxima distancia del mismo.

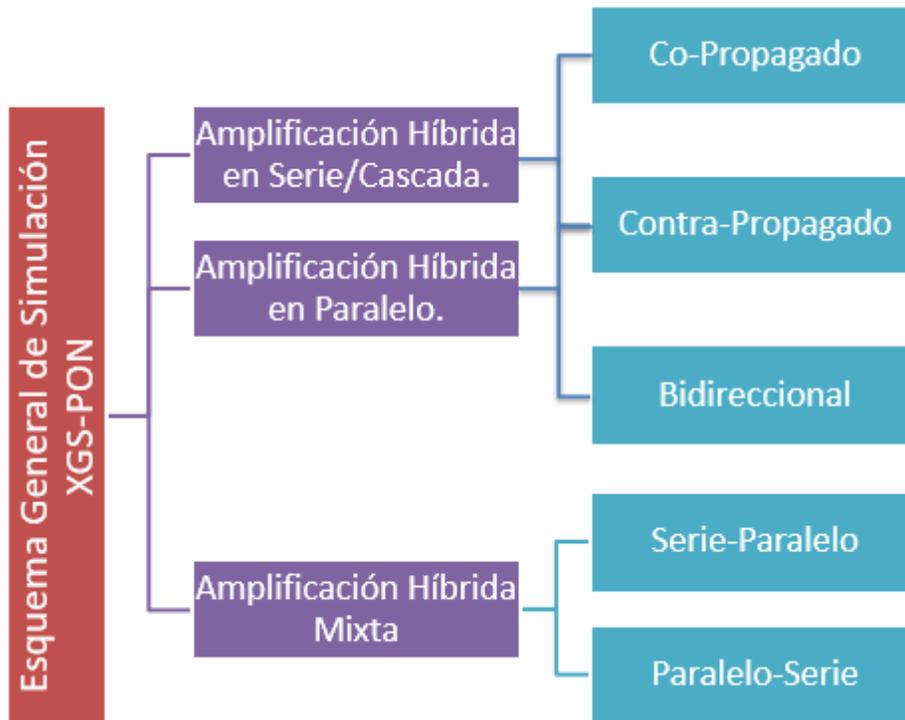


Figura 2.16. Escenarios de simulación y casos de estudio.

**Nota de los autores:**

*En este capítulo se caracterizaron los parámetros de desempeño óptico (OPM), de acuerdo con las recomendaciones realizadas por la ITU-T para el análisis de las redes de tipo XGS-PON. Además, se presentó una visión general de las posibles herramientas de simulación, seleccionando la plataforma OptSim debido a sus características y propiedades que permitirán un adecuado proceso de simulación, del mismo modo, se seleccionó la metodología más adecuada y se propuso un algoritmo de simulación. Por último, se seleccionaron las métricas más adecuadas para el funcionamiento de la red óptica, considerando los parámetros recomendados para dicha red, generando finalmente los casos de estudio que serán abordados y desarrollados en capítulos posteriores.*

### 3. ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se desarrollará el proceso de simulación del enlace de bajada de una red XGS-PON, implementando los diferentes casos de amplificación híbrida HOA, teniendo en cuenta las métricas, técnicas y los parámetros de ajuste variable para la simulación, de acuerdo con las características generales seleccionadas para la red. Los resultados obtenidos serán analizados con el fin de establecer si dichos parámetros son la mejor opción para la implementación de la red óptica. Además, se analizarán las penalidades de potencia que se generan debido a los fenómenos no lineales que fueron presentados en el primer capítulo, tomando como punto de partida para este estudio, el mejor modo de amplificación, tipo y potencia de bombeo para cada forma de amplificación, teniendo en cuenta los resultados mínimos recomendados para las OPM objetivo.

En la tabla 3.1, se determinan los parámetros fijos y variables del sistema, correspondientes a las características mencionadas para arquitecturas de red simétricas.

	PARÁMETROS VARIABLES	PARÁMETROS FIJOS
Transmisión	Potencia EDFA. Potencia Raman.	Formato de Modulación. Número de Canales. Capacidad del canal.
Canal Óptico	Amplificación HOA. Modos Amplificación. Tipos de Propagación	Tipo de Fibra. Longitud de la Fibra.
Recepción	--	Sensibilidad. Fibra de Última Milla.

Tabla 3.1. Parámetros variables y fijos del sistema.

Como se mostrará en apartes posteriores, algunas de las variables importantes a implementar en este capítulo fueron obtenidas de las propuestas futuras del trabajo de investigación denominado “Análisis del desempeño a nivel de simulación de amplificadores ópticos para un entorno de red DWDM XGS-PON” [36], realizado en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, del cual se extrajeron elementos importantes para el proceso de desarrollo como: i) Longitudes de onda, ii) Intervalos de potencia para amplificación EDFA y Raman ; iii) Mejor modo de propagación, y, iv) Mejor modo de Amplificación. Dichos parámetros son tomados como punto de partida para realizar la simulación de los diferentes casos de estudio, que permitirán comparar y analizar los resultados.

### 3.1. AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA EN SERIE/CASCADA

La amplificación en cascada tiene como objetivo observar los diferentes escenarios y casos de estudio de los sistemas híbridos mostrados en la figura 2.9 y el análisis de la relación que pueda existir entre este tipo de amplificación óptica con las penalidades de potencia a través del enlace y el comportamiento que se recoge a través de los parámetros de monitoreo óptico OPM sobre un enlace XGS-PON.

La figura 3.1 muestra el esquema de red XGS-PON con amplificación HOA en los diferentes modos dispuestos para su análisis en este capítulo. En transmisión cuenta con un dispositivo láser CW de longitud de onda 1533.46 nm (195.5 THz), configurada sobre todos los elementos de la red, evitando que se produzcan cambios sobre sus diferentes disposiciones. El bloque OLT está conformado por un generador óptico de señal a una tasa de bit de 10 Gbps, un modulador tipo Mach-Zender y un controlador para la modulación propuesta RZ-OOK.

Sobre la red de distribución óptica ODN se encuentra un amplificador HOA, configurado para operar en los modos de amplificación booster, pre-amplificación y en-línea. Además, cuenta con la fibra óptica tipo monomodo Furukawa SM332 1550 de longitud 80 km, compensador ideal mediante dispositivo de rejilla de Bragg y dos etapas de distribución por medio de splitter 1:4 y 1:16, generando la capacidad máxima estipulada por la ITU-T de 64 usuarios (peor de los casos) para los sistemas XGS-PON.

Un segundo segmento de fibra óptica de última milla y establecida con una longitud de 2 km para efectos de simulación (peor de los casos), es utilizado para conectar los divisores de segunda etapa y las ONT, con el fin de generar una aproximación más fiel a las implementaciones FTTH basadas en redes GPON. Para esta arquitectura se analizará solamente un terminal ONT de los 64 presentes en el enlace.

La amplificación híbrida está conformada por un amplificador EDFA de modelo físico para sistemas DWDM y un Raman LRA, seleccionados a través del trabajo de grado de Ana María Marulanda y Paola Cerón [36], dados los resultados positivos sobre la red respecto a OPM y de donde se extrajeron métricas importantes para el desarrollo del actual trabajo de investigación. Para el caso del amplificador EDFA, se determinó que la sección más adecuada de fibra dopada de erbio interna del amplificador EDFA varía entre 19m y 21m, ya que esta longitud no presenta degradaciones en el diagrama de ojo y no hay influencia de efectos

no lineales en el espectro, aportando al sistema amplificado valores favorables de OPM para longitudes de onda de bombeo de 980 nm y 1480 nm (Anexo B). Igualmente, se determinó que el mejor rango de potencia donde opera el amplificador EDFA está entre 0 y 10 dBm para una fuente de bombeo Bidireccional en una red XGS-PON amplificada en una disposición En-Línea.

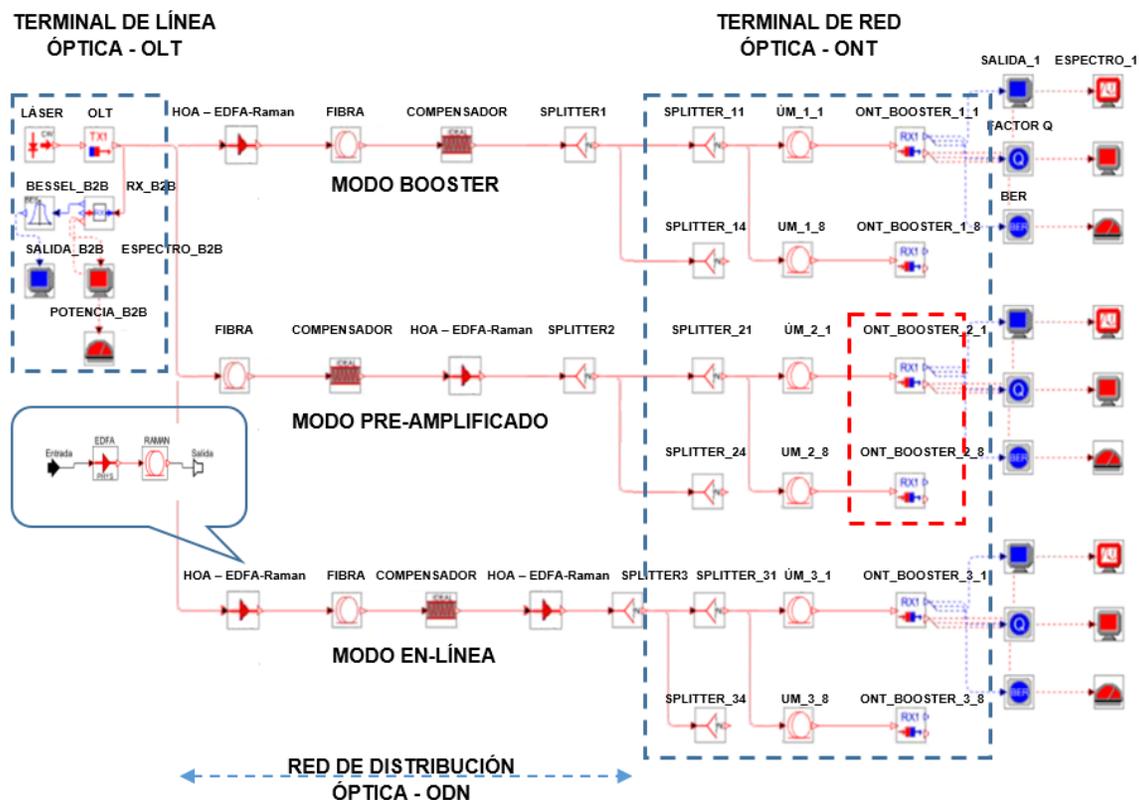


Figura 3.1. Escenario de Simulación Amplificación EDFA-Raman a 10 Gbps.

Al igual que con el amplificador EDFA, se toman como base los resultados del amplificador Raman LRA que se obtuvieron en el trabajo de Marulanda y Pungo [36], anotando que para este tipo de amplificación no existen bloques de simulación en la herramienta OptSim; sin embargo, es posible la configuración de un modelo de amplificador haciendo uso de una sección de fibra DCF, utilizada como medio de ganancia, de manera que se habilitan las propiedades y se establece el valor de los diferentes efectos o parámetros Raman sobre esta sección de fibra (Anexo C), encontrando que para todos los modos de amplificación, el mejor funcionamiento respecto a OPM se encuentra en secciones aproximadas a 3 km y para longitudes de onda de bombeo de 1420 nm, en el rango de potencia de 20 dBm a 36 dBm para una fuente de bombeo Co-Propagada en modo Booster. Las tablas 3.2 y 3.3, recogen parámetros de

monitoreo óptico dependientes de las longitudes de fibra y modo de bombeo para los amplificadores EDFA y Raman en velocidades de transmisión de 10 Gbps (Anexo B y Anexo C). Además, la figura 3.1, muestra el esquema de red XGS-PON con amplificación HOA en los diferentes modos dispuestos para su análisis en este capítulo.

Fuente	Frecuencia 1420 nm				Frecuencia 1455 nm			
	Longitud [km]	BER	Factor Q [dB]	Prx [dBm]	Longitud [mts]	BER	Factor Q [dB]	Prx [dBm]
<b>Modo Booster</b>								
Co.	9	1e-40	40.00	-14.94	17	1e-40	40.00	-13.15
Contra.	5	1e-40	40.00	-15.02	9	1e-40	40.00	-12.50
Bidir.	13	1e-40	40.00	-11.39	21	1e-40	40.00	-9.48
<b>Modo Pre-Amplificación</b>								
Co.	21	1e-40	30.43	-0.43	21	1e-40	29.37	1.59
Contra.	5	1e-40	30.01	-7.53	9	1e-40	29.34	-5.44
Bidir.	9	1e-40	30.37	2.51	11	1e-40	29.40	-0.24
<b>Modo En-Línea</b>								
Co.	11	1e-40	40.00	1.27	17	1e-40	40.00	3.00
Contra.	5	1e-40	40.00	1.79	7	1e-40	40.00	0.28
Bidir.	13	1e-40	40.00	4.78	19	1e-40	40.00	6.72

Tabla 3.2. OPM dependientes de la longitud de la fibra dopada EDFA de 1 canal a 10 Gbps.

Fuente	Frecuencia 1420 nm				Frecuencia 1455 nm			
	Longitud [km]	BER	Factor Q [dB]	Prx [dBm]	Longitud [mts]	BER	Factor Q [dB]	Prx [dBm]
<b>Modo Booster</b>								
Co.	5	2.6e-23	20.06	-24.74	3	1e-40	35.84	-17.09
Contra.	5	6.2e-24	20.12	-24.74	3	1e-40	35.97	-17.11
Bidir.	3	2.0e-26	20.60	-25.66	3	1e-40	37.02	-11.99
<b>Modo Pre-Amplificación</b>								
Co.	5	4.2e-20	19.22	-24.70	3	1e-40	28.10	-16.91
Contra.	5	8.6e-19	20.60	-24.63	3	1e-40	28.10	-16.91
Bidir.	3	2.0e-26	30.37	-25.66	3	1e-40	29.48	-5.35
<b>Modo En-Línea</b>								
Co.	3	2.0e-27	20.77	-21.02	1	1e-40	31.84	-18.52
Contra.	3	3.0e-27	20.75	-21.01	1	1e-40	31.83	-18.51
Bidir.	3	3.1e-38	22.21	-21.03	1	1e-40	40.00	-5.86

Tabla 3.3. OPM dependientes de la longitud de la fibra Raman LRA de 1 canal a 10 Gbps.

En este escenario se analizará la amplificación EDFA-Raman en cascada para los diferentes casos de amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, cuyos resultados OPM son consignados en el Anexo D, tomando como punto de partida las métricas resultantes del trabajo de grado ya relacionado [36], con el fin de determinar si estas son las más adecuadas para el funcionamiento de la red, así como analizar las penalidades de potencia que se puedan presentar.

**3.1.1. Caso 1. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado.** El esquema de red mostrado en la figura 3.1, analiza la amplificación HOA en modo Booster, Pre-Amplificado y En-Línea con bombeo Co-Propagado, en el que se configuraron los parámetros determinados en la tabla 2.10, variando las longitudes de onda y potencia de bombeo ( $P_B$ ) de los amplificadores EDFA y Raman en el rango de valores determinados como óptimos (Anexos B y C). La tabla 3.4 muestra las variaciones para el análisis de comportamiento de la amplificación HOA respecto a OPM.

Variación de amplificación Modo Booster, Pre-Amplificado, En-Línea.			
Potencia de Bombeo EDFA [dBm]	Potencia de Bombeo Raman [dBm]	Longitud de Onda bombeo EDFA [nm]	Longitud de Onda bombeo Raman [nm]
0 – 10	20 – 36	980	1420
0 – 10	20 – 36	980	1455
0 – 10	20 – 36	1480	1420
0 – 10	20 – 36	1480	1455

Tabla 3.4. Variación de potencias EDFA-Raman y combinación de longitudes de onda de fuentes de bombeo.

Los resultados encontrados mediante simulación arrojaron que la combinación de longitudes de onda de bombeo con mejor respuesta sobre el sistema fueron 1480 nm en EDFA y 1420 nm en Raman para los tres modos de amplificación mencionados, notando que respecto a los valores base tomados para la simulación, la longitud de onda del amplificador EDFA no corresponde a la longitud de onda inicial para este modo de propagación (longitud de onda base en los tres casos: 980 nm). La amplificación Raman para los modos Booster y En-Línea, nota la correspondencia entre de la longitud de onda y el modo de propagación.

Las tablas 3.5, 3.6 y 3.7, presentan los OPM obtenidos con respecto a la variación de las potencias en el amplificador híbrido en los tres modos de amplificación, los cuales fueron superiores a los recomendados por la ITU-T respecto a la tasa de error de bit y factor de calidad, encontrando valores constantes de BER de  $1 \times 10^{-40}$ , así como factores de calidad superiores a 22 dB, como los que se estipulan en la recomendación, además de la obtención de valores de sensibilidad óptimos dentro del rango de detección en recepción.

La potencia de bombeo EDFA en todos los modos de amplificación igual a 0 dBm y composiciones de bombeo Raman para el modo Booster en el rango de 20-30 dBm y los modos Pre-Amplificado y En-Línea entre 20-36 dBm, (Rango determinado como potencia de bombeo óptimo Raman), no se encuentra aporte de la amplificación HOA ya que los resultados obtenidos por medio de simulación

no son concluyentes dado a que dichas respuestas no están dentro del rango de sensibilidad de recepción del sistema de -28 dBm.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-35,48	2	20	25,83363	1,00E-40	-22,735	4	20	32,75716	1,00E-40	-18,27
	22	6,0206	2,28E-02	-35,093		22	25,69889	1,00E-40	-22,349		22	33,8083	1,00E-40	-17,876
	24	6,0206	2,28E-02	-34,482		24	27,15997	1,00E-40	-21,738		24	33,68061	1,00E-40	-17,267
	26	6,0206	2,28E-02	-33,515		26	27,86046	1,00E-40	-20,764		26	34,5341	1,00E-40	-16,301
	28	7,89919	6,86E-03	-31,973		28	30,21946	1,00E-40	-19,228		28	36,29242	1,00E-40	-14,765
	30	11,66445	8,27E-05	-29,535		30	33,2146	1,00E-40	-16,797		30	36,71784	1,00E-40	-12,334
	32	19,64919	9,53E-22	-25,661		32	35,0069	1,00E-40	-12,941		32	35,4141	1,00E-40	-8,49
	34	29,13459	1,00E-40	-19,536		34	34,44651	1,00E-40	-6,836		34	29,15142	1,00E-40	-2,448
6	36	32,42522	1,00E-40	-9,855	36	24,16431	1,00E-40	2,364	36	10,55368	2,62E-04	5,446		
	20	35,95344	1,00E-40	-15,129	20	37,57958	1,00E-40	-12,578	20	38,07623	1,00E-40	-10,255		
	22	36,57714	1,00E-40	-14,747	22	36,75744	1,00E-40	-12,199	22	37,6496	1,00E-40	-9,873		
	24	36,23265	1,00E-40	-14,135	24	36,96122	1,00E-40	-11,585	24	37,79915	1,00E-40	-9,264		
	26	36,55189	1,00E-40	-13,178	26	37,00727	1,00E-40	-10,622	26	37,33022	1,00E-40	-8,303		
	28	37,18231	1,00E-40	-11,637	28	36,3963	1,00E-40	-9,093	28	35,97403	1,00E-40	-6,783		
	30	37,67989	1,00E-40	-9,149	30	34,33133	1,00E-40	-6,678	30	32,60409	1,00E-40	-4,389		
	32	33,35966	1,00E-40	-5,32	32	29,36157	1,00E-40	-2,888	32	28,46277	1,00E-40	-0,692		
34	27,45702	1,00E-40	0,488	34	22,43653	4,35E-38	2,55	34	15,6574	9,39E-10	4,021			
36	6,14619	2,46E-02	6,823	36	24,16431	1,00E-40	2,364	36	6,0206	1,68E-02	9,396			

Tabla 3.5. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Booster Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-42	2	20	23,4128	1,00E-40	-12,465	4	20	24,50885	1,00E-40	-5,821
	22	6,0206	2,28E-02	-41,233		22	23,40223	1,00E-40	-12,079		22	24,45135	1,00E-40	-5,436
	24	6,0206	2,28E-02	-41,212		24	23,41973	1,00E-40	-11,466		24	24,45336	1,00E-40	-4,824
	26	6,0206	2,28E-02	-40,241		26	23,49322	1,00E-40	-10,495		26	24,49703	1,00E-40	-3,854
	28	6,0206	2,28E-02	-38,541		28	23,07194	1,00E-40	-8,96		28	24,4429	1,00E-40	-2,318
	30	6,0206	2,28E-02	-35,933		30	23,24262	1,00E-40	-6,521		30	24,44987	1,00E-40	0,115
	32	6,0206	2,28E-02	-32,102		32	23,38711	1,00E-40	-2,66		32	24,33042	1,00E-40	3,977
	34	8,51724	4,92E-03	-25,944		34	23,44488	1,00E-40	3,464		34	24,42936	1,00E-40	10,072
36	11,01481	2,21E-04	-16,062	36	23,61887	1,00E-40	13,121	36	24,22058	1,00E-40	19,467			
6	20	24,14702	1,00E-40	-2,172	8	20	23,98279	1,00E-40	0,683	10	20	25,7002	1,00E-40	3,121
	22	24,15741	1,00E-40	-1,786		22	23,98395	1,00E-40	1,068		22	25,67813	1,00E-40	3,504
	24	24,17226	1,00E-40	-1,175		24	23,97153	1,00E-40	1,679		24	25,66916	1,00E-40	4,114
	26	24,15644	1,00E-40	-0,207		26	23,9769	1,00E-40	2,646		26	25,68997	1,00E-40	5,079
	28	24,20639	1,00E-40	1,327		28	24,00037	1,00E-40	4,176		28	25,6624	1,00E-40	6,606
	30	24,16792	1,00E-40	3,757		30	24,02189	1,00E-40	6,603		30	25,65172	1,00E-40	9,022
	32	24,20261	1,00E-40	7,604		32	24,16502	1,00E-40	10,43		32	25,67698	1,00E-40	12,823
	34	24,28766	1,00E-40	13,654		34	24,61148	1,00E-40	16,398		34	25,78115	1,00E-40	18,662
36	24,11287	1,00E-40	22,527	36	20,38891	8,71E-25	24,274	36	10,79349	2,96E-04	24,055			

Tabla 3.6. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Pre-Amplificado Co-Propagado, EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo En-Línea – Bombeo Co-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,2750E-02	-52,111	2	0	18,60835	7,2177E-18	-12,036	4	0	19,43947	6,2231E-21	-5,152
	2	6,02060	2,2750E-02	-51,962		2	18,42679	6,1466E-17	-12,067		2	19,45459	3,0938E-21	-5,144
	4	6,02060	2,2750E-02	-52,301		4	18,75751	5,2037E-18	-12,040		4	19,77706	2,6013E-22	-5,129
	6	6,02060	2,2750E-02	-52,067		6	18,97138	1,3374E-18	-12,027		6	19,53376	1,1108E-21	-5,131
	8	6,02060	2,2750E-02	-51,954		8	20,25464	1,3708E-22	-12,025		8	19,61985	5,5343E-20	-5,109
	10	6,02060	2,2750E-02	-52,073		10	19,12714	6,0524E-18	-11,957		10	19,71721	1,7859E-20	-5,078
	12	6,02060	2,2750E-02	-51,956		12	18,87512	9,3839E-18	-11,922		12	19,83333	3,1566E-21	-5,036
	14	6,02060	2,2750E-02	-51,575		14	19,05259	1,3236E-19	-11,842		14	19,72130	1,0647E-20	-4,959
	16	6,02060	2,2750E-02	-51,263		16	19,10178	4,6393E-19	-11,700		16	19,92546	2,7555E-21	-4,848
	18	6,02060	2,2750E-02	-50,922		18	19,87694	1,3483E-21	-11,492		18	19,44352	1,2761E-19	-4,688
20	6,02060	2,2750E-02	-53,592	20	18,79754	1,4078E-18	-11,179	20	19,64467	4,1647E-21	-4,415			
6	0	19,23230	1,5442E-18	-1,504	8	0	18,64182	1,4828E-16	1,297	10	0	17,29773	1,3453E-13	3,720
	2	19,42141	1,6883E-19	-1,506		2	18,61414	1,8468E-16	1,300		2	17,23467	1,7449E-13	3,724
	4	19,06363	1,5635E-18	-1,493		4	18,35302	1,2639E-15	1,307		4	17,43102	9,8449E-14	3,731
	6	19,26714	9,5402E-19	-1,485		6	18,46645	9,5145E-16	1,312		6	17,25250	2,1410E-13	3,742
	8	19,68783	1,0609E-20	-1,481		8	18,50484	8,1366E-16	1,326		8	17,34266	1,8049E-13	3,759
	10	19,33443	5,6741E-19	-1,445		10	18,29444	3,2262E-15	1,362		10	17,13567	2,9980E-13	3,778
	12	19,20574	1,8208E-18	-1,413		12	18,58705	3,9270E-16	1,390		12	17,17457	2,4936E-13	3,824
	14	19,46005	6,6425E-20	-1,336		14	18,29395	1,9590E-15	1,465		14	17,32632	3,5935E-13	3,882
	16	19,25307	1,4996E-18	-1,233		16	18,25599	2,6362E-15	1,556		16	17,24401	4,3792E-13	3,986
	18	19,12597	2,1523E-18	-1,074		18	18,11524	1,2820E-14	1,721		18	16,90104	1,7192E-12	4,140
20	19,22715	5,3173E-19	-0,813	20	18,22183	2,1464E-15	1,971	20	16,98149	8,5368E-12	4,391			

Tabla 3.7. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA En-Línea Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal de 10 Gbps.

Para el caso Booster, donde se encuentran variaciones de  $P_{B_{EDFA}}$  2-10 dBm, se puede observar la influencia de la amplificación en cada variación de  $P_{B_{Raman}}$  respecto a los resultados OPM, obteniendo altos picos de funcionamiento como se consigna en las Tablas 3.5 y 3.6.

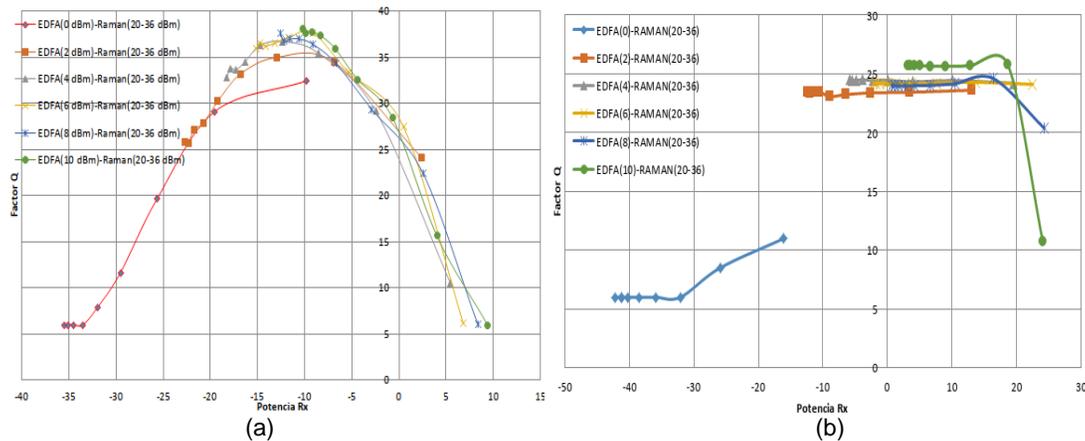


Figura 3.2. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Co-Propagada EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.

La relación Factor Q vs  $P_{R_x}$  de la figura 3.2(a) obtuvo los mejores resultados de amplificación híbrida en cascada sobre la red óptica en las curvas EDFA igual 0 dBm (rojo) y 2 dBm (naranja). Se observa que al alcanzar el pico máximo de rendimiento para potencias Raman iguales o superiores a 32 dBm en Booster, se halla una tasa de cambio en las curvas donde la pendiente positiva pasa de manera abrupta a negativa, a razón del exceso de amplificación sobre la red, degradando el sistema y reflejando este comportamiento en la caída de los resultados del factor de calidad y en el aumento de la tasa de errores transmitidos. Las curvas del modo Pre-Amplificado en la figura 3.2 (b), muestran que para EDFA igual a 0 dBm, la amplificación híbrida no está alcanzando los mínimos requeridos OPM para el funcionamiento de la red, sin embargo, alcanza parámetros de monitoreo ópticos estables en todo el rango de potencia de bombeo EDFA de 2-10 dBm y en Raman en el rango de 20-34 dBm.

Se observa por medio de la figura 3.2 y las tablas 3.5 y 3.6, que resultados de Factor Q en  $P_{B_{EDFA}}$  entre 8-10 dBm y  $P_{B_{Raman}}$  entre 20-32 dBm, pueden ser obtenidos con combinaciones de potencias menores, alcanzando el mismo rendimiento con menor consumo, evitando caídas abruptas en el factor de calidad del sistema y presencia de efectos no lineales, además de hacer una gran diferencia en el funcionamiento de la red a largo plazo.

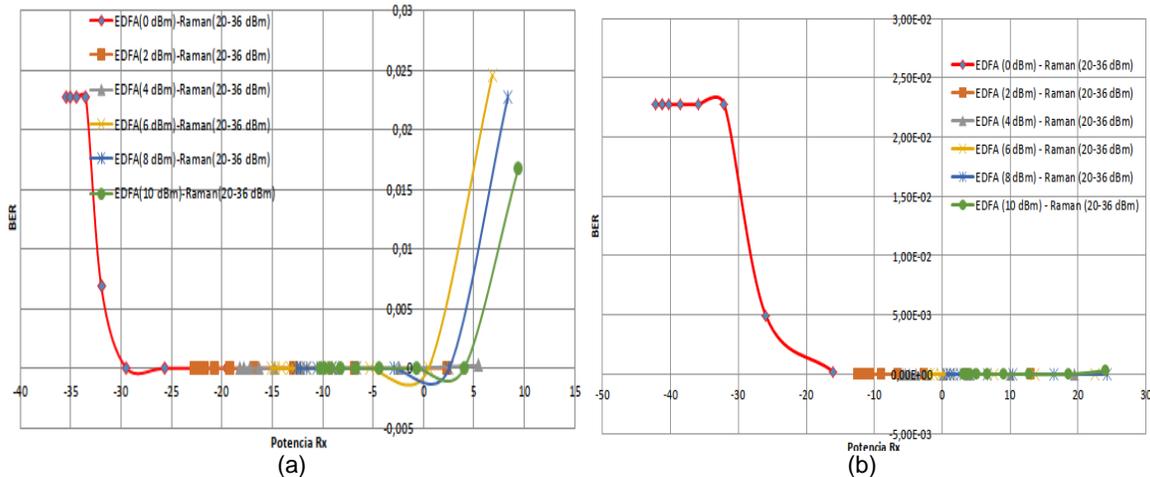


Figura 3.3. BER vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.

La relación BER vs  $P_{Rx}$  presentada en la figura 3.3, para los modos Booster y Pre-Amplificado, son inversamente proporcionales a las presentadas en la figura 3.2, encontrando en ambos cambios bruscos en las pendientes de las gráficas correspondientes a  $P_{EDFA}$  de 0 dBm y 10 dBm. Este comportamiento es reiterativo para potencias de 6-10 dBm en modo Booster cuando se supera el rango óptimo de amplificación Raman de 32 dBm, con una pendiente positiva que establece una mayor tasa de transferencia de errores en la transmisión de datos sobre la red en las diferentes curvas, siendo contrario al comportamiento estable y lineal que presenta en los datos obtenidos, por lo cual se determina que el sistema se está degradando por efecto de sobre-amplificación y por la presencia de efectos no lineales.

El análisis de diagrama de ojo para los casos Booster y Pre-Amplificado mostrados en la figura 3.4, compara uno de los mejores casos de la amplificación HOA respecto al diagrama a la salida de la OLT.

La figura 3.4 (a), muestra el diagrama de ojo del modo Booster Co-Propagado, el cual presenta una atenuación en su amplitud de aproximadamente el 45% de la señal original, lo que corresponde a una diferencia de 3 rectángulos de la división que se muestra en la gráfica y un corrimiento entre las señales de transmisión y recepción; sin embargo, la terminal de red óptica ONT recibe una señal legible dados los resultados de Factor Q y BER obtenidos, haciendo que pueda ser detectada sin dificultades, debido a que la información sobre la red no es transmitida en fase sino en amplitud y adicionalmente cumple con los parámetros de monitoreo óptico mínimos requeridos sobre un sistema óptico.

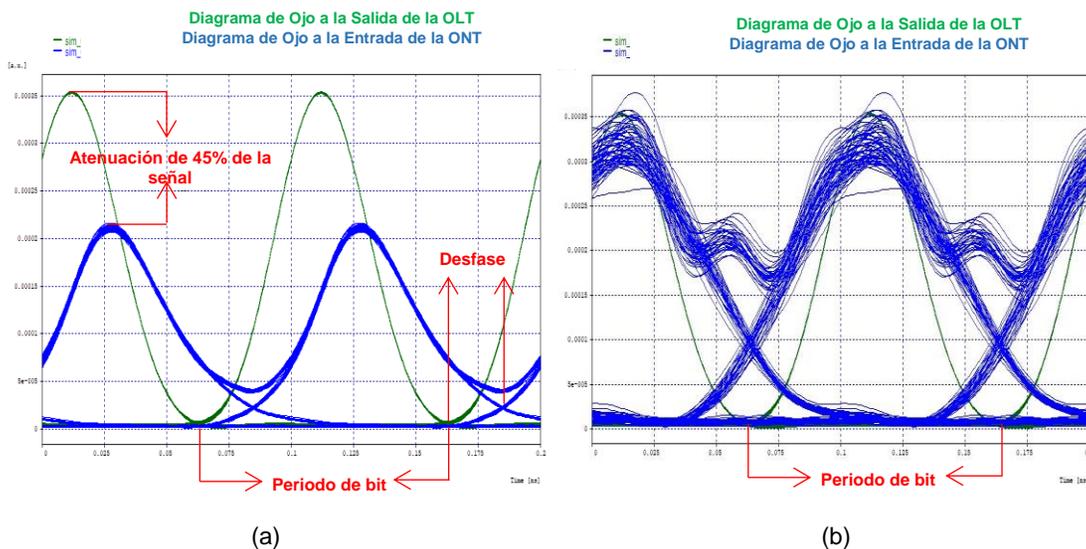


Figura 3.4. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Contrario al modo Booster, el Pre-Amplificado no presenta atenuación o desfase entre las señales resultantes en el diagrama de ojo; se observa deterioro en la forma del patrón del diagrama de ojo, por lo cual se podría asumir que esta amplificación se encuentra en regiones no lineales, como lo puede indicar la apertura del cruce de la señal en el diagrama. No obstante, al observar los resultados obtenidos y mostrados por medio de las gráficas 3.2 y 3.3, este modo de amplificación tiene un comportamiento cuasi-lineal dados los resultados OPM mínimos requeridos para el funcionamiento del sistema.

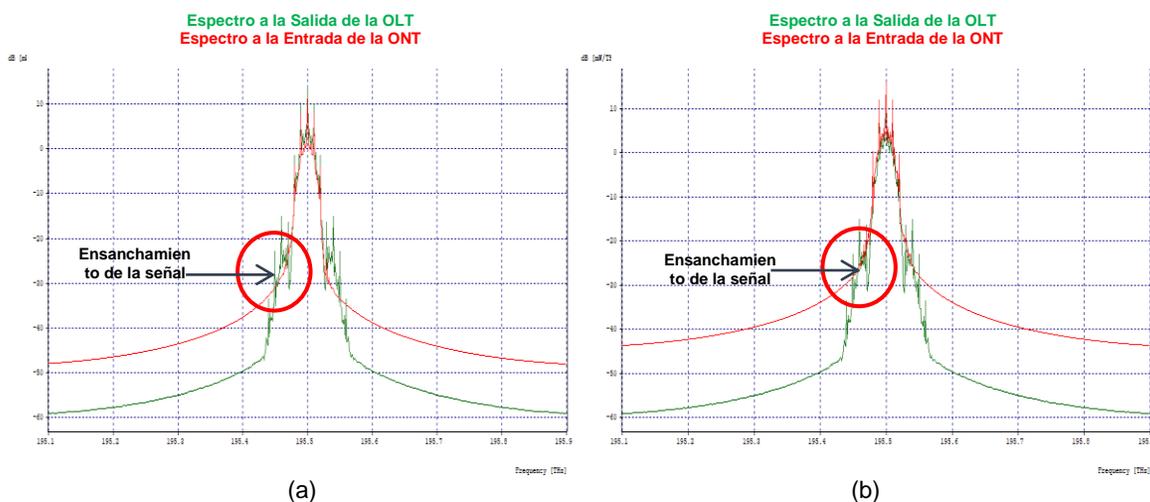


Figura 3.5. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas espectrales para los modos Booster y Pre-Amplificado de la figura 3.5, muestran los espectros en transmisión (verde) y en recepción (rojo) para el mejor caso seleccionado, observando que el espectro recibido sufre un ensanchamiento característico, que denota la presencia del fenómeno no lineal SPM (Self-Phase Modulation).

El comportamiento de la amplificación En-Línea presentó inconsistencias generadas a nivel de software y errores a partir del sistema operativo, que no permitieron la simulación para ninguna de las combinaciones de longitud de onda cuando se varían los parámetros de potencia de bombeo Raman en el rango considerado como óptimo. De esta forma y como se muestra en la tabla 3.7, se consideró el cambio en el parámetro de potencia Raman al rango de 0-20 dBm, para poder determinar el comportamiento del modo de amplificación, obteniendo nuevamente los mejores resultados para las longitudes de onda EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se obtienen resultados para el cambio de parámetros en el modo de amplificación En-Línea para las relaciones de BER vs  $P_{Rx}$  y Factor Q vs  $P_{Rx}$ , observados en la figura 3.6.

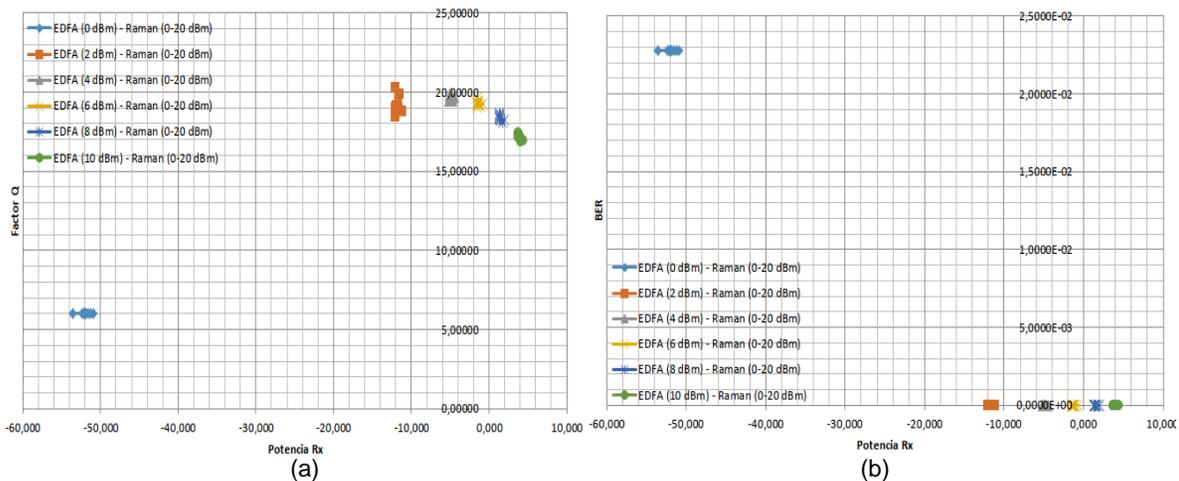


Figura 3.6. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA modo En-Línea. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

Se puede notar que el factor de calidad para variaciones  $P_{BRaman}$  de 0-20 dBm en conjunto con el bombeo EDFA de 0 dBm no tiene una respuesta eficiente, observando de igual manera que la cantidad de bits erróneos superan el mínimo sugerido por las normas de la ITU-T. Aunque se observa que la sensibilidad en recepción no se altera en cada variación de  $P_{BEDFA}$  de 2-10 dBm y mantiene una

variación en el factor de calidad entre 16 dB y 20 dB, aunque no alcanza el mínimo requerido para una buena transmisión de datos por la red. No obstante, pese a que a nivel de transmisión de bits errados BER tiene resultados aceptables, sería difícil su reconocimiento en la recepción del sistema.

Al igual que el modo Booster, el diagrama de ojo analizado para el mejor caso del modo de amplificación En-Línea mostrado en la figura 3.7(a), muestra un desplazamiento respecto a la señal en recepción, además de una atenuación de aproximadamente 2.33 dBm, correspondiente al 45% de la señal original, notando un deterioro significativo dadas las variaciones paramétricas que se generaron para el estudio de este modo de amplificación.

De igual manera, el diagrama espectral del modo de amplificación En-Línea en la figura 3.7 (b), muestra los espectros en transmisión y recepción para uno de los mejores casos del modo especificado, observando el mismo comportamiento que en los casos anteriores, es decir, que la señal en recepción sufre un ensanchamiento, característica que denota la presencia del fenómeno no lineal en los modos de amplificación anteriores, denominado SPM.

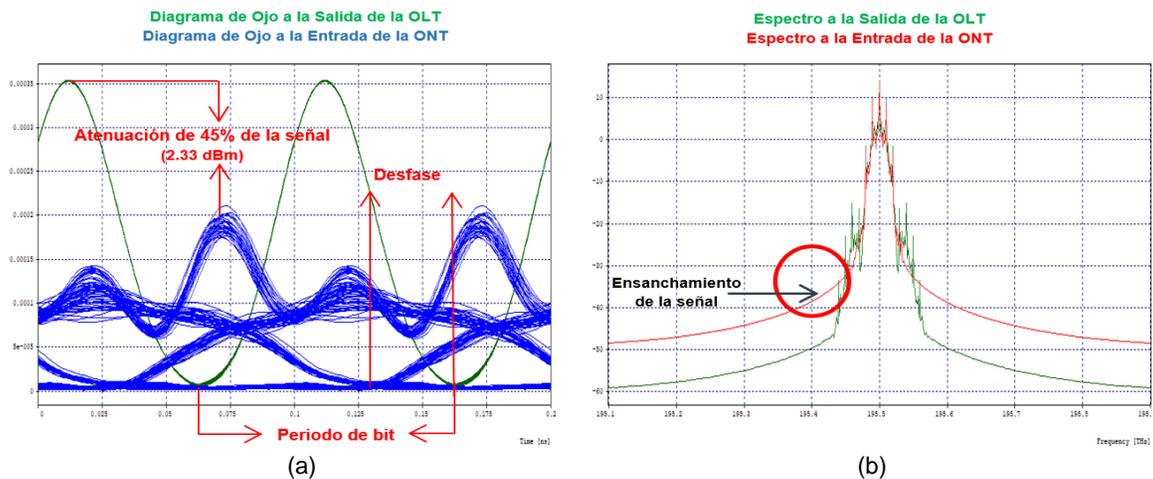


Figura 3.7. Comparación (a) Diagramas de ojo, (b) Diagrama Espectral para el mejor caso modo En-Línea. Fuente de bombeo Co-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Co-Propagado.** En general, la presencia del fenómeno no lineal SPM sobre los sistemas ópticos es observable a través del análisis de los diagramas espectrales de la señal en recepción de la red. Para el caso del análisis de la amplificación híbrida en los modos Booster y Pre-Amplificado, con bombeo Co-Propagado y longitud de onda EDFA de 1480 nm con rango óptimo de amplificación de potencia de 0-10 dBm y Raman en 1420 nm

con rango de potencia de 20-36 dBm, el fenómeno hace presencia desde las variaciones más bajas de potencia en ambos amplificadores. Como se observó para el mejor caso de los modos de amplificación mostrados, se presenta, además, ensanchamiento en el espectro para potencias de amplificación más altas en los rangos descritos, lo cual indica que el sistema es bastante sensible cada vez que se encuentra con una variación de potencia en los amplificadores que conforman el sistema híbrido.

Sin embargo, el fenómeno no lineal de Auto Modulación de Fase también puede ser observado a través del análisis del diagrama de ojo, por medio de la diferencia de fases que se puede presentar entre las señales. Si bien para los casos analizados, este fenómeno puede ser generado por PMD o Dispersión Cromática, el adelanto o atraso de la señal en recepción puede ser un indicio de la presencia de SPM sobre el sistema amplificado, como se observa en las figuras 3.4(a) y 3.7(a). De este modo, además de observar el desfase a través del diagrama de ojo, es posible calcular la posible presencia de SPM mediante desfase, bajo el procedimiento consignado en el Anexo F, presentando un máximo de  $\varphi_{MAX} = 0.025$ , donde al comparar el pulso de entrada con la salida del sistema, se puede notar que el desfase entre los mínimos de las señales es de  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso, correspondiente a una diferencia del 25%, teniendo en cuenta que el ciclo completo de la señal corresponde a cuatro rectángulos de la división de la gráfica, lo cual prueba que además del análisis del efecto SPM observado a través de los diagramas espectrales, también es posible determinar dicho efecto por medio del análisis del diagrama de ojo.

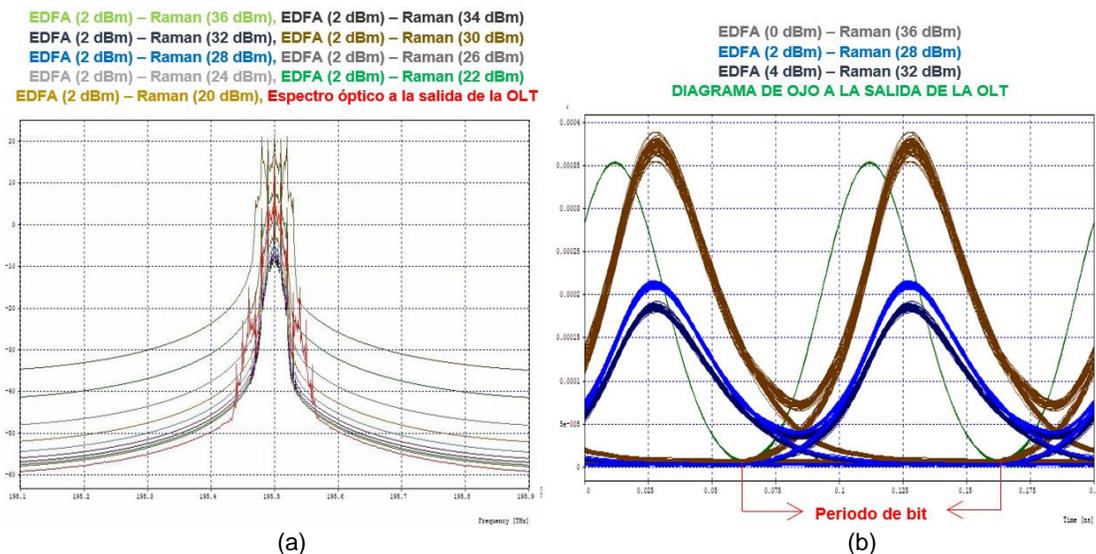


Figura 3.8. Presencia fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Para el modo Booster con longitudes de onda de bombeo EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm con  $P_{BEDFA}$  de 2 dBm y  $P_{BRaman}$  de 20-36 dBm, se obtuvieron los diagramas espectrales, como se muestra en la figura 3.8(a), observando que para el rango de potencias de bombeo Raman de 20-30 dBm, el espectro mantiene su forma; sin embargo, entre 32-36 dBm el espectro se comienza a deformar y se observa ensanchamiento. Igualmente, en la figura 3.7 (b) se presenta la selección de los diagramas de ojo para algunos de los mejores resultados obtenidos en este modo, observando la presencia del fenómeno no lineal SPM dado el desfase de las señales a la entrada de la ONT respecto a la señal original, aunque no produce degradación en el diagrama de ojo del sistema amplificado.

De la misma manera, se estableció que uno de los mejores rangos espectrales para el modo Pre-Amplificado con longitudes de onda de bombeo EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm, se presenta en las potencias de bombeo de 2 dBm y 20-36 dBm, respectivamente. La figura 3.8 (a) muestra que para potencias de bombeo Raman de 20-30 dBm, el espectro es similar en forma y cantidad de energía, para posteriormente observar deformación y ensanchamiento de la forma espectral inicialmente obtenida en el intervalo de 32-36 dBm. Los diagramas de ojo de la Figura 3.8 (b), seleccionados como los mejores en diferentes variaciones de potencia EDFA-Raman, no presentan desfase entre las gráficas de entrada y salida obtenidas. Aunque se observa degradación de señal en los diagramas de ojo, el sistema tiene una respuesta mejor que la esperada en recepción dados los parámetros de monitoreo óptico obtenidos.

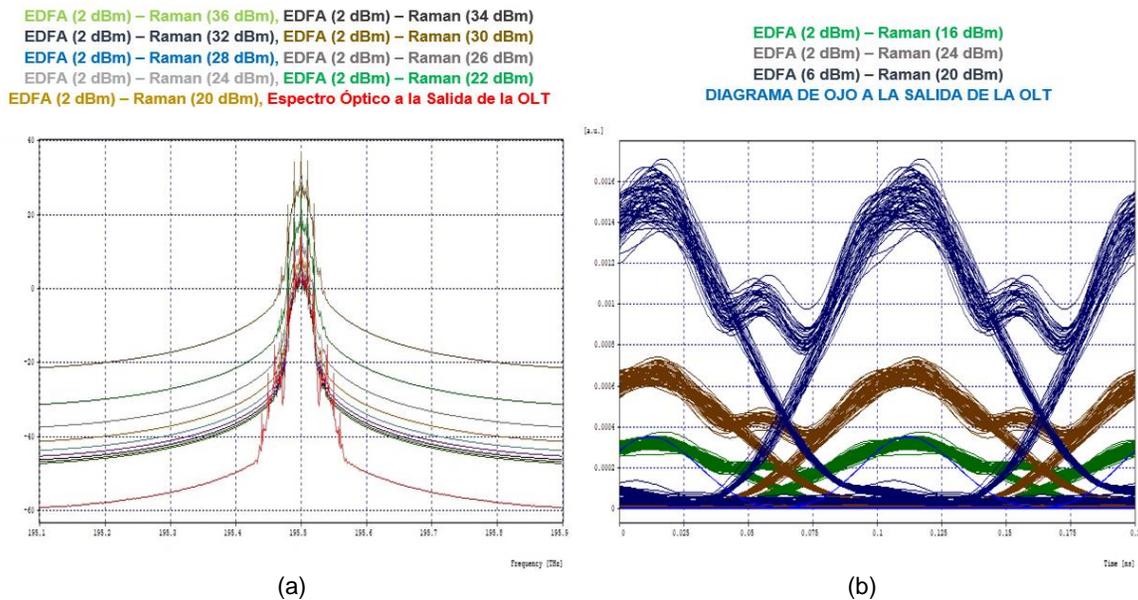


Figura 3.9. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas espectrales y de ojo del modo de amplificación En-Línea mostrados en la figura 3.10, corresponden a longitudes de onda EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm, analizados para potencias de bombeo de 2 dBm y 0-20 dBm respectivamente.

Pese a que en la figura 3.10(a) se observa un ensanchamiento del espectro original, los correspondientes a cada variación de potencia Raman se mantienen constantes en forma y energía. La figura 3.10 (b) muestra los diagramas de ojo de este modo de amplificación, donde se puede observar el deterioro de cada una de las señales en cada variación del rango, además de un desplazamiento de fase de aproximadamente 25% de todas las señales respecto a la señal de entrada.

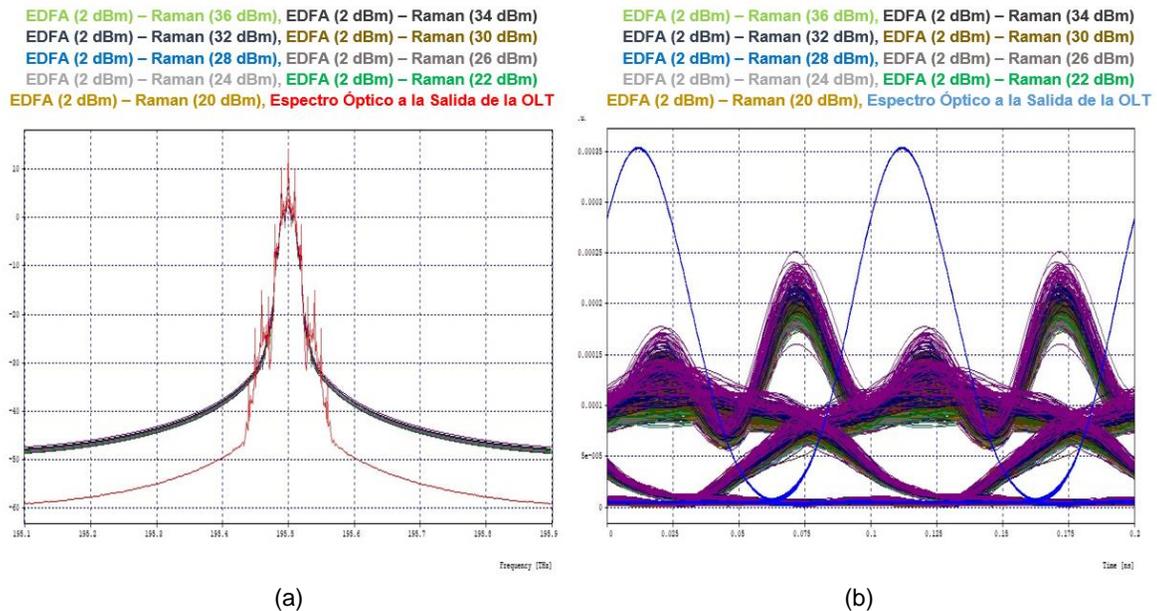


Figura 3.10. Presencia Fenómeno SPM modo En-Línea (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Se pudo determinar que los resultados consignados en la tabla 3.8 para la amplificación EDFA-Raman con bombeo Co-Propagado, establecen la operación del sistema amplificado en una región cuasi-lineal para los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado analizados, siendo las longitudes de onda de bombeo EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm las que entregaron los mejores resultados OPM sobre el sistema óptico amplificado. Dados los inconvenientes presentados en el modo En-Línea con la ejecución de la simulación en los rangos de potencia de bombeo establecidos, el modo de amplificación no tiene un comportamiento

significativo para la evaluación de los efectos presentes, dado que el rango de potencias en el que se evaluó no presenta incidencia de efectos SPM.

Penalizaciones de Potencia para HOA en Co-Propagación						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster	1480	1420	[2-8]	[20-32]	[2-6]	[20-30]
Pre-Amplificado	1480	1420	[2-10]	[20-34]	[2-8]	[20-30]
En-Línea	1480	1420	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM

Tabla 3.8. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

Los análisis realizados permiten establecer la mejor configuración de cada modo de amplificación con bombeo Co-Propagado para una amplificación EDFA-Raman, observando los cambios generados en el comportamiento OPM de la señal de entrada respecto a la salida, como se observó gráficamente. Sin embargo, se pudo establecer que la mejor configuración en un enlace de 80 km para 1 canal de 10 Gbps es el modo Booster, que, a pesar de hallarse que es un sistema muy sensible a las variaciones de potencia de bombeo y de encontrar presencia de SPM, presenta efecto no lineal de baja incidencia en el espectro óptico del enlace.

**3.1.2. Caso 2. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Contra-Propagado.** La red XGS-PON, en los modos de amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea dispuestos en este capítulo (Figura 3.1), analiza el caso de bombeo Contra-Propagado bajo los parámetros de configuración determinados en la tabla 2.10; al igual que en el primer caso de estudio, varían las longitudes de onda y potencia de bombeo ( $P_B$ ) de los amplificadores EDFA y Raman en el rango de potencias determinados como óptimos (Anexos B y C).

Por medio de las variantes presentadas en la tabla 3.4, se pudo obtener que la mejor respuesta del sistema óptico en bombeo Contra-Propagado fueron las longitudes de onda 1480 nm en EDFA y 1420 nm en Raman, en los tres modos de amplificación dispuestos para el análisis de este capítulo; se encontró que para este caso, existe correspondencia respecto a frecuencia y modo de bombeo para la amplificación Raman, como se concluyó en el trabajo de investigación referenciado de Marulanda y Paredes [36]. Los resultados OPM consignados en

tablas 3.9, 3.10 y 3.11, muestran que salvo la amplificación En-Línea, los resultados para los modos Booster y Pre-Amplificado están por encima de los valores mínimos recomendados por la ITU-T respecto a factor de calidad y BER, así como potencias dentro del umbral mínimo de recepción.

Modo Booster – Bombeo Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-36,853	2	20	21,00322	4,35E-29	-24,043	4	20	23,13874	1,00E-40	-21,775
	22	6,0206	2,28E-02	-36,464		22	20,3222	1,55E-25	-23,657		22	22,88961	1,00E-40	-21,389
	24	6,0206	2,28E-02	-35,857		24	21,43337	6,72E-31	-23,048		24	24,24076	1,00E-40	-20,777
	26	6,0206	2,28E-02	-34,885		26	22,25033	1,55E-37	-22,077		26	25,01713	1,00E-40	-19,81
	28	6,0206	2,28E-02	-33,34		28	23,41517	1,00E-40	-20,542		28	24,82189	1,00E-40	-18,276
	30	6,89788	1,35E-02	-30,897		30	24,37082	1,00E-40	-18,105		30	25,69273	1,00E-40	-15,836
	32	9,81963	9,65E-04	-27,042		32	24,67555	1,00E-40	-14,249		32	26,04767	1,00E-40	-11,836
	34	11,15325	1,25E-04	-20,912		34	24,92222	1,00E-40	-8,179		34	25,7931	1,00E-40	-5,973
	36	11,22463	1,14E-04	-11,409	36	22,27543	1,00E-40	0,85	36	20,85044	4,20E-28	2,638		
6	20	27,66599	1,00E-40	-18,909	8	20	30,46961	1,00E-40	-16,527	10	20	32,69007	1,00E-40	-14,34
	22	27,99694	1,00E-40	-18532		22	30,66854	1,00E-40	-16,152		22	33,07372	1,00E-40	-13,959
	24	28,52413	1,00E-40	-17,915		24	30,18684	1,00E-40	-15,533		24	33,19147	1,00E-40	-13,351
	26	28,41966	1,00E-40	-16,955		26	31,14045	1,00E-40	-14,564		26	33,25209	1,00E-40	-12,384
	28	28,98708	1,00E-40	-15,412		28	30,99563	1,00E-40	-13,035		28	33,1507	1,00E-40	-10,854
	30	29,75736	1,00E-40	-12,983		30	31,47042	1,00E-40	-10,611		30	32,92344	1,00E-40	-8,436
	32	29,5875	1,00E-40	-9,145		32	30,93174	1,00E-40	-6,786		32	30,57921	1,00E-40	-4,639
	34	26,41807	1,00E-40	-3,186		34	26,92345	4,35E-38	-0,95		34	26,52818	1,00E-40	0,929
	36	13,88567	2,51E-07	4,679	36	9,74475	5,41E-03	6,215	36	7,37541	1,21E-02	7,334		

Tabla 3.9. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Booster, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo Pre-Amplificado – Bombeo Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-29,812	2	20	18,70216	1,14E-17	-7,081	4	20	19,39605	3,49E-20	-2,062
	22	6,0206	2,28E-02	-29,435		22	18,72199	7,77E-15	-6,695		22	18,40082	3,18E-20	-1,677
	24	6,0206	2,28E-02	-28,8		24	18,67159	1,92E-17	-6,082		24	19,40686	2,91E-20	-1,066
	26	6,0206	2,28E-02	-27,835		26	18,64745	1,83E-17	-5,112		26	19,38693	3,70E-20	-0,097
	28	6,0206	2,28E-02	-26,265		28	18,67857	1,41E-17	-3,577		28	19,38688	3,41E-20	1,434
	30	6,0206	2,28E-02	-23,863		30	18,64266	1,83E-17	-1,144		30	19,39338	3,70E-20	3,862
	32	6,0206	2,28E-02	-19,959		32	18,73971	7,07E-18	2,707		32	19,41702	2,57E-20	7,689
	34	6,0206	2,28E-02	-13,831		34	18,726	6,28E-18	8,745		34	19,32139	7,41E-20	13,578
	36	6,0206	2,28E-02	-4,038	36	18,25678	6,21E-16	17,675	36	18,96611	1,10E-18	21,571		
6	20	19,80539	6,54E-23	0,742	8	20	19,44197	1,34E-20	3,047	10	20	21,69382	1,77E-33	5,281
	22	19,79206	9,85E-23	1,126		22	19,44563	1,22E-20	3,431		22	21,67965	2,43E-33	5,664
	24	19,79212	1,07E-22	1,737		24	19,44304	1,24E-20	4,04		24	21,67537	2,70E-33	6,272
	26	19,80487	7,97E-23	2,702		26	19,46862	8,99E-21	5,003		26	21,7136	1,29E-33	7,232
	28	19,35903	1,07E-22	4,234		28	19,49758	4,62E-21	6,529		28	21,75199	5,17E-34	8,749
	30	19,38703	7,87E-23	6,65		30	19,51678	3,59E-21	8,932		30	21,7598	2,80E-34	11,129
	32	19,77211	8,86E-23	10,445		32	19,68304	4,33E-22	12,683		32	21,89798	1,36E-35	14,804
	34	19,61317	6,61E-22	16,176		34	19,8857	2,15E-23	18,191		34	21,90489	2,33E-34	20,011
	36	17,28809	1,81E-13	23,094	36	11,68598	5,71E-05	23,596	36	9,70444	8,97E-04	23,482		

Tabla 3.10. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA Pre-Amplificado, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo En-Línea – Bombeo Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,2750E-02	-29,760	2	0	14,18274	1,4729E-07	-7,504	4	0	16,84304	2,9975E-12	-1,521
	2	6,02060	2,2750E-02	-29,892		2	12,70009	1,2479E-05	-7,545		2	16,48384	1,3389E-11	-1,451
	4	6,02060	2,2750E-02	-29,987		4	12,86228	5,4777E-06	-7,464		4	16,58215	6,2192E-11	-1,517
	6	6,02060	2,2750E-02	-30,000		6	13,02611	2,8534E-06	-7,448		6	16,38748	1,2815E-10	-1,441
	8	6,02060	2,2750E-02	-29,728		8	13,72938	5,7973E-07	-7,360		8	15,84892	4,8384E-10	-1,465
	10	6,02060	2,2750E-02	-29,762		10	14,70968	2,2513E-08	-7,395		10	15,64715	2,5922E-09	-1,370
	12	6,02060	2,2750E-02	-29,824		12	14,46098	5,5742E-08	-7,336		12	16,86133	2,8555E-12	-1,353
	14	6,02060	2,2750E-02	-29,746		14	13,72271	1,0166E-06	-7,190		14	16,75778	2,5272E-11	-1,272
	16	6,02060	2,2750E-02	-29,681		16	13,60446	1,0152E-06	-7,058		16	16,01113	1,9215E-10	-1,114
	18	6,02060	2,2750E-02	-29,105		18	14,18522	3,1064E-07	-6,844		18	16,60495	1,1050E-11	-0,942
20	6,02060	2,2750E-02	-29,551	20	13,52616	8,0851E-07	-6,509	20	16,83980	1,4701E-11	-0,569			
6	0	17,66607	1,2333E-14	2,361	8	0	18,93612	6,5014E-19	5,457	10	0	19,0096	9,6191E-18	8,243
	2	17,70642	7,2179E-14	2,376		2	17,95390	3,4540E-15	5,464		2	18,3630	4,0572E-16	8,265
	4	17,06465	1,1064E-12	2,409		4	18,47760	1,4579E-16	5,485		4	18,0358	8,0994E-16	8,270
	6	18,03546	2,2606E-15	2,403		6	19,04842	9,2324E-18	5,485		6	17,8846	5,5196E-15	8,287
	8	17,92315	6,8825E-15	2,441		8	18,10376	9,1171E-16	5,494		8	18,5383	4,4917E-16	8,294
	10	17,05091	1,8186E-12	2,468		10	18,07911	4,9051E-16	5,527		10	18,0716	8,0304E-16	8,339
	12	18,04301	2,7389E-15	2,480		12	18,21469	4,6892E-16	5,568		12	18,3349	2,3098E-15	8,376
	14	18,43691	9,0025E-16	2,570		14	18,57434	3,6785E-17	5,660		14	18,5967	5,0054E-17	8,445
	16	17,57844	3,8393E-14	2,719		16	18,02781	3,6533E-15	5,795		16	18,7837	1,5809E-18	8,581
	18	17,64552	1,1538E-14	2,914		18	18,40132	4,6097E-17	6,003		18	17,8929	3,0672E-15	8,787
20	17,73206	2,3183E-14	3,237	20	18,39931	9,2695E-17	6,304	20	18,1225	1,1426E-15	9,082			

Tabla 3.11. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, HOA En-Línea, Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Los tres modos de amplificación con bombeo de potencia EDFA igual a 0 dBm y Raman en el rango de 20-36 dBm, para Booster y Pre-Amplificado, y de 0-20 dBm en el modo En-Línea, no aportan en amplificación, ya que los resultados obtenidos no están dentro del rango mínimo de OPM y de sensibilidad del receptor que posee el sistema de -28 dBm.

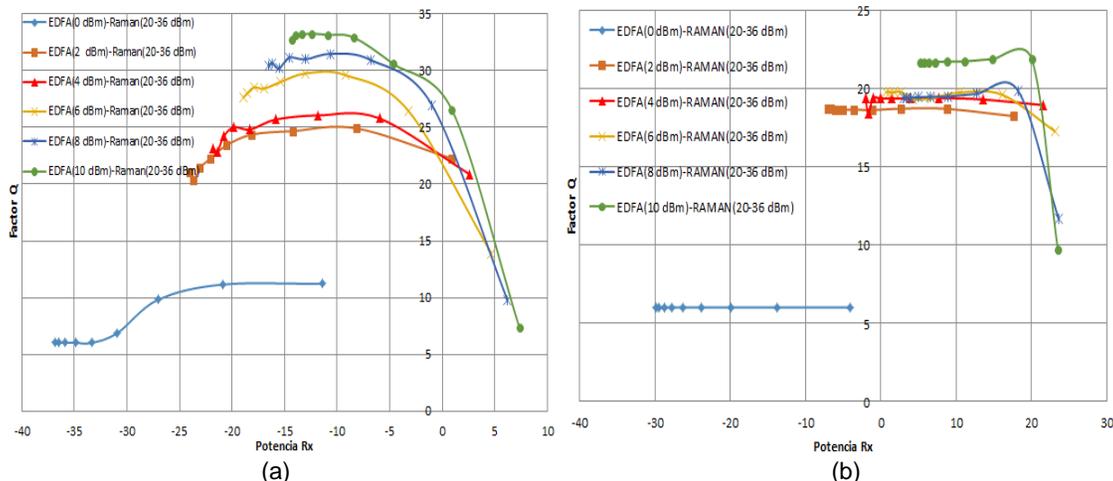


Figura 3.11. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.

La relación Factor Q vs  $P_{Rx}$  para el modo Booster Contra-Propagado de la figura 3.11(a), en los rangos de bombeo EDFA de 2-10 dBm y Raman 20-32 dBm, muestra resultados estables superiores a los mínimos establecidos en los parámetros de monitoreo óptico, cuya sensibilidad de recepción se encuentra dentro de los niveles definidos. Se observa que los mejores resultados de amplificación híbrida se encuentran para la variación EDFA de 4 dBm (rojo), dada la estabilidad que se presenta en esta variación y que el sistema no se está forzando. De igual forma, se observa entre la variación de 34-36 dBm un cambio en las pendientes de las curvas donde, pese a que en 34 dBm se halla un factor de calidad y sensibilidad en recepción aceptables, en 36 dBm el sistema está afectado producto del exceso de amplificación, reflejando este comportamiento en el cambio de pendiente de las curvas de amplificación híbrida y la degradación del sistema.

El modo Pre-Amplificado de la figura 3.11(b), detalla que en EDFA igual a 0 dBm y variación en todo el rango Raman, no se está generando amplificación HOA, como también se observa en la tabla 3.10, ya que los resultados obtenidos no están dentro del rango mínimo de OPM y de sensibilidad de recepción. Pese a que gráficamente el modo Pre-Amplificado se presenta como un sistema muy

estable y en algún caso de las variaciones EDFA de 2-10 dBm y Raman de 20-36 dBm se alcanzan valores de BER superiores a 22 dBm, en general, este modo no alcanza los mínimos de Factor Q requeridos, además de sobreamplificar el sistema con combinaciones de potencia EDFA-Raman muy bajas.

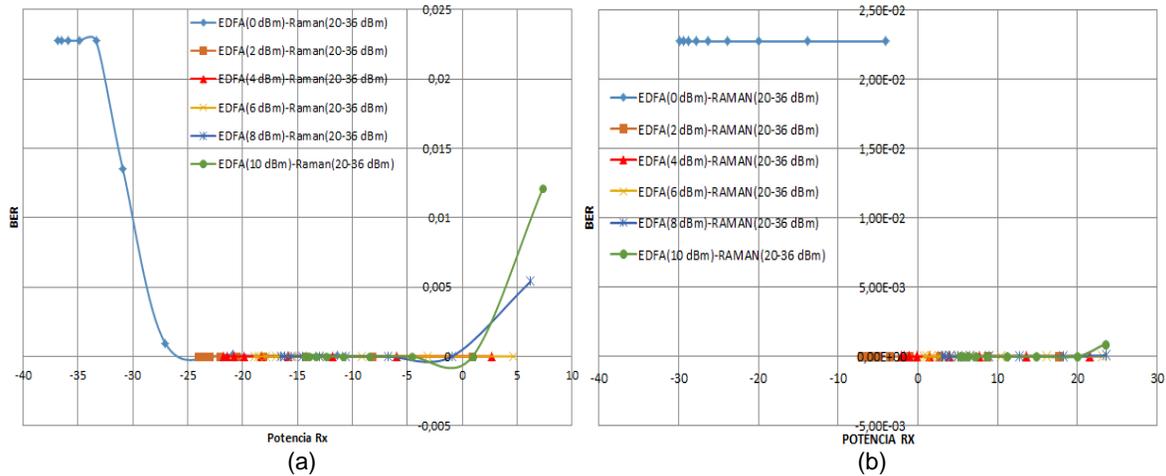


Figura 3.12. BER vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Cascada, para 1 canal a 10 Gbps.

Las gráficas de BER vs  $P_{RX}$  para los modos Booster y Pre-Amplificado mostrados en la figura 3.12, son inversamente proporcionales a los resultados presentados en la figura 3.11. En el modo Booster se observan los cambios bruscos en las pendientes de las curvas EDFA iguales a 0, 8 y 10 dBm, observando un comportamiento constante y lineal en la tasa de errores de bits transmitidos en las variaciones de potencia de bombeo EDFA de 2-10 dBm y Raman de 20-32 dBm. No obstante, para la variación Raman de 34 dBm, se encuentran valores de BER mínimos requeridos, a pesar de las variaciones en la pendiente de las curvas, que indican caídas en el factor de calidad y aumento en la transmisión de datos erróneos en el sistema, haciendo más evidente dicho cambio de pendiente al alcanzar los 36 dBm, notando la sobreamplificación y degradación del sistema óptico. La figura 3.12 (b), muestra un comportamiento cuasi-lineal del modo Pre-Amplificado, donde excepto a la potencia de bombeo EDFA igual a 6 dBm, este no alcanza los mínimos BER requeridos para un sistema óptico.

Los diagramas de ojo de la figura 3.13 para el modo Booster y Pre-Amplificado, comparan la mejor respuesta obtenida en el bombeo Contra-Propagado respecto a la salida de la OLT.

La figura 3.13(a) muestra el diagrama de ojo en recepción del modo Booster, cuyos parámetros de monitoreo cumplen con los mínimos requeridos en un sistema óptico según lo establecido por la ITU-T. La señal en recepción presenta atenuación en amplitud del 28.6%, no obstante, los parámetros de monitoreo obtenidos, así como el nivel de sensibilidad recibido, determinan que la señal puede ser detectada sin dificultades. Aunque presenta un corrimiento de  $\varphi_{MAX} = 0.025$  (Ver Anexo F), este desplazamiento no influye sobre el sistema, dado que la transmisión no se realiza en fase sino en amplitud.

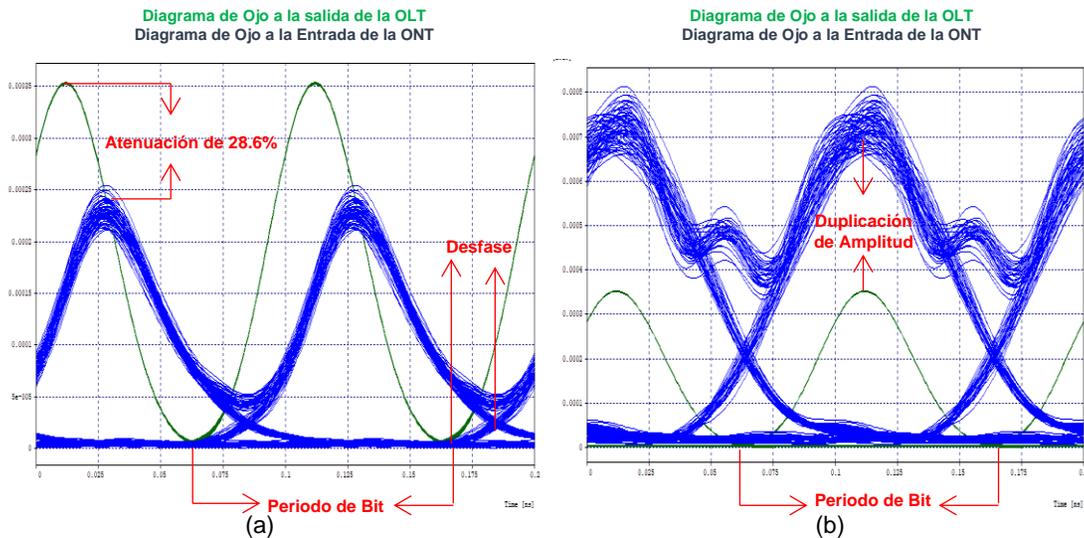


Figura 3.13. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Contrario al diagrama de ojo del modo de amplificación Booster, el modo Pre-Amplificado de la figura 3.13 (b) no alcanza los mínimos OPM establecidos, además de sobreamplificar el sistema, evidenciando tal comportamiento en la degradación y duplicación de la amplitud de la señal recibida.

Los diagramas espectrales mostrados en la figura 3.14, representan la transmisión (verde) y recepción (rojo) para los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, incorporando uno de los mejores casos de cada modo.

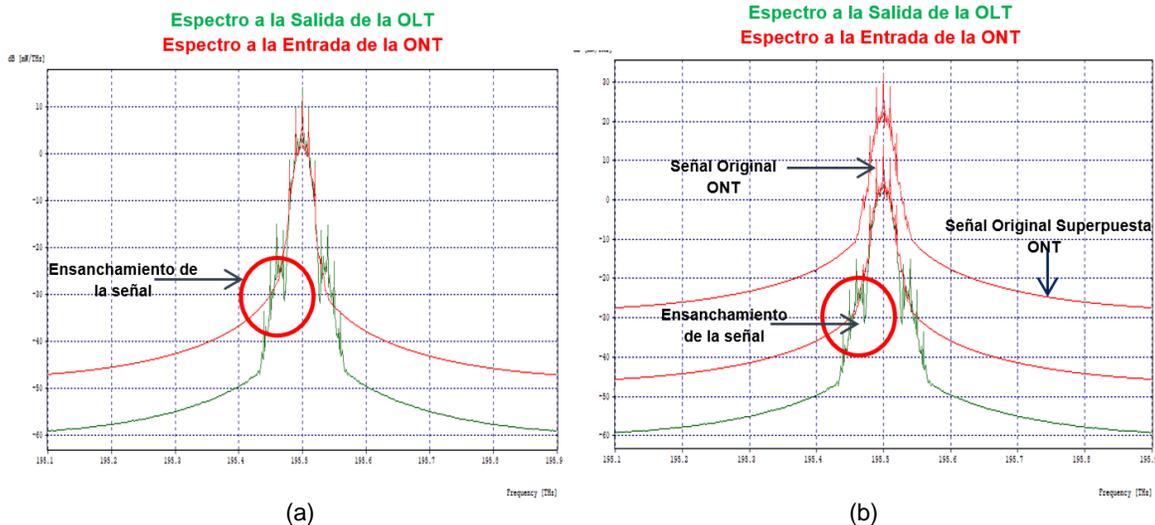


Figura 3.14. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

La figura 3.14 (a), presenta los diagramas espectrales del modo de amplificación Booster; se puede observar un ensanchamiento de la señal en recepción atribuido a la presencia del fenómeno no lineal denotado como SPM. En el Diagrama espectral del modo Pre-Amplificado en la figura 3.14 (b), se visualiza el espectro a la salida de la OLT que no se superpone al espectro de entrada, debido al alto nivel de potencia en que es recibida la señal. Sin embargo, mediante la superposición manual de señales, se validó gráficamente el ensanchamiento generado por la presencia de SPM y la sobreamplificación que este modo presenta.

De la misma forma que se presentó en el modo de bombeo Co-Propagado, la amplificación En-Línea Contra-Propagada presentó errores a nivel software que no permitieron la simulación del sistema amplificado en los parámetros considerados anteriormente. De este modo, se modificaron los parámetros de potencia de bombeo para el análisis del comportamiento de la amplificación, estableciendo el cambio de potencia Raman en el rango 0-20 dBm, cuyos mejores resultados fueron obtenidos para las longitudes de onda de 1480 nm y 1420 nm para ambos amplificadores. Sin embargo, las longitudes de onda 1480 nm y 1455 nm sobre el sistema amplificado híbrido se comportan de manera similar respecto a Factor Q y BER, encontrando diferencias mínimas entre las potencias de recepción.

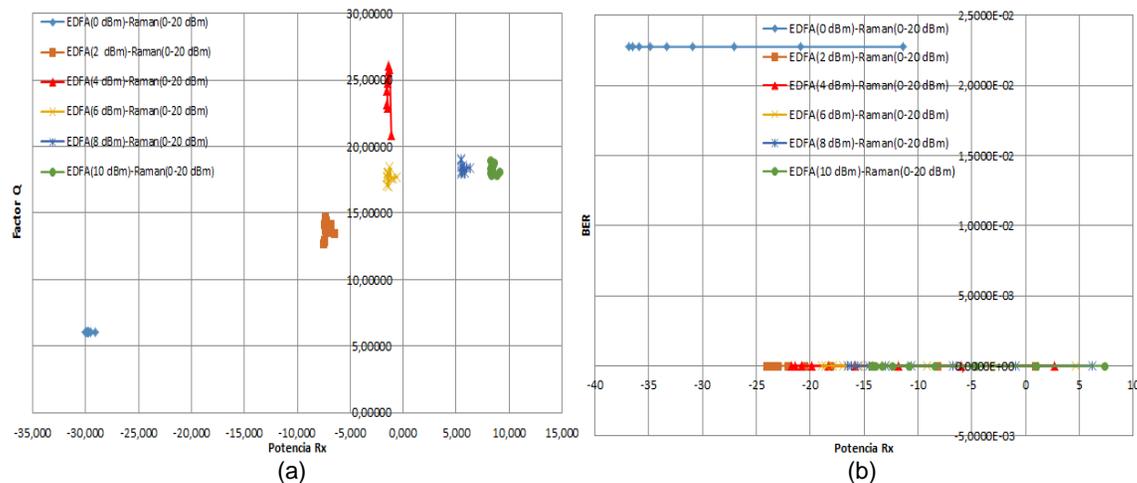


Figura 3.15. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA modo En-Línea. Fuente de bombeo Contra-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

Los resultados presentados en la figura 3.15 para las relaciones de Factor Q vs  $P_{Rx}$  y BER vs  $P_{Rx}$ , muestran que para variaciones de potencia Raman de 0 a 20 dBm en conjunto con el bombeo en EDFA igual a 0 dBm, no se tiene una respuesta cuantificable respecto a Factor Q y BER. En cada variación de potencia para cada bombeo EDFA de 2 a 10 dBm, se mantiene una variación en el factor de calidad entre 14 dB y 18 dB que no alcanza los mínimos requeridos para una buena transmisión de datos por la red. No obstante, pese a que se alcanzan niveles de transmisión de bits errados aceptables, el reconocimiento de los mismos en recepción se dificulta.

Teniendo en cuenta las variaciones realizadas en los parámetros para el análisis del modo de amplificación En-Línea, el diagrama de ojo de la Figura 3.16(a) presenta desplazamiento de la señal recibida de aproximadamente 25%, sobreamplificación y posterior degradación de los pulsos ópticos determinando una baja calidad en la señal entregada al receptor. La figura 3.16(b), presenta el resultado espectral en recepción donde se puede observar ensanchamiento en el espectro, fenómeno que ocurre por la presencia de SPM en el sistema óptico y que es soportado dados los resultados observados en el diagrama de ojo de este modo de amplificación.

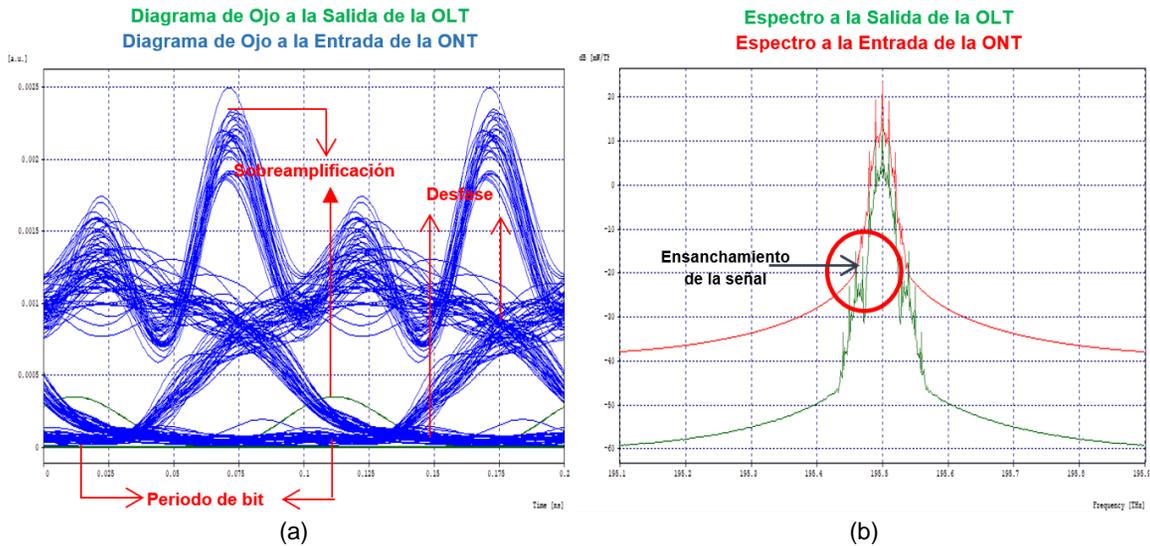


Figura 3.16. Comparación (a) Diagramas de ojo, (b) Diagrama Espectral para el mejor caso modo En-Línea. Fuente de bombeo Contra-Propagada, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Contra-Propagado.** El análisis de la amplificación híbrida en cascada para los modos Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, con bombeo Contra-Propagado para longitudes de onda EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm en los tres casos y rango óptimo de amplificación de potencia EDFA de 0 a 10 dBm y Raman de 20 a 36 dBm para los dos modos de amplificación mencionados inicialmente, presentan el fenómeno SPM desde las variaciones más bajas de potencia, desde el punto de vista del desplazamiento de la señal óptica en recepción del diagrama de ojo y el ensanchamiento del espectro de la misma. La presencia de este fenómeno se hace notoria para potencias de amplificación altas en los rangos descritos, indicando una alta sensibilidad del sistema con cada variación de potencia en los amplificadores que conforman el sistema híbrido. De esta forma, se puede observar la presencia del fenómeno no lineal SPM en los modos Booster y Pre-Amplificado en las figuras 3.13(a) y 3.16(a), que presentan desfase en las señales de salida respecto a la entrada de  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso (ver Anexo F), comprobando que es posible determinar el efecto SPM por medio de los diagramas espectrales y del análisis del diagrama de ojo.

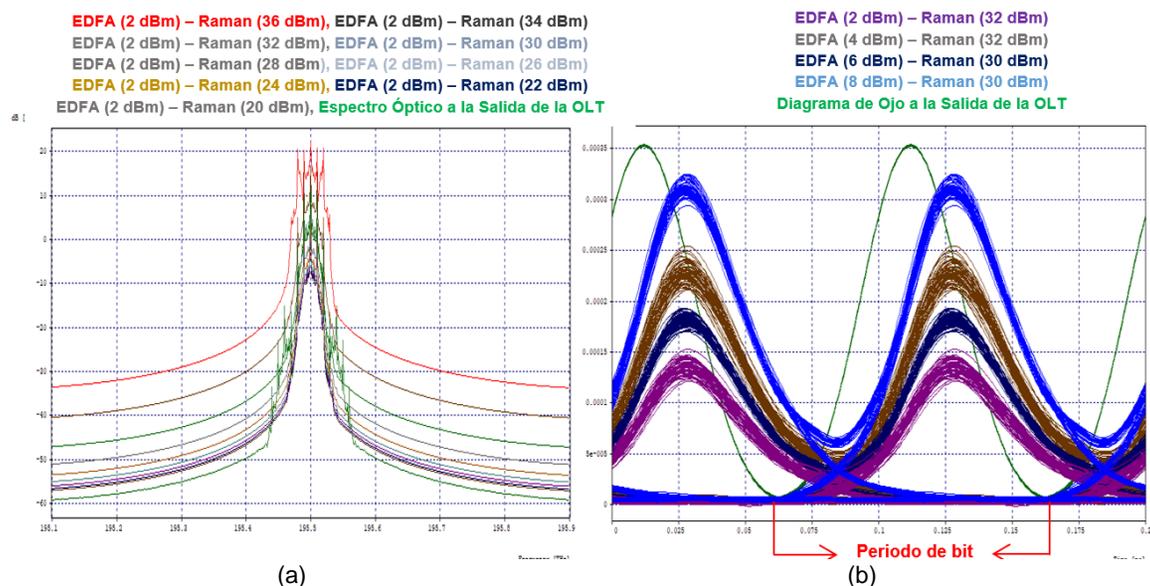
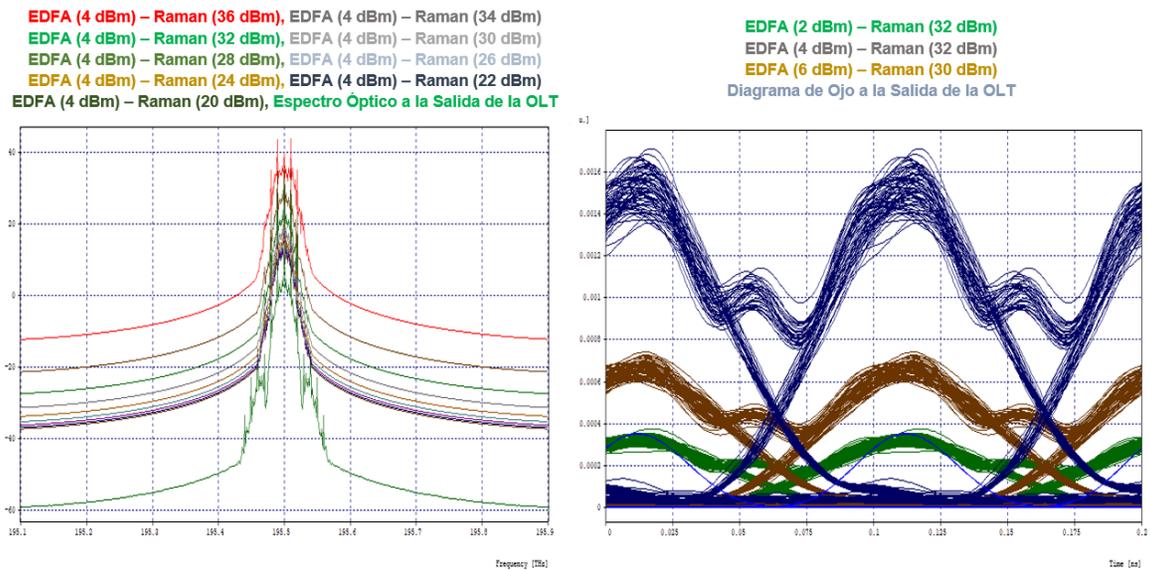


Figura 3.17. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Los espectros del modo Booster de la figura 3.17 (a), para potencias de bombeo EDFA 2 dBm y Raman de 20-36 dBm, muestran que los diagramas espectrales entre 20-30 dBm no se deforman ni poseen ensanchamiento respecto al espectro de entrada. Posterior a este rango (30-36 dBm), se puede observar la presencia de SPM sobre el sistema amplificado. Los diagramas de ojo de la figura 3.17 (b), para los mejores casos del modo de amplificación, muestran el desfase de las señales a la entrada de la OLT respecto a la original; no obstante, no se produce degradación en la forma del patrón original.

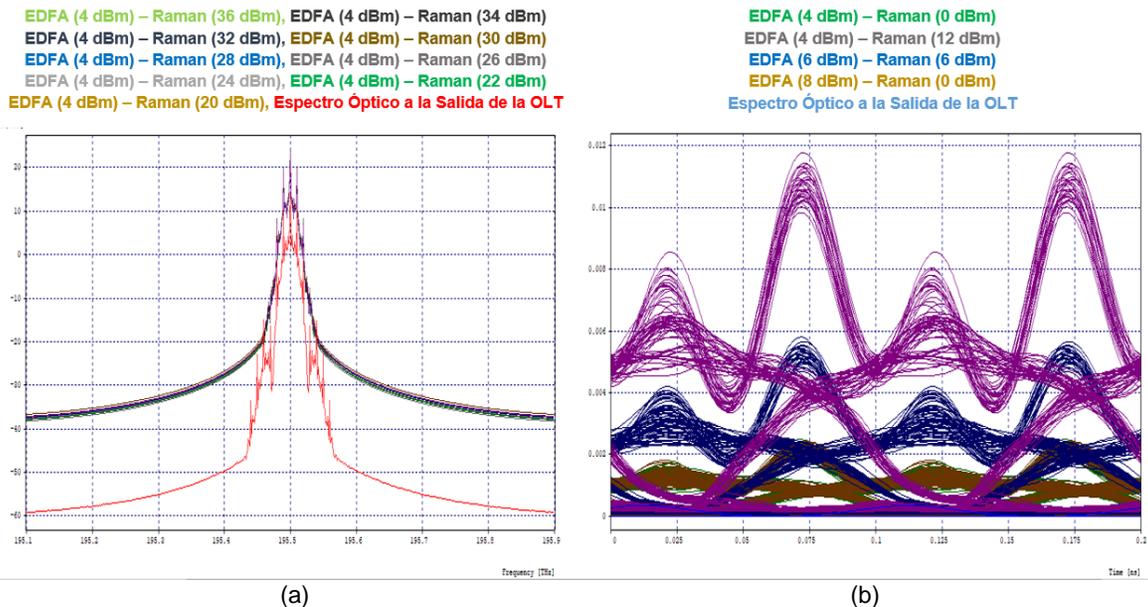
El mejor desempeño del modo Pre-Amplificado con bombeo Contra-Propagado, fue encontrado para potencias EDFA igual a 4 dBm y Raman en el rango de 20-30 dBm, como se muestra en los diagramas espectrales de la figura 3.18(a), donde los espectros en recepción conservan la misma forma, pero presentan ensanchamiento respecto al espectro transmitido. Además de presentar ensanchamiento y deformación en los espectros del rango de potencia Raman de 32-36 dBm, se observa sobreamplificación de la señal en el sistema óptico. La figura 3.18 (b), presenta los mejores resultados obtenidos en las variaciones de potencia realizadas, donde no se presenta desfase entre los diagramas de ojo; sin embargo, el modo Pre-Amplificado está sobreamplificando y degradando la señal en el sistema óptico.



(a) (b)  
 Figura 3.18. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas espectrales para el modo de amplificación En-Línea mostrados en la figura 3.19(a), corresponden al mejor caso para una longitud de onda EDFA 1480 nm, potencia de bombeo 4 dBm (en el rango 0-20 dBm) y longitud de onda Raman 1420 nm. Además de no alcanzar los mínimos OPM requeridos, se observa ensanchamiento de todos los espectros del rango respecto al original; sin embargo, los espectros se mantienen constantes dentro del rango de amplificación, mostrando un sistema poco sensible a las variaciones de potencia respecto a Factor Q, BER y Potencia de Recepción.

La figura 3.19 (b) muestra los diagramas de ojo En-Línea para cada una de las mejores variaciones especificadas; se observa el deterioro de cada una de las señales, además de un desplazamiento de fase de  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso de todas ellas respecto a la entrada.



(a) (b)  
 Figura 3.19. Presencia Fenómeno SPM modo En-Línea (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Penalizaciones de Potencia para HOA en Co-Propagación						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster	1480	1420	[2-10]	[20-32]	[2-8]	[20-30]
Pre-Amplificado	1480	1420	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM
En-Línea	1480	1420	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM	No cumple Objetivo OPM

Tabla 3.12. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

La tabla 3.12, consigna los rangos de amplificación HOA para el tipo de bombeo Contra-Propagado, cuyos resultados en los modos de amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea mostraron condiciones de operación cuasi-lineal en el sistema óptico. El análisis de este caso determinó nuevamente que las longitudes de onda de bombeo más adecuadas para los amplificadores EDFA y Raman en todos los modos de amplificación, fueron 1480 nm y 1420 nm, respectivamente. Se encontró que la potencia de bombeo para el modo Booster que no presentó ensanchamiento producto del fenómeno no lineal SPM, fue en el rango Raman de 20-30 dBm, comportamiento contrario al presentado en los modos Pre-Amplificado y En-Línea, donde se verificó la presencia de este fenómeno en todo el rango de

las composiciones de potencia EDFA-Raman y que además no lograron los mínimos OPM requeridos para alcanzar una transmisión óptica de manera óptima.

**3.1.3. Caso 3. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional.** El estudio de la amplificación híbrida Bidireccional sobre la red XGS-PON de la figura 3.1, se basa en el análisis de rendimiento de los casos anteriormente analizados, donde se estableció que para los tipos de bombeo Co-Propagado y Contra-Propagado, el mejor modo de amplificación fue el Booster, con longitud de onda EDFA de 1480 nm y potencia de bombeo de 0-10 dBm y Raman de 1420 nm con potencias de bombeo 20-36 dBm. Es de anotar que el bombeo Bidireccional a nivel de simulación solo puede ser efectuado para el amplificador EDFA, mientras que para el Raman se consideraron los tipos Co y Contra-Propagado. Las tablas 3.13 y 3.14 muestran los mejores parámetros para la amplificación EDFA-Raman Bidireccional en Co-Propagación y Contra-Propagación, respectivamente.

Modo Booster - Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm									
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
2	20	33,638	1,00E-40	-16,551	4	20	36,281	1,00E-40	-13,787
	22	33,613	1,00E-40	-16,175		22	36,190	1,00E-40	-13,403
	24	34,901	1,00E-40	-15,558		24	36,206	1,00E-40	-12,796
	26	35,555	1,00E-40	-14,587		26	36,633	1,00E-40	-11,829
	28	36,361	1,00E-40	-13,056		28	36,212	1,00E-40	-10,295
	30	35,480	1,00E-40	-10,629		30	35,308	1,00E-40	-7,876
	32	33,616	1,00E-40	-6,791		32	31,029	1,00E-40	-4,065
	34	27,047	1,00E-40	-0,824		34	26,273	1,00E-40	1,629
	36	7,893	4,35E-03	6,412		36	6,351	2,63E-02	7,594

Tabla 3.13. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.

Modo Booster - Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm									
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
2	20	23,30227	1,00E-40	-2,4910	4	20	24,26274	1,00E-40	17,7460
	22	23,32925	1,00E-40	-1,5220		22	24,25577	1,00E-40	24,1570
	24	23,27563	1,00E-40	12,3700		24	24,27563	1,00E-40	10,3330
	26	23,29130	1,00E-40	21,4940		26	24,22486	1,00E-40	14,1120
	28	23,31061	1,00E-40	-0,4550		28	24,24300	1,00E-40	19,8420
	30	23,28747	1,00E-40	-0,0700		30	24,24908	1,00E-40	23,8680
	32	23,30109	1,00E-40	15,3190		32	24,22992	1,00E-40	10,0530
	34	23,50678	1,00E-40	23,6650		34	24,10493	1,00E-40	12,4420
	36	24,48367	1,00E-40	11,8400		36	22,75273	1,00E-40	16,1600

Tabla 3.14. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.

La tabla 3.13 consigna los resultados OPM y  $P_{RX}$  obtenidos para el caso EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, los cuales fueron superiores a los obtenidos en el bombeo Contra-Propagado de la Tabla 3.14, logrando que no se genere

sobreamplificación en el sistema en el rango  $P_{BRaman}$  20-30 dBm y por consiguiente no se presenten caídas en recepción sobre la red óptica. Aunque el sistema con bombeo Raman Contra-Propagado muestra resultados de Factor Q y BER estables y superiores a los requeridos por las recomendaciones de la ITU-T en todo el rango de análisis de potencia de bombeo Raman, este presenta incrementos de potencia en recepción seguido de caídas abruptas entre cada variación del intervalo de potencia Raman, mostrando una alta sensibilidad e inestabilidad del sistema a nivel de recepción. De esta forma, solo se analizan gráficamente los resultados obtenidos para el modo Booster con amplificación EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado (Figura 3.20).

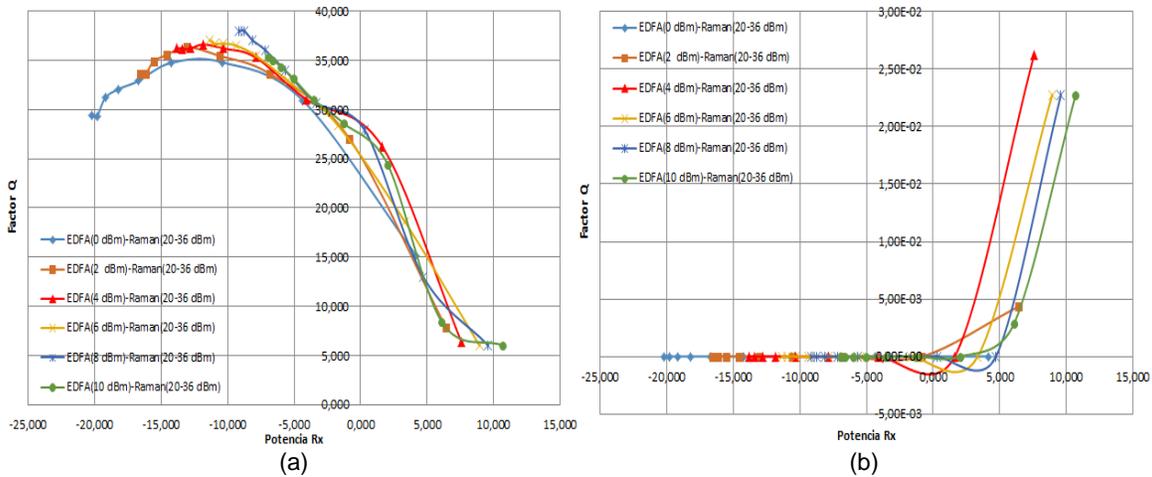


Figura 3.20. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA, modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagada, para 1 canal a 10 Gbps.

La figura 3.20 muestra los resultados de Factor Q y BER respecto a la  $P_{Rx}$  para el análisis del caso de amplificación EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado. A diferencia de los casos anteriores, se puede notar el aporte de la amplificación EDFA Bidireccional para una potencia EDFA de 0 dBm y Raman de 20 dBm, alcanzando valores de calidad superiores a 28 dB y potencias dentro del rango de sensibilidad de recepción. Igualmente, se muestra un comportamiento donde el rango EDFA de 0-10 dBm y Raman de 20-28 dBm mantiene un Factor Q ascendente entre 30 y 36 dB y potencia dentro del rango de sensibilidad donde no se presenta sobreamplificación. Si bien, al variar  $P_{BRaman}$  entre 30-34 dBm se observa un cambio en la pendiente de las curvas que constituyen una caída en el Factor de Calidad del sistema, estas continúan por encima de los mínimos establecidos, solo observando un fallo general en el funcionamiento del sistema óptico amplificado al alcanzar la potencia Raman de 26 dBm.

La respuesta BER vs  $P_{RX}$  de la figura 3.20 (b), expone un sistema inversamente proporcional al observado en la relación que involucra al Factor de Calidad analizado, observando un comportamiento lineal en el rango Raman de 20-34 dBm que solo cambia cuando se alcanza el máximo de la variación de potencia Raman (36 dBm), variando la pendiente de las curvas y determinando el incremento en la cantidad de bits erróneos, así como sobreamplificación en el sistema.

El diagrama de ojo de la figura 3.21(a), referente a la mejor composición de potencia de bombeo EDFA-Raman (4 dBm y 28 dBm, respectivamente), muestra un desfase evidente entre las gráficas de transmisión y recepción, determinando la presencia de SPM. Dicho fenómeno no lineal es observable en la figura 3.21 (b), donde se presenta ensanchamiento del espectro en recepción respecto a la señal transmitida. Sin embargo, dados los resultados obtenidos y analizados anteriormente, se puede determinar que este fenómeno no degrada al sistema analizado.

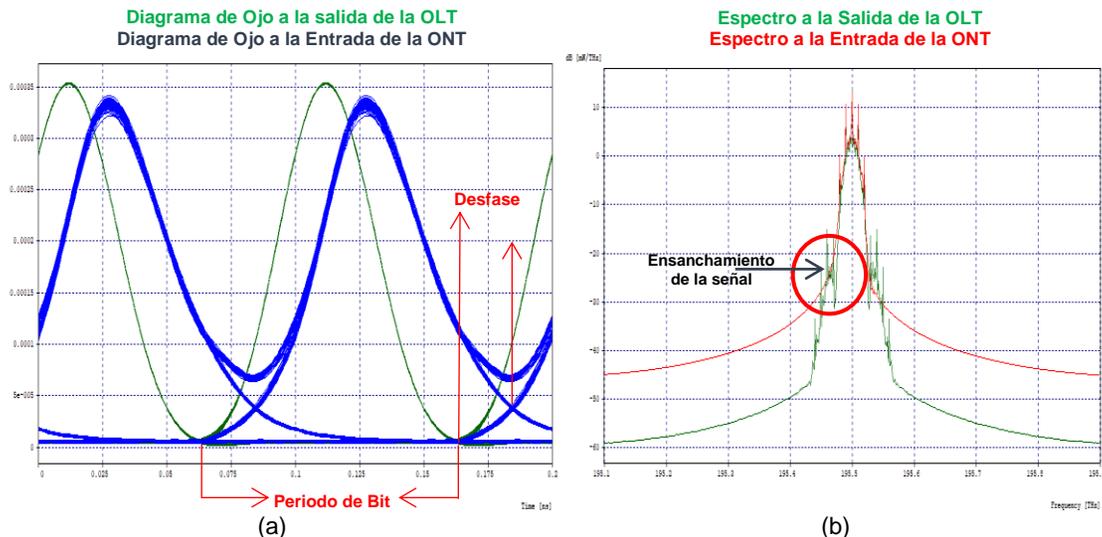


Figura 3.21. Diagramas en Transmisión y Recepción (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Bidireccional.** El análisis del modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, determina que la presencia del fenómeno no lineal SPM es observable en el espectro, desde las variaciones de potencia más bajas de la amplificación híbrida presentando un ensanchamiento del espectro más visible en los rangos EDFA de 8-10 dBm y Raman 32-36 dBm. Este modo de propagación sobre los rangos de amplificación HOA, indica una sensibilidad del sistema más alta cuando se

alcanzan niveles de potencia de bombeo posteriores a los 32 dBm del rango de variación Raman y donde es más evidente la sobreamplificación y presencia del fenómeno no lineal (Figura 3.22(a)).

Aunque más complejo observar la Auto Modulación de Fase a través del diagrama de ojo, es posible analizar su posible presencia dado el desplazamiento que se presenta entre las señales de transmisión y recepción (Figura 3.22 (b)). Dicho fenómeno puede ser calculado dado el desfase máximo que puede generar, el cual, para este caso, es de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso y cuyo valor calculado (ver Anexo F) es coherente a lo observado gráficamente ( $\varphi_{MAX} = 0.025$ ), evidenciando que además del análisis del efecto SPM observado a través de los diagramas espectrales, es posible determinar dicho efecto por medio del análisis del diagrama de ojo.

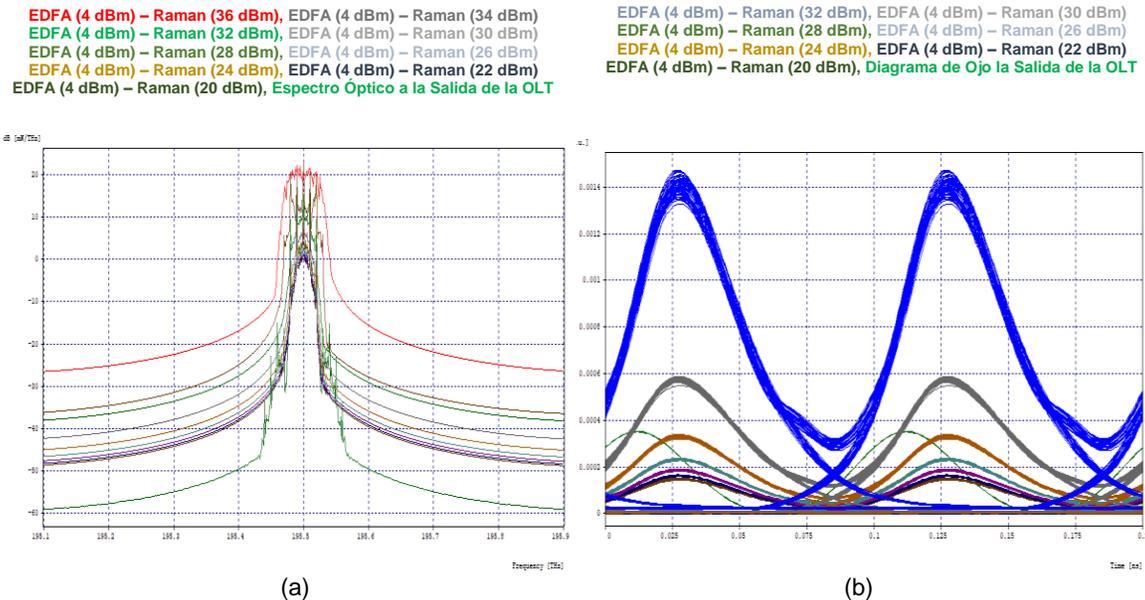


Figura 3.22. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejores Casos. Fuente de bombeo EDFA bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Los resultados obtenidos para la amplificación híbrida HOA modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, muestran un comportamiento relativamente estable respecto a las variaciones en los rangos de potencia de bombeo compuestos, donde se obtienen parámetros de monitoreo ópticos superiores a los mínimos establecidos por la ITU-T. No obstante, las composiciones altas de potencia EDFA y Raman donde se obtuvieron Factores Q y BER altos, pueden ser reemplazadas por combinaciones de potencia más bajas

como las mostradas en la tabla 3.13, obteniendo el mismo rendimiento con menor consumo de potencia, que a largo plazo hace una gran diferencia en el funcionamiento de la red óptica. La tabla 3.15, consigna los valores donde el sistema óptico con amplificación modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, tiene un comportamiento óptimo para la amplificación óptica híbrida analizada.

Penalizaciones de Potencia para HOA Bidireccional						
Configuración	Longitud de Onda EDFA Bidireccional [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster (EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado).	1480	1420	[0-10]	[20-32]	[0-6]	[20-30]

Tabla 3.15. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

La tabla 3.16 consigna la región de operación ideal del modo Booster en los tipos de bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, donde se obtuvieron resultados superiores a los mínimos establecidos de OPM.

Penalizaciones de Potencia para HOA en EDFA-Raman.						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster Co-Propagado	1480	1420	[2-8]	[20-32]	[2-6]	[20-30]
Booster Contra-Propagado	1480	1420	[2-10]	[20-32]	[2-8]	[20-30]
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[0-10]	[20-32]	[0-6]	[20-30]

Tabla 3.16. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, en bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

Los resultados anteriores determinaron que los modos más adecuados para una amplificación EDFA-Raman en un enlace óptico de 80 km son: i) Modo Booster Co-Propagado y ii) Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, dadas las longitudes de onda, parámetros de monitoreo óptico y niveles de sensibilidad en recepción obtenidos a nivel de simulación. De este

modo, se reconfiguró la longitud del enlace analizado, con el fin de establecer la distancia máxima a la cual se puede acceder bajo la implementación de estos modos de amplificación, determinando que el segundo puede extender hasta una longitud de 180 km la red XGS-PON para las composiciones de potencia de bombeo EDFA de 4 dBm y Raman en el rango 20-36 dBm, siendo la variación Raman igual a 30 dBm la que alcanza parámetros de monitoreo óptico de 33.93 dB en Factor Q y BER de  $1 \times 10^{-40}$ .

Si bien esta configuración implica un alto consumo de potencia, se debe tener en cuenta la longitud alcanzada sobre la red XGS-PON sin dispositivos amplificadores intermedios e implementando una modulación RZ-OOK, la cual no es una modulación utilizada para sistemas ópticos de alta velocidad y largo alcance, debido a la robustez que esta presenta frente a modulaciones de tipo multinivel como DQPSK (*Differential Quadrature Phase Shift Keying*) [68], que es una modulación mucho más robusta para la implementación en enlaces superiores a 150 km, ocupa menor ancho de banda y aprovecha de manera más eficiente el espectro óptico. La figura 3.23, muestra el diagrama de ojo y espectral en transmisión y recepción para la extensión de la red XGS-PON analizada.

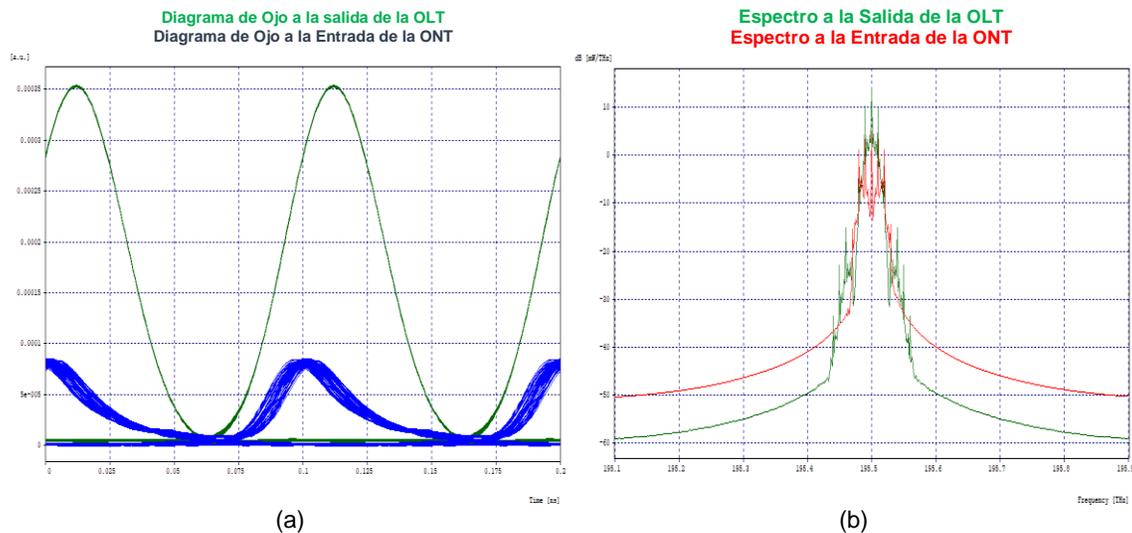


Figura 3.23. Diagramas en Transmisión y Recepción Enlace a 180 km (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Se puede observar que el diagrama de ojo en recepción de la figura 3.23(a), llega con menor potencia respecto a la señal de entrada y desfase entre las señales; sin embargo, la señal puede ser recuperada dados los resultados OPM obtenidos. En la figura 3.23 (b) se observa pérdida de energía en el espectro óptico en recepción y presencia del fenómeno no lineal SPM, dado el

ensanchamiento que presenta respecto a la forma espectral en transmisión; no obstante, este efecto no establece efectos significativos que degraden el sistema óptico XGS-PON. Además, no se observa la presencia de otros fenómenos no lineales como FWM o XPM, debido a que su presencia es observable en sistemas de más de una longitud de onda y no sobre redes puras como la estudiada en este escenario.

La caracterización de la amplificación híbrida EDFA-Raman en serie o cascada para los casos de estudio Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional sobre los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, presentó parámetros de funcionamiento elevados tanto para enlaces de 80 km a nivel de Factor de Calidad, además de valores mínimos en la transferencia de bits erróneos, pese a la presencia de efectos no lineales como SPM que no generan degradación en el sistema óptico amplificado. Los análisis de rendimiento para el modo de amplificación En-Línea en los tres casos, arrojaron resultados donde el Factor Q y BER no alcanzaron los parámetros de monitoreo óptico mínimos recomendados por la ITU-T, debido a fallos en el software de simulación y de sistema operativo, que no permitieron el completo análisis del caso de estudio. Finalmente, se pudo establecer que los mejores parámetros de rendimiento determinados para la red fueron el modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, donde es posible extender la longitud de la red XGS-PON con una amplificación serial hasta un máximo de 180 km con parámetros de monitoreo superiores a los requeridos sobre la red óptica.

### **3.2. AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA EN PARALELO**

La amplificación en paralelo sobre una red óptica XGS-PON, tiene como objetivo analizar el comportamiento de los amplificadores EDFA y Raman cuando se implementa un arreglo HOA en paralelo de estos dispositivos (Figura 3.24) y la relación que pueda existir entre este tipo de amplificación óptica y las penalidades de potencia a través del enlace, el aumento de la distancia y el comportamiento que se recoge a través de los parámetros de monitoreo óptico sobre la red.

Al igual que el esquema de red XGS-PON de la figura 3.1, este posee un módulo de transmisión igual al descrito en apartados anteriores de esta investigación, bajo los mismos parámetros de configuración empleados en el anterior escenario.

Manteniendo una estructura similar a la anterior sobre la ODN, se incorpora un divisor y un combinador de señales que realizan la conexión en paralelo de los

dispositivos amplificadores EDFA-Raman, además de agregar un amplificador de potencia fija, con el fin de dar una aproximación más fiel a las implementaciones actuales de redes, ya que los Racks ópticos comerciales poseen este tipo de terminales que ayudan a mejorar el sistema en transmisión como en recepción.

Finalmente, en la ONT se encuentran las mismas condiciones de recepción para el sistema óptico especificado, donde se establecen aproximaciones a los tipos de implementación FTTH basadas en redes GPON.

La red óptica con amplificación en paralelo se puede observar en la figura 3.24, donde se analizarán los tipos de bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional para los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, descartando el modo de amplificación En-Línea, debido a la sobreamplificación que este presenta en un enlace de 80 km y las dificultades que presenta a nivel de simulación y sistema operativo.

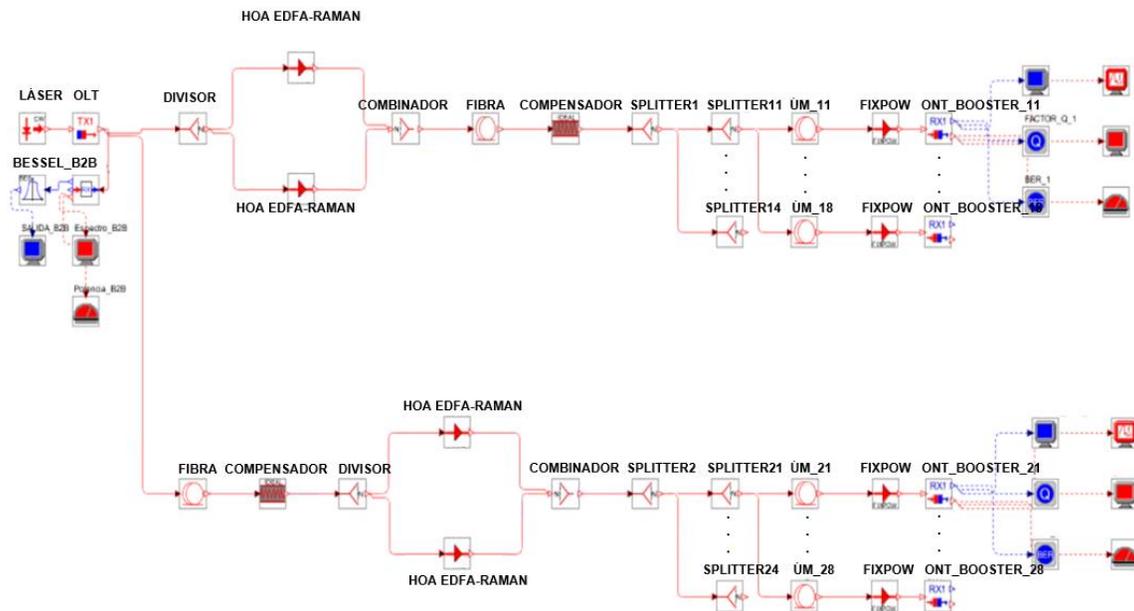


Figura 3.24. Escenario de Simulación, amplificación en Paralelo EDFA-Raman a 10 Gbps.

Parámetros de configuración amplificación en paralelo EDFA-Raman, bombeo Co-Propagado						
Modo de Amplificación	Tipo de Bombeo	Distancia [km]	Potencia de Bombeo EDFA [dBm]	Potencia de Bombeo Raman [dBm]	Longitud de Onda de Bombeo EDFA [nm]	Longitud de Onda de Bombeo Raman [nm]
Booster	Co-Propagado	80	0-10	20-36	1480	1420
	Contra-Propagado					
	Bidireccional					
Pre-	Co-Propagado	80	0-10	20-36	1480	1420

Amplificado	Contra-Propagado					
	Bidireccional					

Tabla 3.17. Parámetros para una red XGS-PON con amplificación paralela HOA EDFA-Raman.

El análisis de este tipo de amplificación toma como punto de partida las métricas fundamentales extraídas del trabajo de Marulanda y Pungo [36] y consignadas en el Anexo E, así como los resultados obtenidos en el escenario anteriormente analizado, con el fin de determinar la pertinencia de la implementación de este arreglo sobre una red XGS-PON de longitud 80 km y el análisis de las penalidades de potencia que se puedan presentar.

**3.2.1. Caso 1. Amplificación en Paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado.** El esquema de red mostrado en la figura 3.24, analiza la amplificación óptica paralela EDFA-Raman en modo Booster y Pre-Amplificado, cuyas configuraciones se realizan respecto a los resultados obtenidos en el escenario anterior y mostrado en la tabla 3.17.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDF A [dB m]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dB m]	EDF A [dB m]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dB m]	EDF A [dB m]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dB m]
0	20	11,705	6,03 E-05	-29,4	2	20	34,138	1,00 E-40	-16,7	4	20	38,044	1,00 E-40	-12,2
	22	12,271	2,59 E-05	-29,0		22	34,861	1,00 E-40	-16,3		22	38,035	1,00 E-40	-11,8
	24	15,009	1,86 E-08	-28,4		24	35,008	1,00 E-40	-15,7		24	38,099	1,00 E-40	-11,2
	26	15,231	3,84 E-09	-27,4		26	36,459	1,00 E-40	-14,7		26	38,027	1,00 E-40	-10,2
	28	19,400	2,53 E-20	-25,9		28	36,496	1,00 E-40	-13,2		28	37,234	1,00 E-40	-8,74
	30	22,990	1,00 E-40	-23,4		30	37,418	1,00 E-40	-10,7		30	34,917	1,00 E-40	-6,31
	32	28,543	1,00 E-40	-19,6		32	35,809	1,00 E-40	-6,91		32	29,504	1,00 E-40	-2,48
	34	32,724	1,00 E-40	-13,4		34	28,169	1,00 E-40	-0,85		34	21,344	3,25 E-30	3,25
	36	29,768	1,00 E-40	-3,82		36	7,4491	8,30 E-03	7,60		36	6,0206	2,28 E-02	9,40
6	20	37,118	1,00 E-40	-9,14	8	20	35,554	1,00 E-40	-6,56	10	20	31,987	1,00 E-40	-4,24
	22	37,102	1,00 E-40	-8,75		22	35,280	1,00 E-40	-6,17		22	31,458	1,00 E-40	-3,86
	24	36,540	1,00 E-40	-8,14		24	34,316	1,00 E-40	-5,56		24	30,660	1,00 E-40	-3,25
	26	35,710	1,00 E-40	-7,18		26	32,652	1,00 E-40	-4,61		26	29,340	1,00 E-40	-2,30
	28	33,974	1,00 E-40	-5,65		28	30,424	1,00 E-40	-3,09		28	27,635	1,00 E-40	-0,81
	30	30,481	1,00 E-40	-3,24		30	27,507	1,00 E-40	-0,71		30	26,464	1,00 E-40	1,47
	32	26,544	1,00 E-40	0,51		32	23,203	1,00 E-40	2,83		32	14,552	3,83 E-08	4,60
	34	10,691	1,87 E-04	5,68		34	7,3902	8,44 E-03	7,56		34	6,0206	2,28 E-02	8,43
	36	6,0206	2,28 E-02	11,6		36	6,0206	2,28 E-02	13,0		36	6,0206	2,28 E-02	13,6

Tabla 3.18. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Booster Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDF A [dBm]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDF A [dBm]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDF A [dBm]	RAMA N [dBm]	FACTO R Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28 E-02	-36,3	2	20	27,363	1,00 E-40	-6,46	4	20	27,396	1,00 E-40	0,18
	22	6,0206	2,28 E-02	-35,9		22	27,310	1,00 E-40	-6,07		22	27,371	1,00 E-40	0,56
	24	6,0206	2,28 E-02	-35,2		24	27,346	1,00 E-40	-5,46		24	27,340	1,00 E-40	1,17
	26	6,0206	2,28 E-02	-34,3		26	27,292	1,00 E-40	-4,49		26	27,398	1,00 E-40	2,14
	28	6,0206	2,28 E-02	-32,7		28	27,363	1,00 E-40	-2,95		28	27,312	1,00 E-40	3,68
	30	6,5882	1,64 E-02	-30,2		30	27,629	1,00 E-40	-0,51		30	27,423	1,00 E-40	6,11
	32	9,9490	8,55 E-04	-26,4		32	27,443	1,00 E-40	3,34		32	27,348	1,00 E-40	9,97
	34	13,482	1,50 E-06	-20,2		34	27,486	1,00 E-40	9,46		34	6,0206	2,28 E-02	-9,33
	36	14,824	1,33 E-08	-10,4		36	6,0206	2,28 E-02	-5,84		36	18,941	2,16 E-18	24,7
6	20	27,637	1,00 E-40	3,84	8	20	6,0206	2,28 E-02	-18,9	10	20	27,427	1,00 E-40	9,14
	22	27,656	1,00 E-40	4,22		22	6,0206	2,28 E-02	-18,5		22	27,440	1,00 E-40	9,52
	24	27,661	1,00 E-40	4,83		24	6,0206	2,28 E-02	-17,9		24	27,394	1,00 E-40	10,1
	26	27,633	1,00 E-40	5,80		26	26,364	1,00 E-40	8,64		26	6,0206	2,28 E-02	-14,5
	28	27,653	1,00 E-40	7,34		28	6,0206	2,28 E-02	-15,4		28	27,365	1,00 E-40	12,6
	30	27,626	1,00 E-40	9,77		30	6,0206	2,28 E-02	-12,9		30	6,0206	2,28 E-02	-10,5
	32	27,787 7	1,00 E-40	13,6		32	6,0206	2,28 E-02	-9,10		32	27,531	1,00 E-40	18,8
	34	28,117	1,00 E-40	19,6		34	26,581	1,00 E-40	22,3		34	25,660	1,00 E-40	24,3
	36	6,0206	2,28 E-02	6,61		36	7,2667	1,24 E-02	25,8		36	6,0206	2,28 E-02	14,7

Tabla 3.19. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Pre-Amplificado Co-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Los resultados obtenidos en la amplificación EDFA-Raman paralela modo Booster Co-Propagado de la tabla 3.18 y figura 3.25(a), muestran un comportamiento similar al de la amplificación en cascada respecto a las composiciones cuando EDFA en 0 dBm y Raman en el rango de 20-26 dBm no alcanzan los mínimos OPM requeridos. Se observa que, para todo el rango de potencia de bombeo, EDFA y Raman 34-36 dBm continúan mostrando el comportamiento donde se presentan caídas del factor de calidad y BER por efecto de sobreamplificación del sistema. No obstante, tanto el modo de amplificación como el tipo de bombeo continúan mostrando resultados OPM óptimos en rangos EDFA y Raman bajos, generando un ahorro energético para el sistema, que puede derivar en el uso de la red óptica a largo plazo.

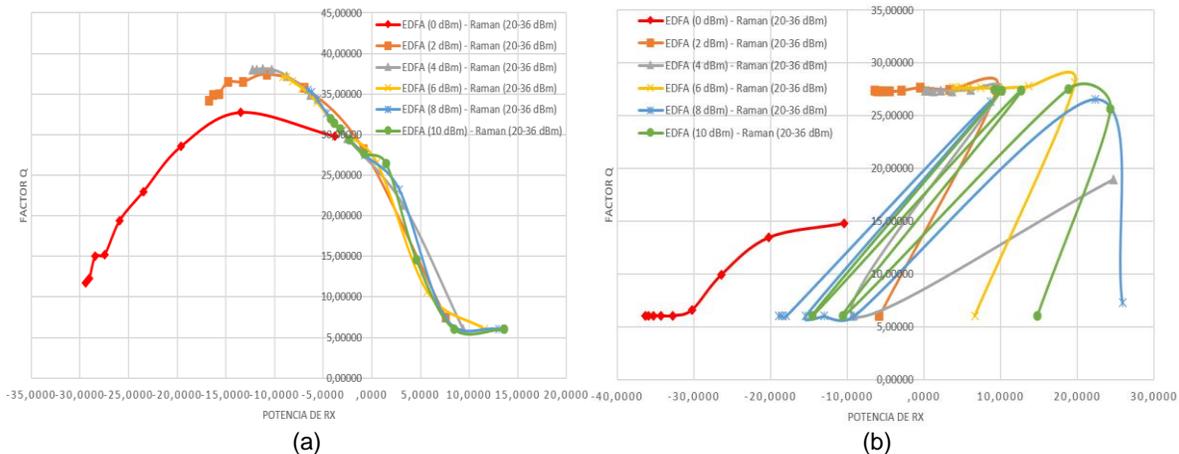


Figura 3.25. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Co-Propagado EDFA-Raman en Paralelo, para 1 canal a 10 Gbps.

Contrario a los resultados obtenidos en el modo Pre-Amplificado en cascada, los resultados OPM obtenidos para el modo en paralelo (Tabla 3.19) y mostrados en la figura 3.25 (b), muestran un comportamiento donde solo se encuentra un sistema estable en el rango EDFA 2-6 dBm y Raman de 20-32 dBm, aunque con caídas OPM cuando se alcanzan las variaciones más altas de potencia de bombeo Raman (34-36 dBm). Se puede observar que en las variaciones EDFA de 4, 8 y 10 dBm, se generan cambios instantáneos de potencia entre variaciones Raman que llevan al sistema desde no obtener resultados funcionales para una transmisión adecuada sobre la red, a instantáneamente superar los OPM requeridos ( $BER$  de  $1 \times 10^{-40}$ ) entre variaciones de bombeo, lo cual determina que, además de ser mucho más sensible que el sistema en cascada estudiado en el primer escenario, puede presentar fenómenos no lineales que generen este comportamiento. También puede observarse dicho comportamiento de BER vs  $P_{RX}$  en las gráficas de la figura 3.26, cuyos resultados son inversamente proporcionales a los obtenidos.

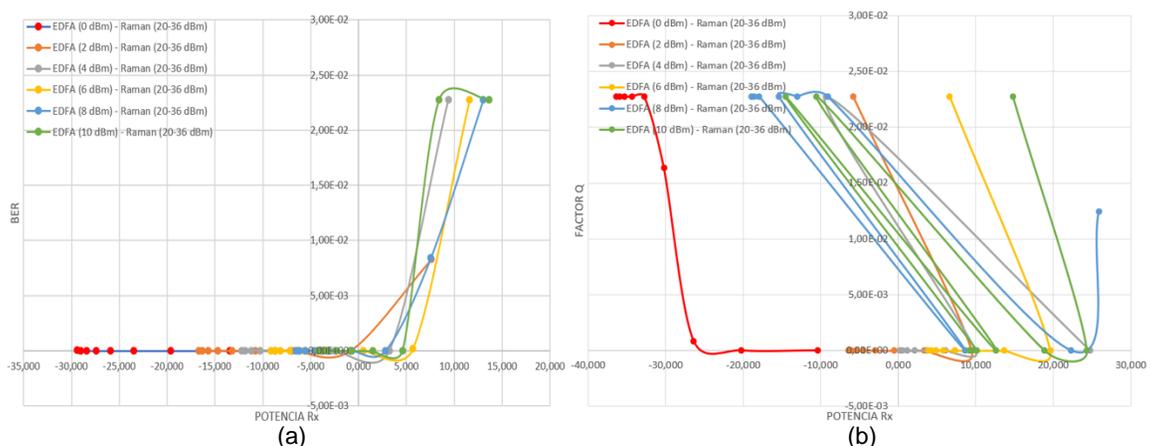


Figura 3.26. BER vs. Potencia de Recepción (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman Paralelo de 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas de ojo mostrados en la figura 3.27, muestran la respuesta de los modos Booster y Pre-Amplificado en transmisión y recepción para una disposición HOA en paralelo.

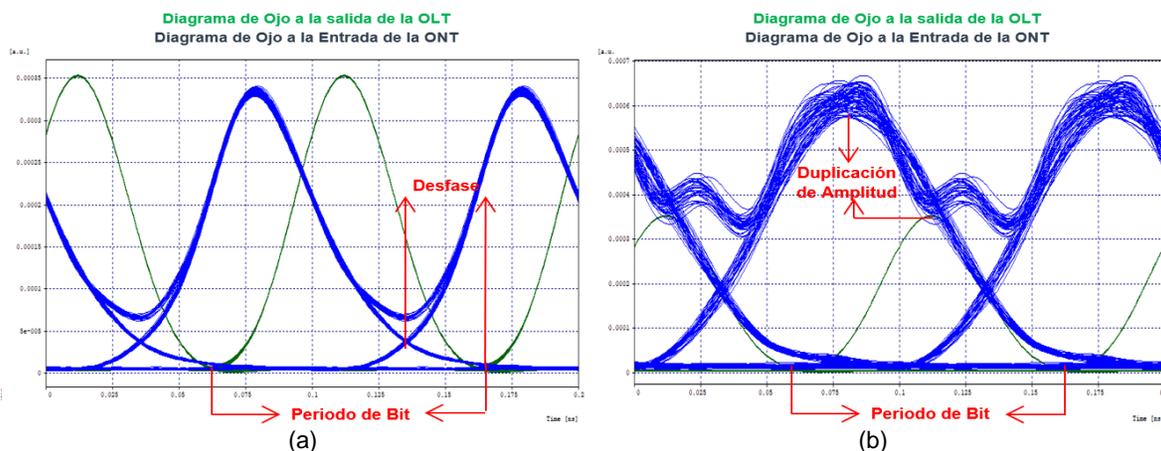


Figura 3.27. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

El modo Booster de la figura 3.27(a), presenta un retraso del 25% entre señales que, si bien puede representar pérdida de información y presencia de fenómenos no lineales en el sistema óptico, presenta un alto nivel de calidad y un mínimo de errores transmitidos, como se consigna en la tabla 3.22. El modo Pre-Amplificado de la figura 3.27 (b), presenta una duplicación en la amplitud de la señal, sin embargo, al igual que en Booster, presenta un atraso de la señal en recepción, fenómeno que al ser analizado a través del diagrama de ojo, evidencia la presencia de fenómenos no lineales sobre el sistema óptico.

Cabe mencionar que el resultado gráfico presentado en la figura 3.27(b), refleja el funcionamiento del modo Pre-Amplificado, que informó de un sistema más estable dado el comportamiento observado en las figuras 3.25(b) y 3.26(b), así como en la tabla 3.19.

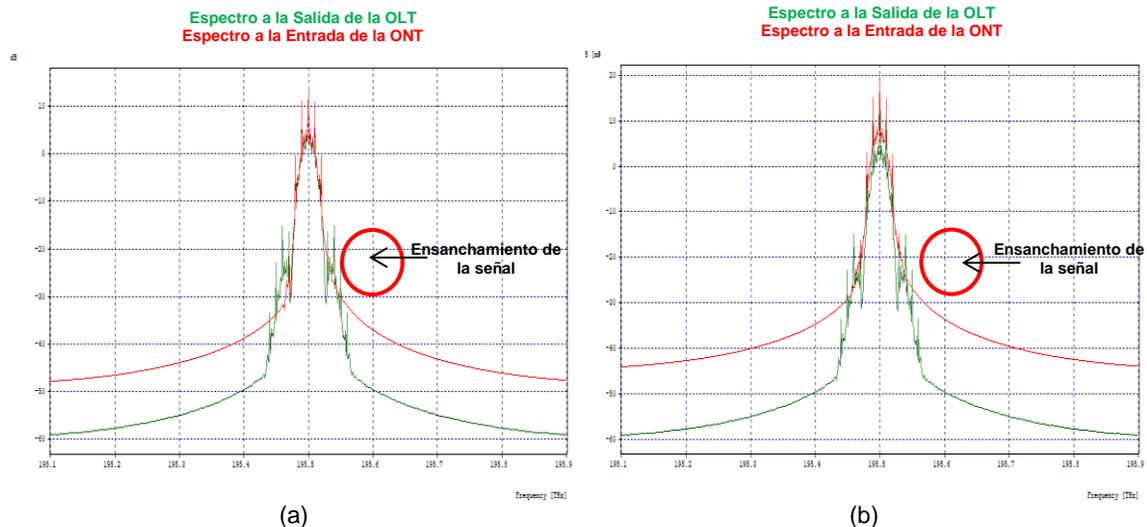


Figura 3.28. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

La Figura 3.28, presenta los diagramas espectrales del modo de amplificación Booster y Pre-Amplificado respectivamente. En los diagramas de ojo de estos mismos modos de amplificación, se observó una diferencia de fase entre señales de transmisión y recepción, implicando la presencia del fenómeno no lineal SPM sobre el sistema amplificado, el cual puede ser observado espectralmente mediante el ensanchamiento presentado tanto en el modo Booster como Pre-Amplificado.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Co-Propagado.** Como ya se mencionó, la presencia del fenómeno no lineal SPM puede ser observado dada la diferencia de fase que se pueda presentar entre señales ópticas y analizado tanto mediante el diagrama de ojo, como a través de los diagramas espectrales cuando se presenta ensanchamiento en el espectro de recepción. El fenómeno SPM en los modos Booster y Pre-Amplificado es analizado respecto a las longitudes de onda de bombeo determinadas por medio de simulación obtenidas para EDFA igual a 1480 nm y Raman igual a 1420 nm. Se puede observar en los diagramas espectrales del modo Booster de la figura 3.37(a), el cual corresponde a una de las mejores composiciones de potencia EDFA-Raman, que SPM hace presencia en todo el rango seleccionado, siendo más evidente la presencia de este fenómeno cuando se alcanza el intervalo de potencia Raman entre 32-36 dBm.

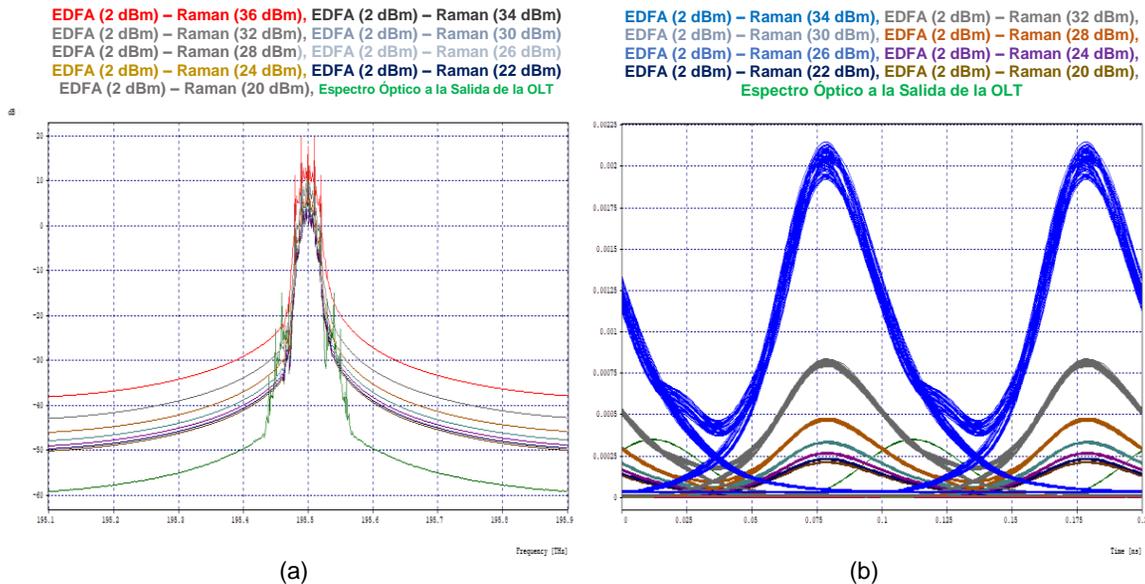


Figura 3.29. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

El fenómeno no lineal de Auto Modulación de Fase también puede ser analizado a través de los diagramas de la Figura 3.29 (b), donde se presenta desfase entre los diagramas resultantes de entrada y salida, el cual es fácilmente observado en estos resultados gráficos. El desfase entre señales calculado por medio de la base teórica presentado en el Anexo F para el sistema amplificado, determinó un desfase máximo de  $\varphi_{MAX} = 0.025$  correspondiente a  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso de la señal, lo cual determina que, además del análisis del efecto SPM observado a través de los diagramas espectrales, también es posible observar y calcular dicho efecto por medio del análisis del diagrama de ojo. No obstante, dados los resultados obtenidos para este modo de amplificación, este fenómeno no lineal no genera una degradación en el sistema óptico. Es de anotar que el diagrama de ojo para la composición EDFA igual a 2 dBm y Raman igual a 36 dBm, no es incluido dentro de la gráfica debido al alto nivel de potencia que presentó, sobreamplificando el sistema, cuya gráfica no permite la observación de las resultantes de las variaciones.

Al igual que con el Booster, el análisis SPM sobre el modo de amplificación Pre-Amplificado se realizó para longitudes de onda de bombeo EDFA de 1480 nm y Raman de 1420 nm, encontrando que fue uno de los mejores rangos de funcionamiento, donde el modo amplificado presentó mejores resultados OPM. La figura 3.38(a), muestra que para potencias de bombeo Raman de 20-30 dBm el espectro es similar en forma y cantidad de energía, mientras que para el intervalo

de 32-36 dBm se observa deformación y ensanchamiento de la forma espectral inicialmente obtenida. Si bien se pueden observar niveles de potencia y energía similares en el rango Raman de 20-30 dBm, también es observable el ensanchamiento de las gráficas espectrales en estos intervalos, así como en los intervalos superiores, donde es más notoria la presencia de SPM que genera dicho fenómeno en los espectros de recepción con respecto al transmitido.

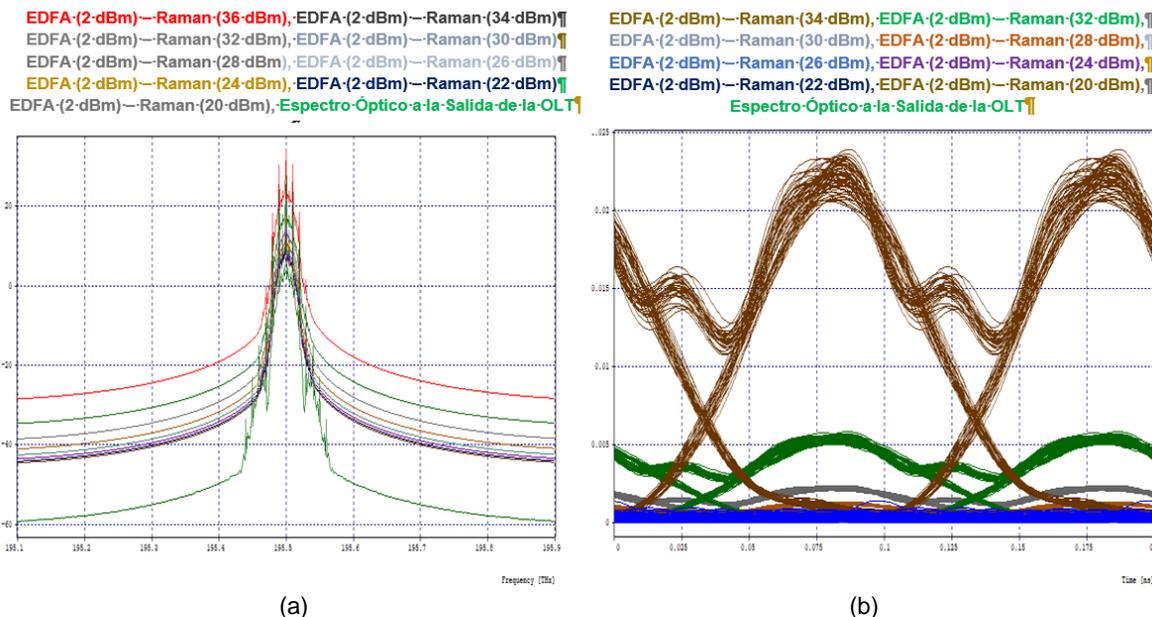


Figura 3.30. Presencia fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas de ojo de la figura 3.30 (b), para la misma composición de potencia donde se obtuvo uno de los mejores rendimientos sobre el sistema amplificado, presentan el mismo tipo de desfase en todo el rango de variación entre las gráficas de entrada y salida, corroborando de este modo la presencia del fenómeno no lineal SPM observado en los diagramas espectrales ya analizados. Aunque en los diagramas de ojo se observa degradación en la señal transmitida en todo el rango de amplificación, los resultados OPM para este caso se encuentran por encima de los mínimos establecidos, teniendo una mejor respuesta a la esperada en recepción. De igual forma que en el modo Booster, el diagrama de ojo para la composición EDFA igual a 2 dBm y Raman igual a 36 dBm, no es incluido, dado el alto nivel de potencia que presentó, sobreamplificando el sistema y cuya imagen no permite la observación de las resultantes de las variaciones en esta gráfica mostradas.

Finalmente, el análisis del fenómeno no lineal SPM para el modo de amplificación En-Línea Co-Propagado, no es incluido debido a la sobreamplificación y fallas a nivel software que generó su implementación sobre la red XGS-PON en un enlace de 80 km.

La tabla 3.20 para la amplificación paralela EDFA-Raman con bombeo Co-Propagado, establece las regiones de operación del sistema donde se presenta el mejor rendimiento en la amplificación para los modos Booster y Pre-Amplificado analizados, siendo nuevamente las longitudes de onda de bombeo EDFA igual a 1480 nm y Raman igual a 1420 nm, las que entregaron los mejores resultados OPM sobre el sistema óptico amplificado. Los resultados obtenidos para el modo En-Línea no son incluidos dentro de la tabla, dados los inconvenientes presentados a nivel de simulación, además de sobreamplificar el sistema óptico dada la configuración de este modo en un enlace óptico de 80 km.

Penalizaciones de Potencia para HOA en Co-Propagación						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster	1480	1420	[0-10]	[20-34]	[2-10]	[20-32]
Pre-Amplificado	1480	1420	[2-6]	[20-32]	[2-6]	[20-32]

Tabla 3.20. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster y Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

**3.2.2. Caso 2. Amplificación en paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps en Contra-Propagación.** A continuación, se analiza la red XGS-PON, con amplificación paralela en los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, empleando un bombeo Contra-Propagado bajo los parámetros de configuración ya determinados y variando, al igual que en el primer caso de estudio, las potencias de bombeo ( $P_B$ ) de los amplificadores EDFA y Raman determinados como óptimos.

Modo Booster, Bombeo Contra-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,04892	2,45E-02	-31,239	2	20	25,42980	1,00E-40	-18,060	4	20	27,51041	1,00E-40	-15,739
	22	6,72212	1,66E-02	-30,857		22	25,13908	1,00E-40	-17,674		22	27,75882	1,00E-40	-15,352
	24	8,95200	2,86E-03	-30,246		24	25,49898	1,00E-40	-17,055		24	27,67362	1,00E-40	-14,745
	26	9,03885	2,46E-03	-29,273		26	25,75669	1,00E-40	-16,084		26	27,81790	1,00E-40	-13,785
	28	11,30258	1,14E-04	-27,737		28	25,85045	1,00E-40	-14,551		28	28,29225	1,00E-40	-12,239
	30	12,56845	1,14E-05	-25,284		30	26,18031	1,00E-40	-12,118		30	28,12078	1,00E-40	-9,813
	32	14,22106	1,67E-07	-21,417		32	26,16682	1,00E-40	-8,271		32	27,45999	1,00E-40	-5,968
	34	14,51227	4,07E-08	-15,294		34	25,01067	1,00E-40	-2,225		34	24,16229	1,00E-40	-0,015
	36	14,18923	1,13E-07	-5,849	36	10,41548	6,16E-04	6,098	36	6,38276	2,09E-02	7,790		
6	20	30,51056	1,00E-40	-12,856	8	20	33,80443	1,00E-40	-10,462	10	20	34,38677	1,00E-40	-8,375
	22	30,77335	1,00E-40	-12,465		22	33,63869	1,00E-40	-10,082		22	34,28849	1,00E-40	-7,990
	24	30,61860	1,00E-40	-11,858		24	33,82862	1,00E-40	-9,467		24	33,73345	1,00E-40	-7,382
	26	30,86881	1,00E-40	-10,892		26	33,40058	1,00E-40	-8,501		26	33,23112	1,00E-40	-6,413
	28	30,69746	1,00E-40	-9,358		28	33,03432	1,00E-40	-6,970		28	31,66689	1,00E-40	-4,891
	30	29,98330	1,00E-40	-6,929		30	30,98959	1,00E-40	-4,554		30	28,98969	1,00E-40	-2,484
	32	27,75637	1,00E-40	-3,108		32	27,08055	1,00E-40	-0,767		32	26,31088	1,00E-40	1,213
	34	23,12465	1,00E-40	2,640		34	15,03477	1,37E-08	4,563		34	9,85568	1,01E-03	6,217
	36	6,02060	2,28E-02	9,017	36	6,02060	2,28E-02	9,789	36	6,02060	2,28E-02	10,955		

Tabla 3.21. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Booster Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Contra-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,04892	2,45E-02	-31,239	2	20	15,88661	4,36E-10	-6,840	4	20	17,96243	4,38E-15	-1,613
	22	6,72212	1,66E-02	-30,857		22	18,46835	2,45E-17	-6,533		22	18,24488	1,59E-16	-1,465
	24	8,95200	2,86E-03	-30,246		24	17,69114	7,06E-14	-6,233		24	19,86317	2,71E-22	-1,195
	26	9,03885	2,46E-03	-29,273		26	17,61910	1,14E-14	-5,656		26	20,83670	1,72E-27	-0,769
	28	11,30258	1,14E-04	-27,737		28	19,58365	1,07E-20	-4,875		28	21,30037	2,69E-31	-0,176
	30	12,56845	1,14E-05	-25,284		30	20,94018	3,95E-29	-3,758		30	23,53919	1,00E-40	0,833
	32	14,22106	1,67E-07	-21,417		32	13,45424	9,65E-07	-14,067		32	17,47845	1,15E-13	-9,756
	34	14,51227	4,07E-08	-15,294		34	22,35075	1,14E-39	-7,652		34	24,54139	1,00E-40	-5,983
	36	14,18923	1,13E-07	-5,849	36	26,30877	1,00E-40	-1,877	36	26,59938	1,00E-40	-0,129		
6	20	18,75474	8,93E-18	1,139	8	20	18,88616	8,57E-18	3,580	10	20	19,73403	2,21E-22	5,747
	22	19,67989	6,58E-21	1,362		22	18,61214	5,19E-17	3,684		22	19,16882	1,02E-19	5,875
	24	19,99857	7,83E-23	1,643		24	19,98172	4,08E-23	3,937		24	21,59090	4,60E-33	6,103
	26	21,31936	3,20E-31	2,012		26	20,79559	7,34E-27	4,312		26	22,43863	3,01E-40	6,530
	28	21,83651	5,56E-34	2,709		28	22,73655	1,00E-40	4,997		28	23,34673	1,00E-40	7,151
	30	23,17999	1,00E-40	3,506		30	23,81835	1,00E-40	5,817		30	23,13990	1,00E-40	7,990
	32	26,16304	1,00E-40	4,753		32	24,96771	1,00E-40	7,036		32	25,92073	1,00E-40	9,165
	34	25,17551	1,00E-40	-3,262		34	26,25174	1,00E-40	-0,967		34	27,13830	1,00E-40	1,077
	36	26,47377	1,00E-40	1,720	36	26,72863	1,00E-40	3,441	36	26,62996	1,00E-40	4,043		

Tabla 3.22. Parámetros de monitoreo óptico para 195.5 Thz, Amplificación Paralela Pre-Amplificado Contra-Propagado EDFA-Raman, de 1 canal de 10 Gbps.

La relación Factor Q vs  $P_{Rx}$  para los modos Booster y Pre-Amplificado con bombeo Contra-Propagado, fueron inicialmente analizados para el bombeo de potencia EDFA igual a 0 dBm y Raman en el rango de 20-36 dBm, cuyas respuestas a nivel OPM y de  $P_{Rx}$  no alcanzaron los mínimos requeridos para el funcionamiento del sistema óptico, como se puede observar a través de los resultados consignados en las tablas 3.21 y 3.22, así como en las curvas de la figura 3.31.

El modo Booster en la figura 3.31(a), en los rangos de bombeo EDFA de 2-10 dBm y Raman 20-32 dBm, muestra nuevamente resultados estables y superiores a los mínimos OPM y dentro de la sensibilidad de recepción definida. De igual forma, entre el rango Raman de 34-36 dBm, se observa un cambio en las pendientes de las curvas producto del exceso de amplificación, reflejando este comportamiento en el cambio de pendiente de las curvas de amplificación híbrida y la degradación del sistema.

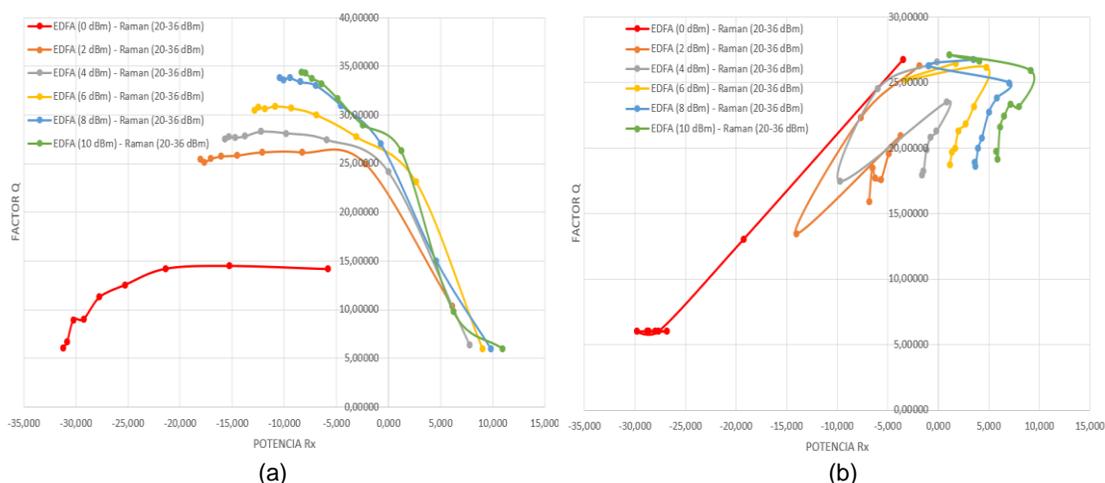


Figura 3.31. Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado EDFA-Raman en Paralelo, para 1 canal a 10 Gbps.

Las curvas del modo Pre-Amplificado en amplificación paralela de la figura 3.31 (b), presentan aumentos y caídas instantáneas entre cada variación de Factor Q y sensibilidad en recepción, manifestando un alto nivel de sensibilidad. Pese a encontrarse variaciones que no alcanzan los mínimos OPM requeridos, se pueden encontrar resultados superiores de Factor de Calidad a 22 dB y BER de  $1 \times 10^{-40}$  en las composiciones de potencia EDFA de 6-10 dBm y Raman de 26-36 dBm, sin embargo, las potencias alcanzadas en estos rangos para un enlace de 80 km son altas, lo cual puede generar la aparición de efectos no lineales como SPM. Es de resaltar que el comportamiento presentado en este modo de amplificación es

similar al visto en el caso 1 del presente escenario, respecto a las caídas de potencia en recepción que se presentan entre las variaciones de potencia Raman más altas y que representan un nivel alto de sensibilidad en este tipo de amplificación.

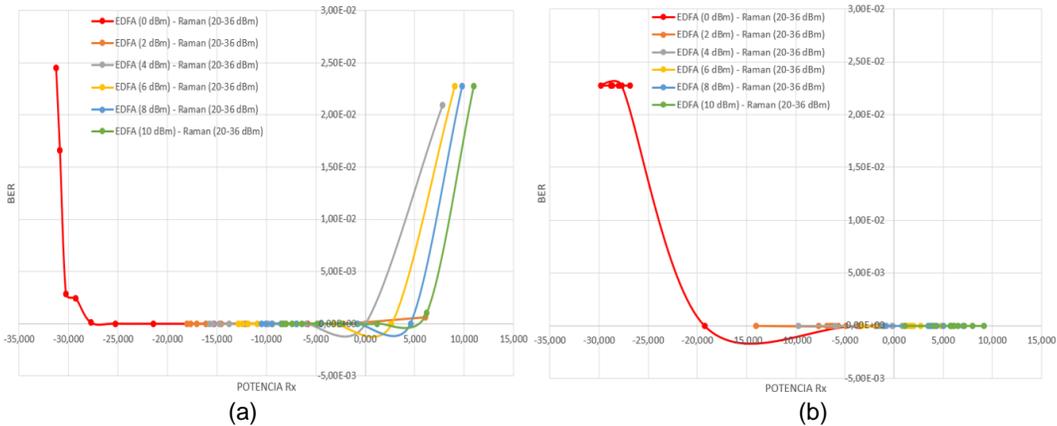
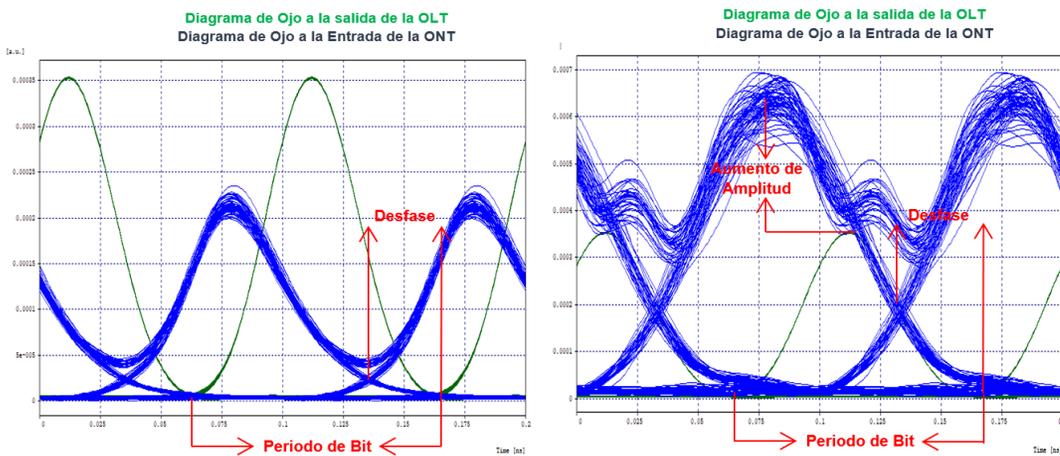


Figura 3.32. (a) BER vs. Potencia de Recepción Booster, (b) BER vs. Potencia de Recepción Pre-Amplificación. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

Finalmente, en la figura 3.32 se observa nuevamente un comportamiento inversamente proporcional al mostrado en la relación de Factor Q vs  $P_{RX}$  ya analizado, con los cambios de pendiente que representan los cambios entre los niveles funcionales de OPM sobre el sistema óptico.

Los diagramas de ojo mostrados en la figura 3.33, muestran la respuesta de los modos Booster y Pre-Amplificado en transmisión y recepción para una disposición HOA en paralelo con bombeo Contra-Propagado.



(a) (b)  
 Figura 3.33. Diagramas de ojo mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Se puede observar en el diagrama de ojo de la figura 3.33(a), que el modo Booster Contra-Propagado tiene un retraso en la señal recibida y una amplitud menor respecto la señal transmitida. Si bien estas características de la señal en recepción pueden determinar pérdida de datos en la comunicación óptica, los resultados de BER y Factor Q vs  $P_{Rx}$  obtenidos, presentan un sistema amplificado que informa de resultados OPM superiores a los mínimos establecidos. El modo Pre-Amplificado de la figura 3.33 (b), contrario al Booster, presenta un aumento en la amplitud respecto a la señal de transmisión para la composición de potencias de bombeo seleccionada, alcanzando los mínimos establecidos para la variación de este caso; aunque el nivel de potencia recibido en la ONT implica una mayor amplitud en la señal en recepción, esta respuesta no es necesariamente la misma para casos presentados anteriormente.

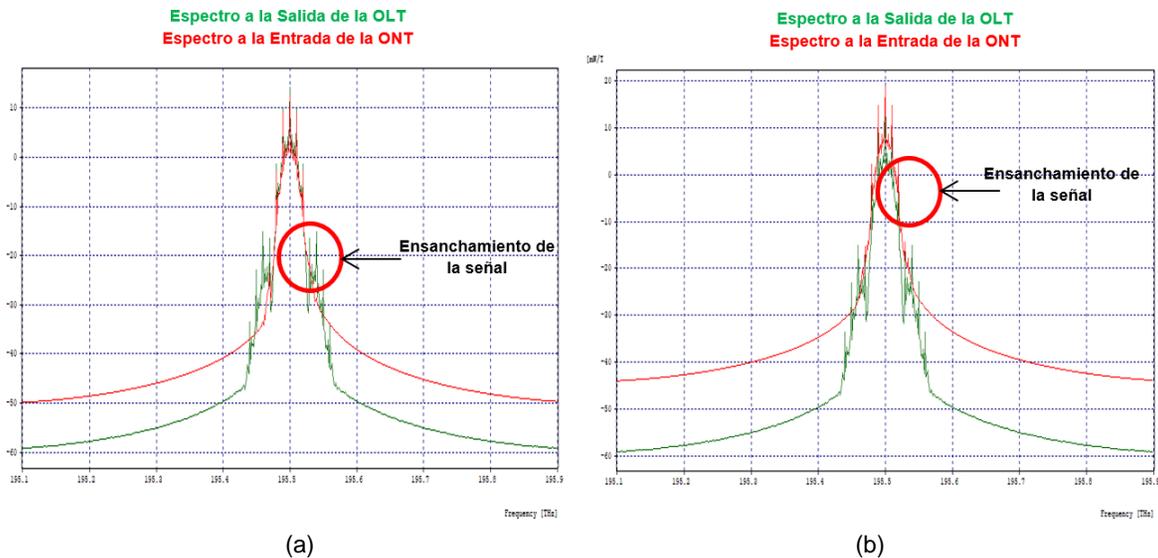


Figura 3.34. Diagramas espectrales mejor caso (a) Modo Booster, (b) Modo Pre-Amplificado. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Los gráficos espectrales para los modos Booster y Pre-Amplificado con bombeo Contra-Propagado de la figura 3.34 continúan presentando ensanchamiento en recepción, siendo más visible la presencia de este fenómeno en el modo Pre-Amplificado, el cual puede determinar la presencia de SPM sobre ambos modos de amplificación.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Contra-Propagado.** Al igual que los casos analizados anteriormente, el fenómeno no lineal de Automodulación

de Fase puede ser detectado inicialmente por la diferencia presentada entre las señales de transmisión y recepción, teniendo en cuenta que dicho desplazamiento también puede ser generado por la presencia de PMD o CD sobre el sistema; sin embargo, puede ser tomado como un indicador de la presencia del fenómeno sobre el sistema amplificado. La figura 3.35(a), muestra los diagramas espectrales para uno de las mejores composiciones de potencia, donde se encontró el mejor comportamiento del sistema para un bombeo EDFA igual a 4 dBm y Raman 20-36 dBm, observando que se presenta ensanchamiento en la respuesta espectral desde las variaciones más bajas de potencia y más evidente cuando se alcanzan potencias Raman en el rango de 32-36 dBm.

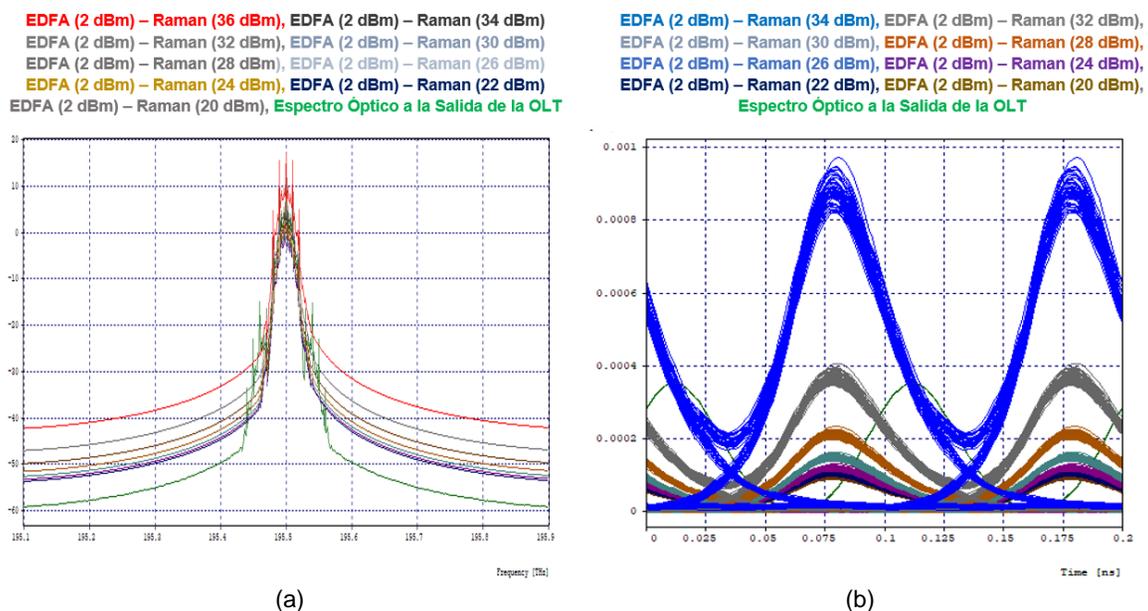


Figura 3.35. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas de ojo de la figura 3.35(b), presentan una diferencia entre las fases de todo el rango de potencia de bombeo determinado anteriormente, como uno de los mejores dada la respuesta OPM respecto a la señal presentada en transmisión, notando un retraso de estas señales de  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso, correspondiente a una diferencia del 25%, análisis que puede determinar que la presencia de SPM además de ser observada por medio de análisis espectral, también puede ser observado a través del diagrama de ojo.

El modo Pre-Amplificado con bombeo Contra-Propagado, presenta en el rango de bombeo EDFA igual a 8 dBm y Raman en el rango de 20-36 dBm, una de las

mejores variantes de funcionamiento del sistema amplificado donde se encontraron BER de  $1 \times 10^{-40}$  y Factor Q entre 22 y 26 dBm cuando se alcanzan variantes de bombeo Raman en el rango 28-36 dBm. Sin embargo, como se observa en la figura 3.36(a), se evidencia la presencia de SPM dado el ensanchamiento espectral presentado en relación con el espectro en transmisión. Aunque para este caso no es fácilmente observable el desfase entre las señales de transmisión y recepción, debido a la alta amplificación que se presenta en el sistema y que no permite la visualización del diagrama de ojo en transmisión, dicho fenómeno continúa presentándose, estableciendo la posible presencia de SPM cuando se alcanzan altos niveles de sensibilidad en el receptor. Además, se pueden notar las mencionadas caídas y aumentos de potencia abruptos entre cada conmutación de potencia Raman, observando las variaciones del bombeo en el rango 32-36 dBm (Diagramas de ojo verde, café y azul).

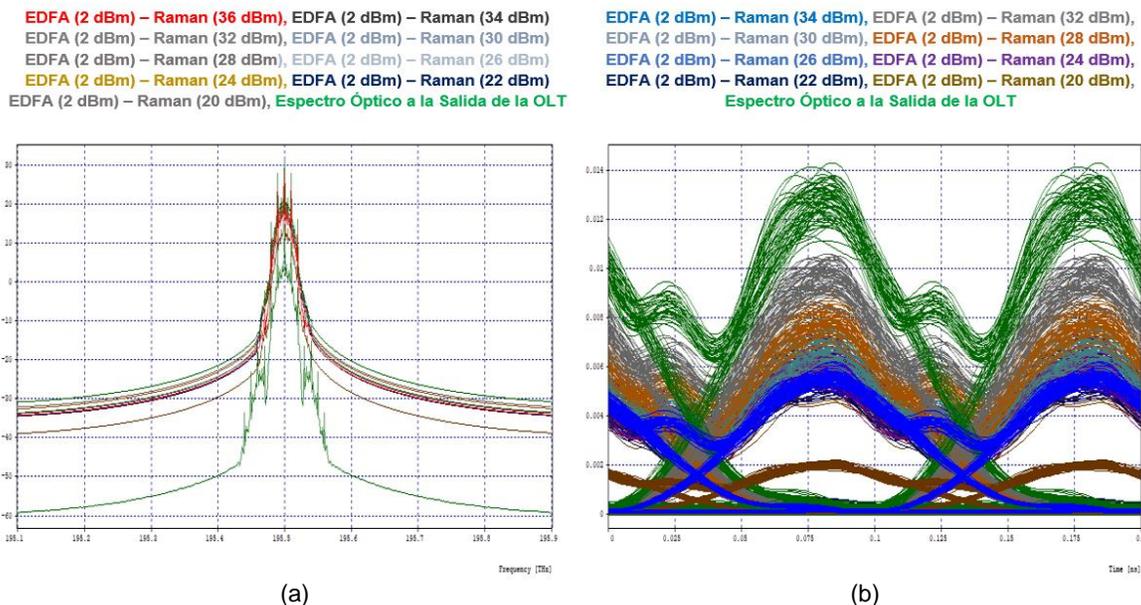


Figura 3.36. Presencia Fenómeno SPM modo Pre-Amplificado (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

El análisis del modo de amplificación En-Línea, así como el respectivo estudio del fenómeno SPM, fue descartado debido a los errores presentados a nivel de simulador y sistema operativo. Sin embargo, pruebas individuales demostraron que este modo de amplificación presenta un alto nivel de saturación de potencia en recepción generado por la sobrecarga de dispositivos HOA sobre el enlace óptico de 80 km, presentando caídas en el factor de calidad y aumentando la cantidad de bits erróneos transmitidos en el enlace de comunicación. La tabla 3.23, establece las regiones de operación del sistema óptico en los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado con bombeo Contra-Propagado, donde se

presenta el mejor rendimiento a nivel OPM para las ampliaciones analizadas, estableciendo de nuevo que para los amplificadores EDFA y Raman, las longitudes de onda de bombeo más adecuadas fueron 1480 nm y 1420 nm respectivamente.

Penalizaciones de Potencia para HOA en Contra-Propagación						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster	1480	1420	[2-10]	[20-34]	[2-10]	[20-32]
Pre-Amplificado	1480	1420	[2-10]	[26-32]	[2] [4] [6] [8] [10]	[34-36] [28-30], [34-36] [26-36] [28-36] [24-36]

Tabla 3.23. Regiones ideales de operación HOA para los modos de Amplificación Booster y Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman de 1 canal a 10 Gbps.

**3.2.3. Caso 3. Amplificación en paralelo EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional.** De igual forma que se realizó en el escenario 1, la amplificación híbrida Bidireccional en paralelo sobre la red XGS-PON se basa en los análisis de rendimiento, obtenidos a través del estudio de los modos Booster y Pre-Amplificado para los tipos de bombeo Co-Propagado y Contra-propagado, donde el mejor modo de amplificación fue el Booster con longitud de onda EDFA de 1480 nm y potencia de bombeo de 0-10 dBm y Raman de 1420 nm con potencias de bombeo 20-36 dBm. El bombeo Bidireccional se realizó para el amplificador EDFA; para el amplificador Raman, se tendrá, en cuenta los tipos de bombeo Co-Propagado (Tabla 3.24) y Contra-Propagado (Tabla 3.25).

Modo Booster - Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm									
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
2	20	33,82457	1,00E-40	-15,705	4	20	36,10910	1,00E-40	-12,866
	22	33,13169	1,00E-40	-15,682		22	35,03811	1,00E-40	-12,848
	24	35,60163	1,00E-40	-15,614		24	36,79380	1,00E-40	-12,817
	26	34,51427	1,00E-40	-15,518		26	36,16642	1,00E-40	-12,770
	28	34,45526	1,00E-40	-15,344		28	35,51527	1,00E-40	-12,682
	30	37,04413	1,00E-40	-15,019		30	36,95424	1,00E-40	-12,450
	32	36,68844	1,00E-40	-14,144		32	37,52191	1,00E-40	-11,965
	34	38,12188	1,00E-40	-11,290		34	38,39468	1,00E-40	-10,027
	36	30,95655	1,00E-40	-3,461		36	30,55336	1,00E-40	-3,229

Tabla 3.24. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA paralelo modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.

Modo Booster - Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm									
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]

Modo Booster - Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado. Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm									
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
2	20	22,59200	1,00E-40	-2,869	4	20	22,95400	1,00E-40	22,95400
	22	24,24950	1,00E-40	-2,771		22	23,22687	1,00E-40	23,22687
	24	23,88541	1,00E-40	-2,684		24	24,76520	1,00E-40	24,76520
	26	24,45296	1,00E-40	-2,515		26	25,48351	1,00E-40	25,48351
	28	25,49206	1,00E-40	-2,320		28	25,06045	1,00E-40	25,06045
	30	25,03198	1,00E-40	-1,933		30	25,93192	1,00E-40	25,93192
	32	26,47645	1,00E-40	-1,662		32	26,20363	1,00E-40	26,20363
	34	27,37194	1,00E-40	-1,245		34	28,40132	1,00E-40	28,40132
	36	27,22694	1,00E-40	0,786		36	26,96495	1,00E-40	26,96495

Tabla 3.25. Mejores parámetros de monitoreo óptico HOA paralelo modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado, para 1 canal de 10 Gbps.

Al igual que en los modos anteriores, se obtuvieron resultados OPM para las longitudes de onda y rangos de bombeo óptimo de amplificación EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, consignando para este caso los resultados obtenidos para las variaciones EDFA de 2-4 dBm (Tabla 3.24), debido a que los resultados de Factor Q y BER encontrados para las conmutaciones de potencia son similares en todo el rango óptimo evaluado, difiriendo únicamente en los niveles de potencia obtenidos en recepción. De igual forma, el bombeo EDFA Bidireccional y Raman Contra-Propagado tuvo una respuesta similar al modo anterior superando los parámetros de monitoreo mínimos requeridos por la ITU-T en sus recomendaciones, pero con menores resultados OPM y niveles de potencia en recepción más altos que los obtenidos en el bombeo Bidireccional Co-Propagado. De esta manera, solo se analizan gráficamente los resultados obtenidos para el modo Booster con amplificación EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado (Figura 3.37).

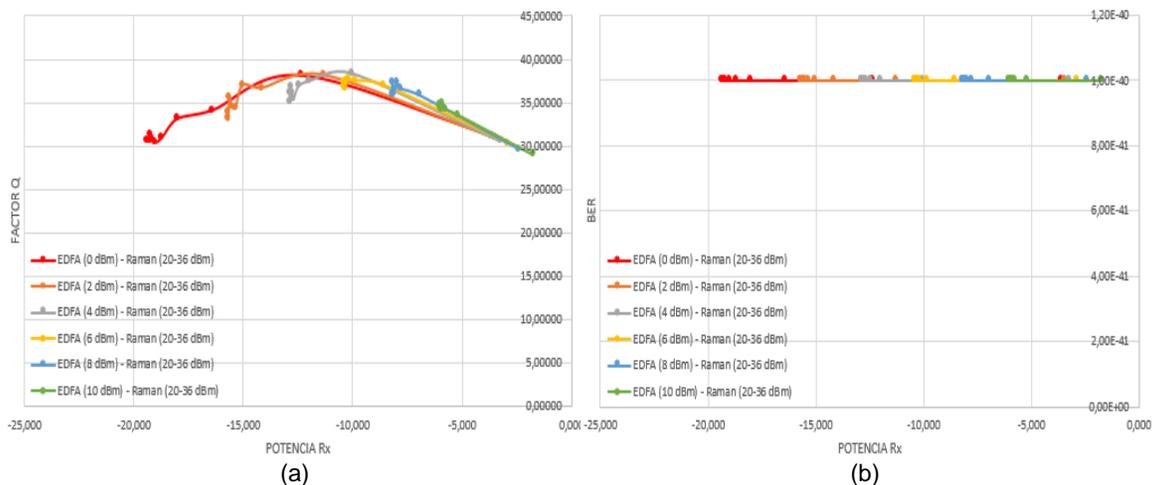


Figura 3.37. (a) Factor Q vs. Potencia de Recepción HOA, (b) BER vs. Potencia de Recepción HOA, modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagada, para 1 canal a 10 Gbps.

El modo de amplificación EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado de la figura 3.37, presenta un comportamiento cuasi-lineal para todas las composiciones de potencia de bombeo, mostrando altos niveles de calidad para todo el rango EDFA y variaciones Raman de 20-34 dBm, notando un cambio de pendiente que determina la caída del Factor Q cuando se alcanza los 36 dBm en Raman; sin embargo, continúa por encima de los mínimos requeridos para la transmisión óptica. Además, a través de las curvas de la figura 3.37(b), se puede observar un sistema en el que, en todo el rango de conmutación de potencia, se logra obtener una red amplificada con la mínima tasa de transferencia de errores posible, siendo este resultado gráfico inversamente proporcional al observado en la figura 3.37(a).

El diagrama de ojo de la figura 3.38(a), muestra la composición de bombeo EDFA y Raman donde se encontró mejor comportamiento sobre el sistema amplificado. Se observa una diferencia entre las fases que puede determinar la influencia de efectos lineales como PMD y CD sobre el sistema o la presencia del fenómeno no lineal de Automodulación de Fase. No obstante, al observar los resultados obtenidos y analizados anteriormente, se puede determinar la presencia de SPM, fenómeno que no degrada al sistema, aunque se presente desfase entre las señales, como el ensanchamiento espectral que se muestra en la figura 3.38 (b).

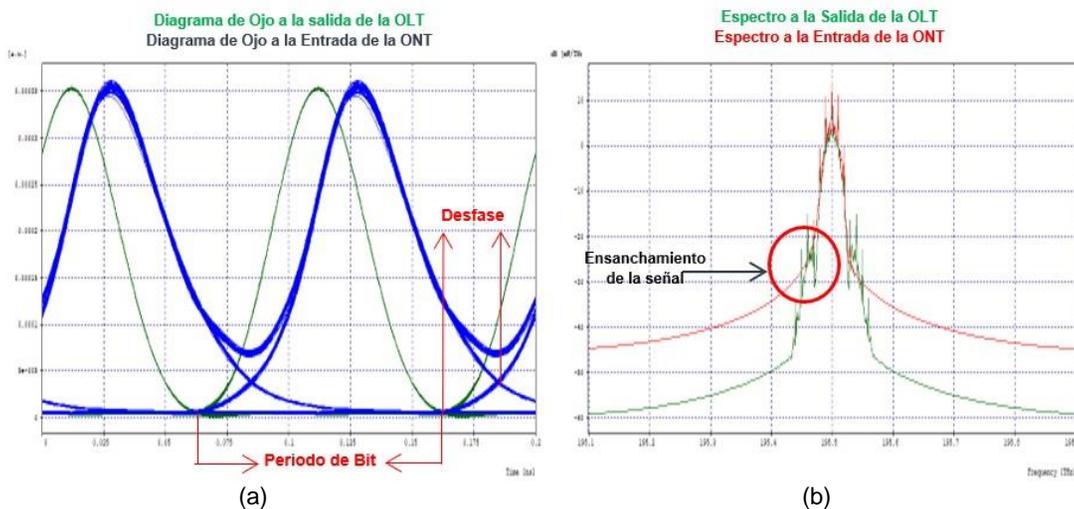


Figura 3.38. Diagramas en Transmisión y Recepción (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo Bidireccional.** La presencia del fenómeno no lineal SPM en el modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, puede ser analizado mediante la observación espectral en

la señal recibida en la ONT, dado el ensanchamiento que este puede presentar respecto al espectro en la OLT. Además, el desfase entre las señales de transmisión y recepción observadas también puede indicar la presencia de este fenómeno analizado para una de las mejores variaciones del modo de amplificación (EDFA igual a 4 dBm y Raman (20-36 dBm)). El diagrama espectral mostrado en la figura 3.39(a), presenta un sistema más robusto en todas las conmutaciones del rango Raman de 20-34 dBm, mostrando un leve ensanchamiento espectral para todas las variaciones, solamente observable de forma más clara al alcanzar los 36 dBm Raman debido al alto nivel de potencia en recepción presentado; no obstante, se presentan altos niveles de Factor Q y BER al alcanzar la composición de potencias para una amplificación HOA.

La figura 3.39 (b), presenta una diferencia de aproximadamente  $\varphi_{MAX} = 0.025$ , que corresponde aproximadamente a un 25% de desfase entre las señales de transmisión y recepción. De esta manera, se encuentra la posibilidad de establecer la presencia de SPM por medio del análisis de diagrama de ojo.

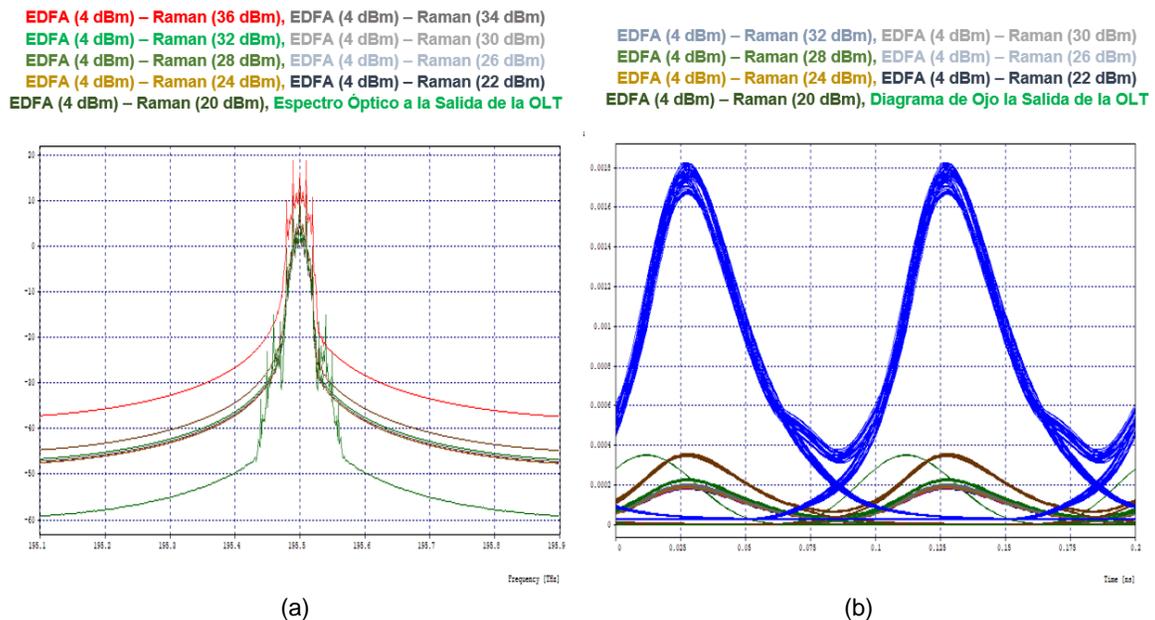


Figura 3.39. Presencia Fenómeno SPM modo Booster (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Los resultados obtenidos para la amplificación híbrida HOA modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, muestra un comportamiento estable respecto a las variaciones en los rangos de potencia de bombeo compuestos, obteniendo parámetros de monitoreo ópticos superiores a los

mínimos establecidos por la ITU-T. Además, el modo de amplificación en todo el rango de evaluación mantiene un comportamiento cuasi-lineal respecto a los niveles de factor de calidad y potencia obtenidos en recepción, presentando de esta forma un sistema más robusto que los analizados anteriormente. La tabla 3.26, presenta valores del sistema óptico con amplificación modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, cuyo comportamiento es óptimo en la amplificación óptica híbrida analizada.

Penalizaciones de Potencia para HOA Bidireccional						
Configuración	Longitud de Onda EDFA Bidireccional [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster (EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado).	1480	1420	[0-10]	[20-36]	[0-10]	[20-34]

Tabla 3.26. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

La tabla 3.27, consigna las regiones de operación ideales, en donde se presentó un mejor comportamiento OPM en los diferentes modos de amplificación analizados en los tipos de bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, concluyendo, para cada caso, que el mejor modo de amplificación fue el Booster en los tres tipos de bombeo analizados.

Penalizaciones de Potencia para HOA en EDFA-Raman.						
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Región de Bombeo ideal EDFA [dBm]	Región de Bombeo ideal Raman [dBm]
Booster Co-Propagado	1480	1420	[0-10]	[20-34]	[2-10]	[20-32]
Booster Contra-Propagado	1480	1420	[2-10]	[20-34]	[2-10]	[20-32]
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[0-10]	[20-36]	[0-10]	[20-34]

Tabla 3.27. Región ideal de operación HOA para el modo de amplificación Booster, en bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

Al igual que en el escenario 1, se pudo determinar por medio de la tabla 3.27, que los modos más adecuados para una amplificación EDFA-Raman en un enlace óptico de 80 km son: i) Modo Booster Co-Propagado y ii) Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, con longitudes de onda EDFA de 1480 nm y Raman de 1420 nm, cuyos parámetros de monitoreo óptico y niveles de sensibilidad en recepción, fueron obtenidos a nivel de simulación.

Con estos resultados fue posible establecer la distancia máxima que la amplificación HOA paralela puede alcanzar, dada la alta respuesta a nivel OPM que se obtuvieron por medio de simulación; además, la implementación de una amplificación paralela HOA sobre una red XGS-PON puede extender la longitud del enlace hasta un máximo de 350 km, implementando un modo de amplificación Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, alcanzando OPMs para Factor Q igual a 40 dBm y BER de  $1 \times 10^{-40}$ . Se debe tener en cuenta que, al igual que la implementación en cascada analizada en el escenario anterior, la longitud alcanzada se logra implementando una modulación RZ-OOK que actualmente no es utilizada para sistemas ópticos de alta velocidad y largo alcance, ya que no posee la robustez requerida frente a modulaciones de tipo multinivel (DQPSK) [68].

Los diagramas de ojo de la figura 3.40(a), presentan un nivel de amplitud similar entre ambas señales sin ningún tipo de degradación observable sobre la recepción, presentando el mismo comportamiento mostrado en el enlace de 80 km con relación a la diferencia de fase entre las señales de transmisión vs recepción, que puede relacionar este desfase con la presencia de SPM sobre el enlace. Adicionalmente, se puede observar sobre la figura 3.40 (b) un margen espectral que satisface el nivel de sensibilidad en recepción requerido en el sistema, presentando ensanchamiento respecto a la señal de transmisión y cuya manifestación es la principal característica del fenómeno de Automodulación de Fase sobre el enlace óptico. No obstante, dados los resultados OPM obtenidos, se puede señalar que este efecto no establece efectos significativos que degraden el sistema óptico XGS-PON; además, no se observa la presencia de otros fenómenos no lineales como FWM o XPM, debido a que estos son observables en sistemas que implementan más de una longitud de onda.

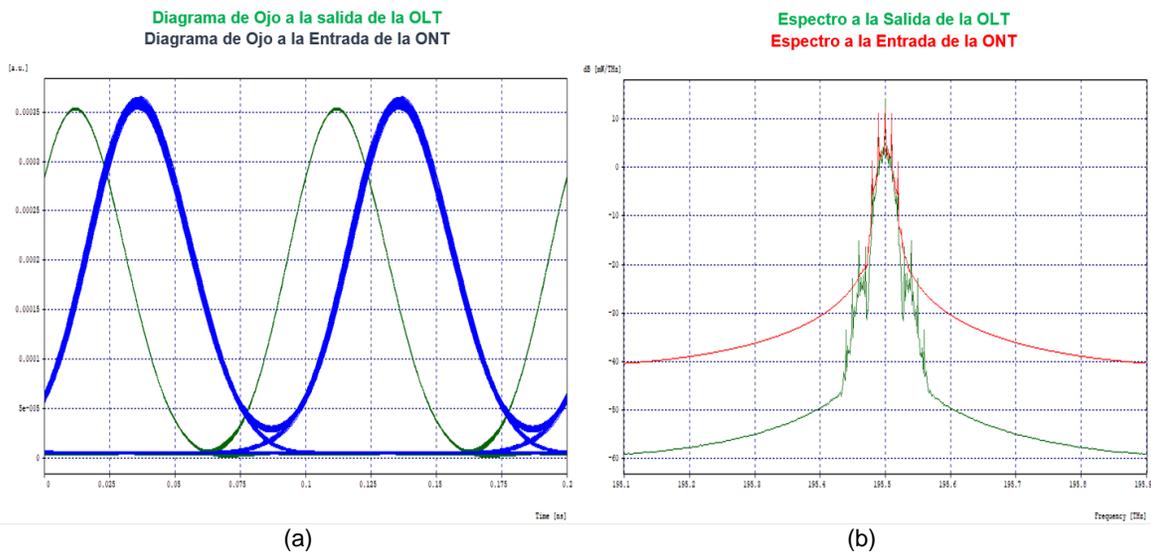


Figura 3.40. Diagramas en Transmisión y Recepción Enlace a 300 km (a) Diagramas de Ojo, (b) Diagrama Espectral, Modo Booster. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

El análisis de los diferentes modos de amplificación para los casos de estudio Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, presentaron resultados superiores de acuerdo con los parámetros de monitoreo establecidos en las recomendaciones de la ITU-T. Se pudo establecer que, implementando la amplificación paralela en modo Booster con tipo de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, es posible alcanzar una distancia máxima de enlace de 380 km, obteniendo parámetros de monitoreo ópticos superiores a los requeridos para el funcionamiento de una red óptica, donde pese a observarse la presencia de SPM, este fenómeno no representa degradaciones importantes sobre la señal óptica, tanto en enlaces de 80 km como de largo alcance.

### 3.3. AMPLIFICACIÓN HÍBRIDA MIXTA

A través de la implementación de los diferentes modos y tipos de bombeo para una amplificación híbrida EDFA-Raman en cascada o serie sobre una red de comunicación XGS-PON, el análisis de resultados permitió determinar la pertinencia de esta práctica sobre el sistema óptico analizado, tanto para enlaces de 80 km como para la extensión máxima, haciendo uso de los mejores parámetros de amplificación del sistema. Asimismo, se realizaron análisis sobre la misma red, reemplazando la amplificación en cascada por una en paralelo, teniendo en cuenta que dicha implementación no es común dentro de la arquitectura de sistemas ópticos actuales; en estos se determinaron los mejores parámetros para el funcionamiento de la red, así como la presencia de fenómenos no lineales, tanto en el enlace inicialmente implementado, como en la máxima extensión del sistema. También se pudo determinar que implementaciones como

el modo de amplificación En-Línea sobre un enlace XGS-PON, generaban, además de errores de simulación y sistema operativo, sobreamplificación del sistema óptico, debido a la cantidad de dispositivos amplificadores para enlaces de 80 km que no permitieron un completo análisis de este modo amplificado.

**3.3.1. Escenario de simulación, amplificación Mixta Serie-Paralelo, EDFA-Raman a 10 Gbps.** Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los escenarios analizados, se propone realizar una red óptica XGS-PON de ultra largo alcance, tomando la máxima longitud lograda para cada amplificación analizada, implementando dos *spans* cuyo enlace total alcanza una longitud de 530 km. La figura 3.41, muestra el esquema de red XGS-PON con amplificación Mixta HOA propuesta.

El sistema en transmisión cuenta con un láser de onda continua CW de longitud de onda 1533.46 nm (195.5 THz), bloque OLT que posee un generador óptico de señal a una tasa de bit de 10 Gbps, modulador tipo Mach-Zehnder y Driver para modulación tipo RZ-OOK. Asimismo, se implementa a la salida de la OLT un amplificador de potencia de salida fija de 10 dBm, con el fin de dar una aproximación a la implementación de redes ópticas actuales.

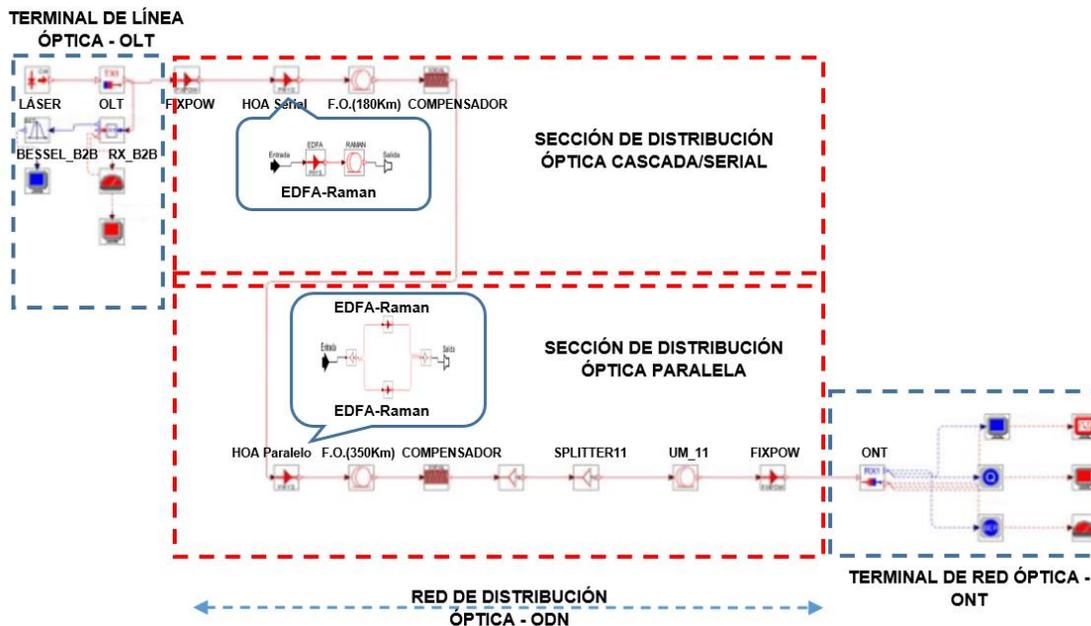


Figura 3.41. Escenario de simulación, amplificación Mixta Serie-Paralelo, EDFA-Raman a 10 Gbps.

Sobre la red de distribución óptica ODN se encuentra el módulo de amplificación en cascada, bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado,

implementando al igual que los escenarios anteriores, un amplificador EDFA de modelo físico y un amplificador Raman LRA. De acuerdo con los resultados obtenidos en escenarios anteriores, se encontró que este modo de amplificación y configuración presenta altos resultados OPM respecto a los diferentes casos de análisis para un enlace de 180 km, cuya longitud es implementada por medio de un tramo de fibra óptica tipo monomodo Furukawa SM332 1550. A continuación, se ubica un compensador ideal seguido de la segunda etapa de amplificación HOA en paralelo EDFA-Raman Bidireccional Co-Propagado para un enlace máximo de 350 km, seguido por el mismo tipo de fibra óptica y compensación. Por último, se encuentra la etapa de distribución que genera la capacidad máxima estipulada por la ITU-T de 64 usuarios (peor de los casos) para esta clase de sistemas.

Finalmente, se encuentra un segmento de fibra óptica de última milla establecida para 2 km y un amplificador de potencia fija antes de la ONT, generando una aproximación más exacta a las redes basadas en GPON. Al igual que en los otros escenarios, solo se analizará una de las terminales ONT de todas las que posee el sistema.

En los escenarios de amplificación en cascada y paralelo analizados, fueron determinados los rangos de potencia de bombeo compuestos EDFA-Raman que presentaron mejor rendimiento a nivel OPM para la comunicación óptica implementada. Sin embargo, se ha determinado que para una red XGS-PON con amplificación mixta, los rangos de potencia de bombeo varían respecto a los encontrados como la mejor configuración, ya que la modificación de los parámetros de potencia en una de las secciones de amplificación influye en el comportamiento de la otra y, por consiguiente, en el funcionamiento general del sistema óptico. De esta forma, se pudo establecer que el mejor bombeo en la sección de amplificación serial fue para la composición EDFA de 8 dBm y Raman de 20-30 dBm, cuyos resultados permitieron observar un sistema de alta calidad, mínima transferencia de errores de bits y alta potencia de transmisión (Tabla 3.28), que permite que la señal recibida por la sección de amplificación paralela tenga más amplitud que la original, beneficiando la transferencia de la señal óptica en *spans* ópticos extensos.

Penalizaciones de Potencia para HOA EDFA-Raman Sección Serie/Cascada.									
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Mejor Región de Bombeo [dBm]		Factor Q [dB]	BER	P <sub>Rx</sub> [dBm]
					EDFA	Raman			
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[8]	[20-32]	8	20	36.528	1e-40	10.097
						<b>22</b>	<b>36.275</b>	<b>1e-40</b>	<b>9.878</b>
						24	35.364	1e-40	9.869
						26	33.901	1e-40	9.852
						28	32.253	1e-40	10.024
						30	30.434	1e-40	9.881

						32	20.174	4.7e-24	9.172
						34	8.560	0.0023	7.509
						36	6.020	0.0022	5.396

Tabla 3.28. Región ideal de operación HOA sección Serial/Cascada, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

La figura 3.42, presenta el diagrama de ojo y espectral para uno de los mejores resultados de la sección de amplificación serial (EDFA a 8 dBm y Raman a 22 dBm), donde se observa la diferencia de amplitud entre la señal transmitida y la recibida por la sección de amplificación en paralelo. Se puede observar en la figura 3.42(a), la diferencia de amplitud entre el diagrama de ojo de la señal al final del *span* de la sección serial y la transmitida, que no permite determinar la presencia de un desfase entre señales.

El diagrama de la figura 3.42 (b), muestra una superposición del espectro al final de la transmisión de la sección en serie, la cual es coherente respecto a la diferencia de potencias entre las señales. Además, se observa que el resultado espectral antes de la amplificación en paralelo tiene un ensanchamiento notorio respecto al transmitido, fenómeno que supone la presencia de efectos no lineales como SPM sobre la sección de amplificación y que estará presente a la entrada de la amplificación de tipo paralela.

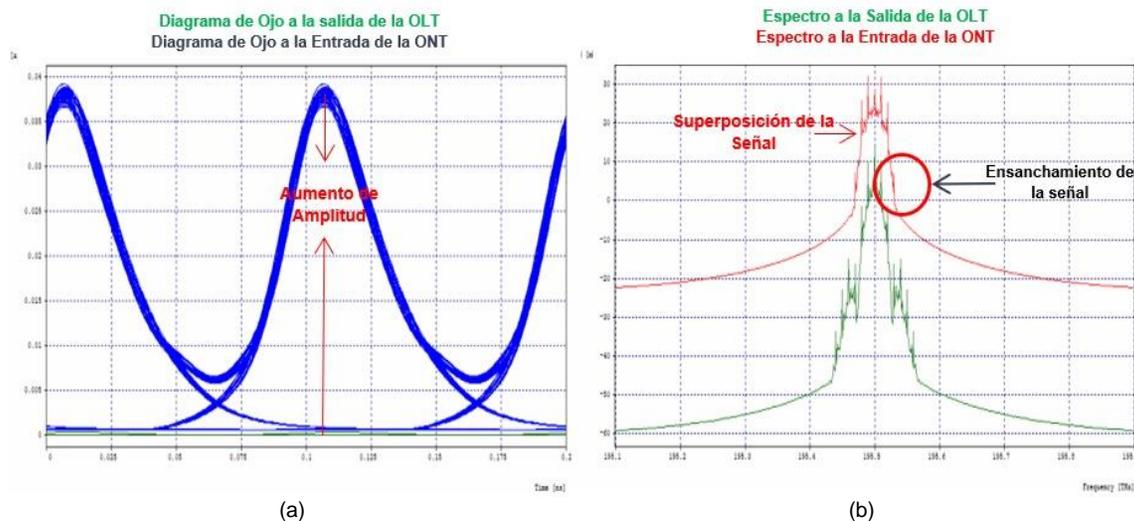


Figura 3.42. Amplificación Sección Serial/Cascada EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Contrario al alto rango de bombeo administrado en la sección de amplificación en cascada, la mejor composición de potencia en la sección paralela se presentó

para bombes EDFA de 2 dBm y Raman en el rango de 26-32 dBm, observando de esta forma que los altos valores de potencia y amplitud presentados en la sección de amplificación anterior, benefician al sistema óptico amplificado, el cual tiende a degradarse de manera significativa a través de enlaces de largo alcance por efecto de la presencia de fenómenos lineales y no lineales en el enlace óptico. La tabla 3.29, consigna los valores OPM y de potencia después de monitorear los parámetros de la sección amplificada en paralelo y la totalidad del enlace en el módulo receptor del sistema amplificado, notando que estos valores son superiores a los mínimos establecidos para una comunicación óptica.

Penalidades de Potencia para HOA EDFA-Raman Sección Paralela.									
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Mejor Región de Bombeo [dBm]		Factor Q [dB]	BER	P <sub>Rx</sub> [dBm]
					EDFA	Raman			
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[2]	[26-32]	[2]	20	17.759	2.5e-14	-25.447
						22	18.236	5.3e-16	-24.961
						24	19.986	1.5e-23	-24.303
						26	21.052	8.6e-29	-23.223
						28	23.484	1e-40	-21.614
						<b>30</b>	<b>24.146</b>	<b>1e-40</b>	<b>-19.193</b>
						32	20.118	1.7e-24	-15.930
						34	6.446	0.0189	-10.403
						36	6.020	0.0227	-27.899

Tabla 3.29. Región ideal HOA para una amplificación Mixta, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

La figura 3.43 (a) muestra el diagrama de ojo para la composición de potencias de bombeo, donde se presentaron los mejores resultados OPM sobre el sistema con amplificación mixta, observando que la señal óptica tiene una potencia en recepción pequeña respecto a la transmitida y la presentada a la entrada de la amplificación paralela. En este caso, se observa la diferencia de amplitud entre la señal de transmisión y recepción del sistema óptico amplificado, además de un desfase entre señales que puede ser ocasionado por la presencia de efectos lineales PMD y Dispersión Cromática, así como de SPM el cual fue observado previamente a la entrada de la sección de amplificación paralela.

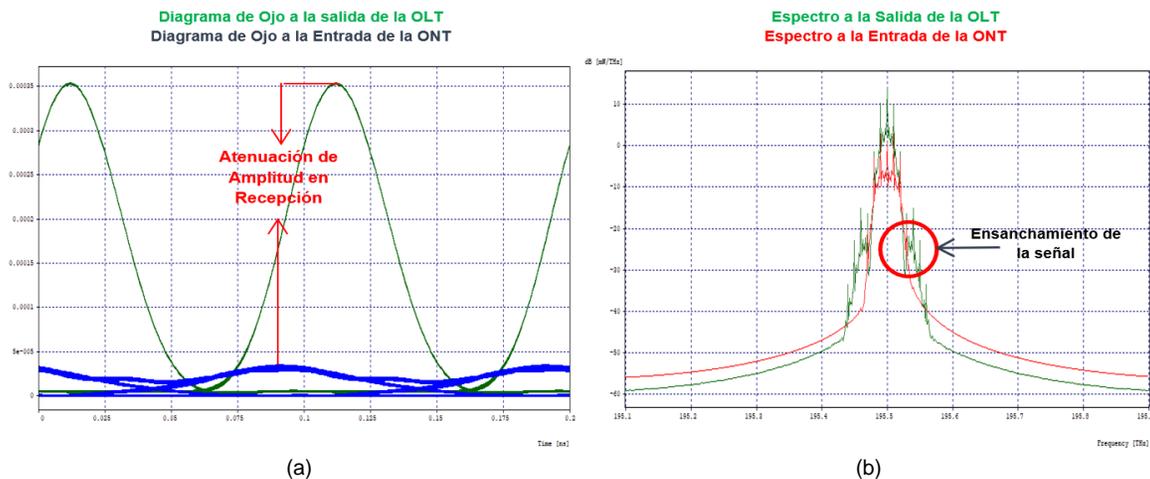


Figura 3.43. Amplificación Mixta EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

La presencia del efecto SPM sobre la señal óptica a la entrada de la sección paralela en el sistema analizado, podría determinar la amplificación del fenómeno no lineal. Sin embargo, aunque se continúa observando su presencia por medio del ensanchamiento espectral en la figura 3.43 (b), no se observa una amplificación del fenómeno en el espectro resultante del enlace de longitud 530 km, mostrando que dicho efecto no tiene una consecuencia evidente, dados los resultados OPM obtenidos sobre el sistema donde se superan los mínimos establecidos por las recomendaciones de la ITU-T.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado para una amplificación Mixta Serie-Paralelo.** La presencia del fenómeno no lineal SPM para una red XGS-PON de ultra largo alcance con amplificación Mixta, puede ser analizado mediante la observación espectral presentada tanto en la sección serial o cascada, como en el bloque de recepción del enlace de red óptico, tras pasar por la sección de amplificación en paralelo. Como se mencionó anteriormente, se puede observar la presencia de SPM sobre la sección amplificada en cascada de 180 km para la mejor composición de potencia de bombeo sobre este segmento; sin embargo, dicho fenómeno puede ser observado en todo el rango de evaluación, en donde se encontró el mejor comportamiento del sistema amplificado.

Contrario al escenario en cascada analizado anteriormente, en la sección en serie del enlace mixto observada en la figura 3.44(a), no es posible observar la presencia de un desfase entre el diagrama de ojo de la señal transmitida y la obtenida al final de este *span* de longitud 180 km, que podría determinar la presencia de SPM en la sección serial, debido a que la diferencia de amplitud presentada entre los diagramas imposibilita la observación de esta condición. Se debe tener en cuenta que la señal a la entrada de la sección de amplificación en

serie, ya ha sufrido una amplificación previa debido a la presencia de los amplificadores de potencia fija, que dan un acercamiento a las actuales implementaciones de red óptica.

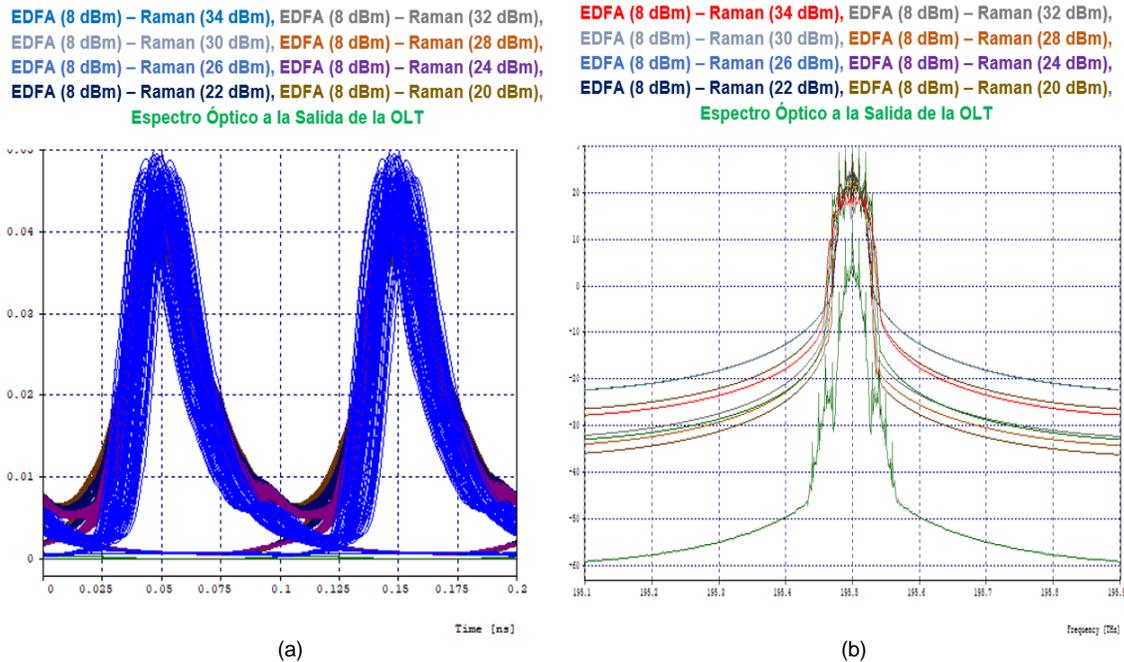


Figura 3.44. Presencia Fenómeno SPM sección en Cascada (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas espectrales para la mejor composición de potencias de bombeo EDFA-Raman de la figura 3.44(b), presentan un comportamiento espectral similar en todo el rango Raman de 20-36 dBm, superponiéndose al espectro original producto de la alta potencia en la sección amplificada y presentando ensanchamiento en cada variación Raman, siendo más notoria la presencia de este efecto al alcanzar las conmutaciones entre 32-36 dBm, fenómeno frecuentemente observado por la presencia de SPM en los anteriores escenarios.

La señal óptica proveniente desde el segmento de amplificación en cascada, presentó características de amplitud elevada respecto a la señal transmitida y presencia de SPM en el enlace de 180 km, fenómeno que, de ser amplificado a la par de la señal óptica en el bloque de amplificación en paralelo, podría generar afectaciones al sistema observables por medio de los resultados obtenidos en los parámetros de monitoreo óptico, así como en los diagramas de ojo y espectral. La figura 3.45(a), además de mostrar una diferencia de fase entre las señales de transmisión y recepción de  $\varphi_{MAX} = 0.026$ , muestra cómo las señales obtenidas para el rango de potencia Raman entre 20-30 dBm, se atenúan después de recorrer el segmento paralelo de 350 km y observado en el bloque ONT; sin

embargo, en el rango 32-36 dBm, presentan sobreamplificación, degradando las señales y haciéndose evidente en el diagrama de ojo, los cuales no han sido incluidos dentro de la figura 3.45(a), ya que no permiten la visibilización de las que poseen potencias más bajas y, por consiguiente, su análisis. De esta forma, al atenuarse las potencias en recepción del sistema, también se minimiza la presencia del fenómeno SPM sobre el enlace de ultra largo alcance.

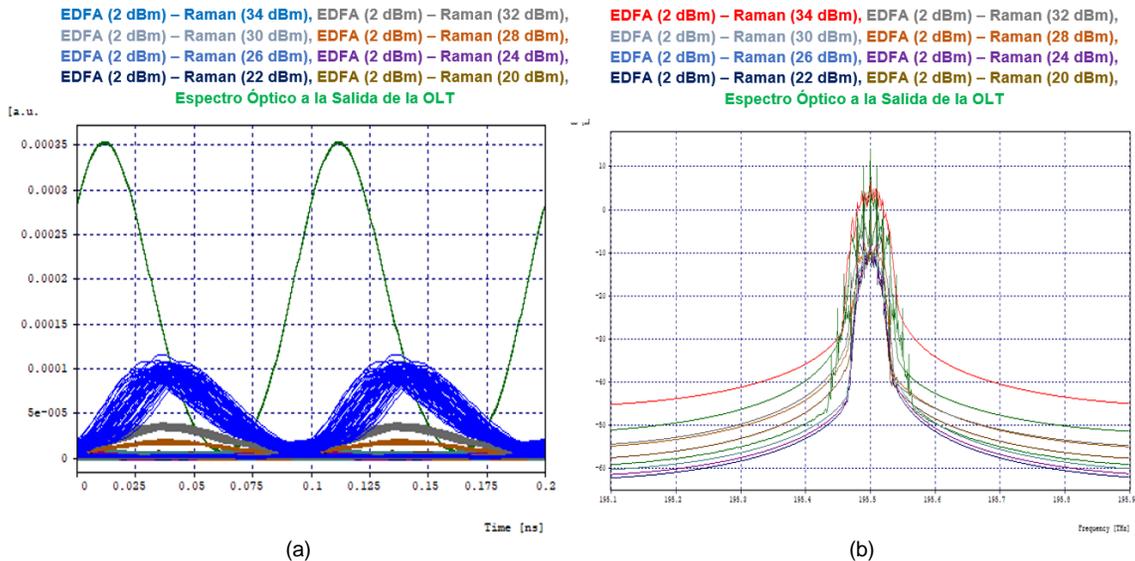


Figura 3.45. Presencia Fenómeno SPM amplificación Mixta (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Si bien en la figura 3.45 (b) se observa ensanchamiento de los espectros en la mejor disposición de potencia de bombeo para la sección de amplificación en paralelo, el fenómeno no lineal SPM continúa haciendo presencia sobre el sistema de ultra largo alcance implementado; no obstante, la afectación sobre el sistema óptico es mínima, dados los resultados OPM obtenidos sobre la red.

**3.3.2. Escenario de simulación, amplificación Mixta Paralelo-Serie, EDFA-Raman a 10 Gbps.** Con el fin de realizar un análisis más profundo del comportamiento de la red óptica XGS-PON de ultra largo alcance, se invirtió el orden de las secciones de amplificación para determinar la afectación en el rendimiento de la red propuesta. De esta forma, sobre la red de distribución óptica se implementa, inicialmente, la sección de amplificación en paralelo para un *span* de 350 km y a continuación la sección en cascada de longitud 180 km, como se muestra en la figura 3.46, implementando los mismos parámetros de funcionamiento de la red anterior, así como los rangos de potencia de bombeo Bidireccional para el amplificador EDFA y Co-Propagado para la amplificación Raman, donde se encontró el mejor rendimiento del sistema.

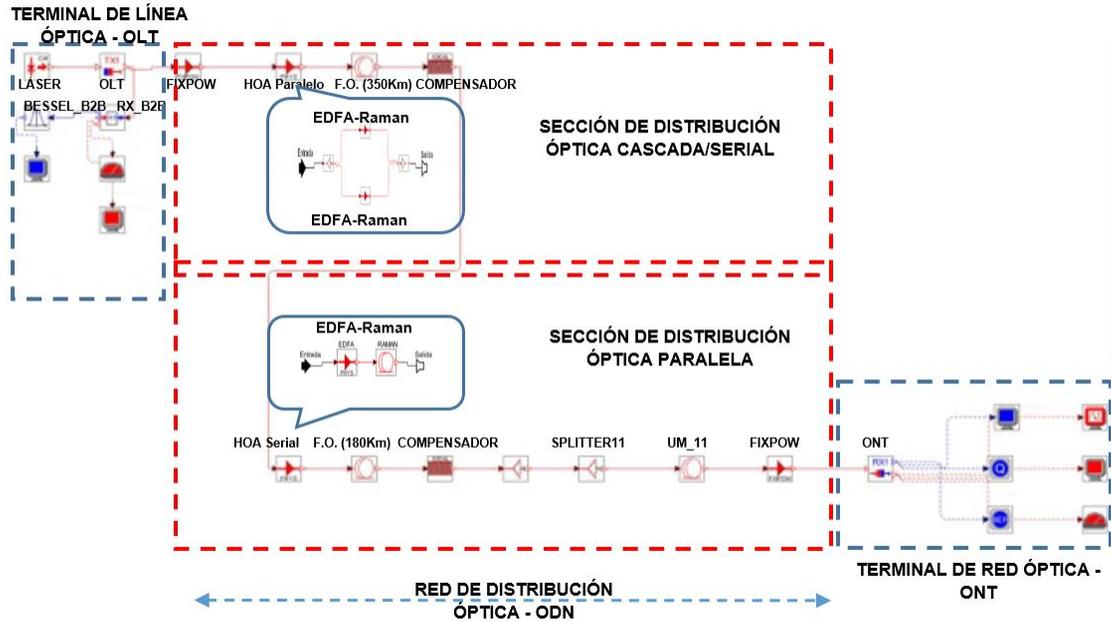


Figura 3.46. Escenario de simulación, amplificación Mixta Paralelo-Serie, EDFA-Raman a 10 Gbps.

Por medio del barrido de potencia de bombeo HOA determinado como el mejor de los casos y consignado en la tabla 3.30, se determinó que la sección de amplificación paralela de la red XGS-PON de largo alcance, presenta valores OPM superiores a los requeridos para el funcionamiento óptimo de la red; los niveles de sensibilidad obtenidos al final del span de 350 km son mucho menores que los presentados a la salida de la sección amplificada en cascada del caso anterior, debido a la atenuación de la señal que se presenta en enlaces de largo alcance. Se debe tener en cuenta que al igual que en el caso anterior, la red XGS-PON de ultra largo alcance ya presentaba una preamplificación a la salida de la OLT.

Penalizaciones de Potencia para HOA EDFA-Raman Sección Paralela.									
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Mejor Región de Bombeo [dBm]		Factor Q [dB]	BER	P <sub>Rx</sub> [dBm]
					EDFA	Raman			
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[2]	[20-28]	2	20	34.683	1e-40	-15.430
						22	34.147	1e-40	-15.055
						24	34.039	1e-40	-14.462
						26	33.035	1e-40	-13.538
						28	29.198	1e-40	-12.119
						30	20.013	1.6e-23	-10.097
						32	11.407	7.2e-05	-7.156
						34	6.020	0.0022	-3.818
36	6.020	0.0022	0.099						

Tabla 3.30. Región ideal de operación HOA sección Paralela, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

El diagrama de ojo de la figura 3.47(a), muestra la señal de transmisión y la obtenida para el mejor caso de la sección de amplificación en paralelo, donde, además de no observar desfase entre las señales, se puede determinar que la señal es atenuada al pasar por el enlace de 350 km. Aunque la amplitud de la señal medida después de la sección en paralelo es menor, se alcanzan valores OPM superiores a los requeridos para el correcto funcionamiento de una red óptica.

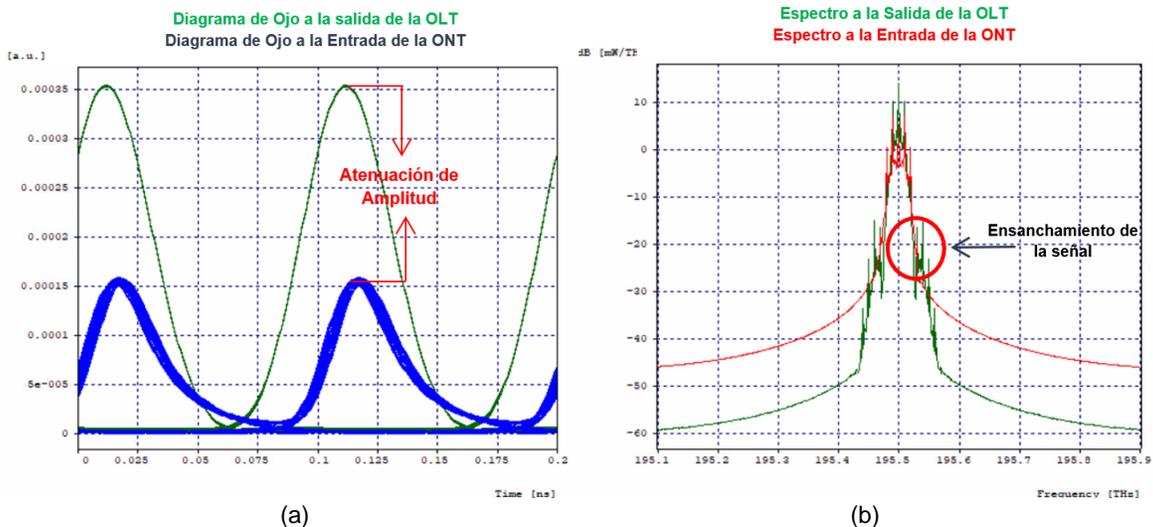


Figura 3.47. Amplificación Mixta sección paralela EDFA-Raman (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Al igual que en la implementación anterior, se puede observar en la figura 3.47(b), un ensanchamiento de la señal en el espectro de la sección de amplificación paralela respecto al transmitido, característica principal de la presencia del fenómeno no lineal de Automodulación de Fase sobre el sistema óptico. Si bien es muy pequeño, como se observa en la gráfica anterior, es posible que sea amplificado en la siguiente sección de amplificación, dada la presencia del fenómeno sobre la señal.

La sección en cascada o serial amplificada con parámetros de potencia de bombeo EDFA igual a 8 dBm y Raman en el rango de 20-36 dBm, contrario al comportamiento presentado en el caso anterior los resultados OPM, no alcanzaron factores de calidad mínimos para el funcionamiento óptico, además de presentar altas transferencias de bits erróneos en el bloque receptor, degradando el sistema óptico al punto de no poder recuperar los datos del sistema de comunicación.

La mejor composición de potencia en la sección paralela se presentó para bombeos EDFA de 2 dBm y Raman en el rango de 26-32 dBm, observando de esta forma que los altos valores de potencia y amplitud presentados en la sección de amplificación anterior benefician al sistema óptico amplificado, el cual tiende a degradarse de manera significativa a través de enlaces de largo alcance por efecto de la presencia de fenómenos lineales y no lineales en el enlace. La tabla 3.31, consigna los valores OPM y de potencia después de monitorear los parámetros de la sección amplificada en paralelo y la totalidad del enlace en el módulo receptor del sistema amplificado, notando que estos valores son superiores a los mínimos establecidos para una comunicación óptica. La tabla 3.39, presenta los resultados OPM obtenidos en la ONT para la implementación de una red XGS-PON mixta de largo alcance.

Penalizaciones de Potencia para HOA EDFA-Raman Sección Serie/Cascada.									
Configuración	Longitud de Onda EDFA [nm]	Longitud de Onda Raman [nm]	Cumple con OPM objetivo EDFA [dBm]	Cumple con OPM objetivo Raman [dBm]	Mejor Región de Bombeo [dBm]		Factor Q [dB]	BER	P <sub>Rx</sub> [dBm]
					EDFA	Raman			
Booster EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado.	1480	1420	[8]	[20-30]	8	20	6.020	0.022	-3.899
						22	6.020	0.022	-3.324
						24	6.020	0.022	-2.875
						26	6.020	0.022	-1.605
						28	6.020	0.022	0.626
						30	6.020	0.022	1.543
						32	6.668	0.016	2.526
						34	6.020	0.022	3.235
						36	6.020	0.022	3.063

Tabla 3.31. Región ideal de operación HOA amplificación Mixta implementación inversa, EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps.

El diagrama de ojo presentado en la figura 3.48(a), muestra el mejor resultado obtenido de la composición de potencias EDFA-Raman, donde se obtuvieron los parámetros de monitoreo más altos. Al observar los niveles de potencia en la recepción del enlace de ultra larga distancia y consignados en la tabla 3.31, se nota que, a pesar de que se encuentran dentro del umbral de sensibilidad de recepción determinado, estos niveles de P<sub>Rx</sub> no tienen una influencia que conlleve a la obtención de resultados OPM sobre la red de amplificación mixta.

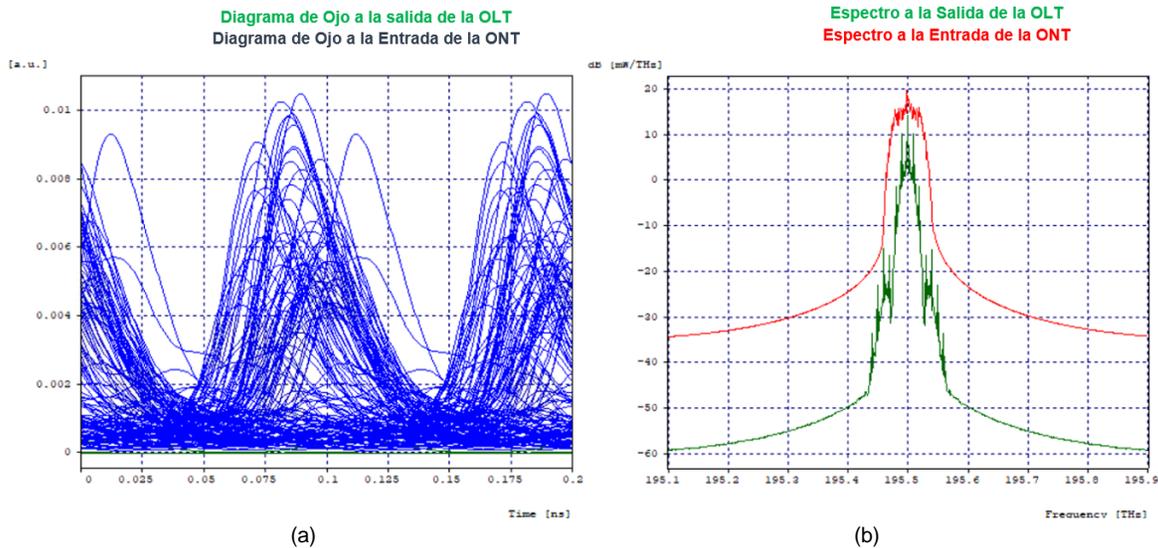


Figura 3.48. Amplificación Mixta EDFA-Raman implementación inversa (a) Diagrama de ojo, (b) Diagrama espectral. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Además de observar que el espectro óptico de la señal en recepción se superpone al transmitido, se nota la pérdida de la forma espectral, así como el ensanchamiento de este respecto a la señal de referencia, como se detalla en la figura 3.48 (b), donde también se podría inferir que el sistema tiene presencia del fenómeno no lineal SPM.

**Análisis del efecto no lineal SPM en bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado para una amplificación Mixta Paralelo-Serie.** El fenómeno no lineal SPM para una red XGS-PON en un *span* de amplificación paralelo de 350 km, puede ser analizado en el extremo final de la sección óptica, con el fin de determinar la presencia de SPM sobre la sección amplificada para la mejor composición de bombeo, donde se encontró el mejor comportamiento de la amplificación. La figura 3.49 (a), presenta los diagramas de ojo para el mejor rango de amplificación, donde se muestra el nivel de amplitud para cada variación de Potencia Raman en el rango de 20-28 dBm, donde se encontraron los mejores resultados respecto al factor de Calidad y BER de la sección de amplificación paralela, omitiendo los resultados obtenidos en el rango 32-36 dBm debido a la sobreamplificación de las señales presentadas, que no permiten la observación de los resultados y, por consiguiente, el análisis gráfico de la amplificación. Se puede notar que, pese a encontrar señales con más amplitud que la señal original, esta permite identificar que entre ellas no se presenta desfase, como sí ocurre en escenarios anteriores.

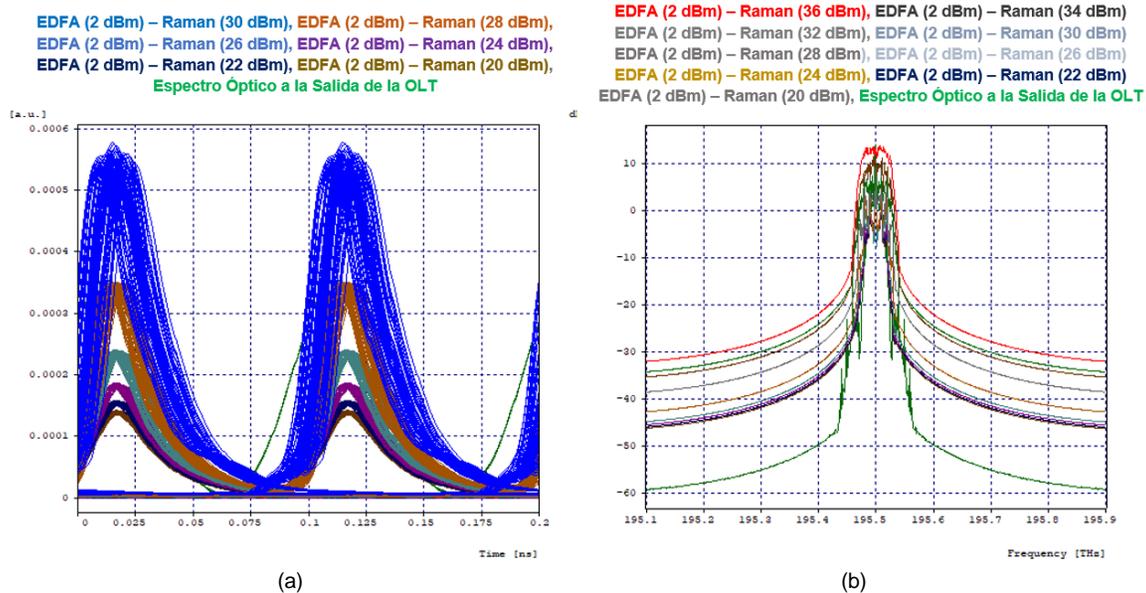


Figura 3.49. Presencia Fenómeno SPM sección Paralela (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Al observar los diagramas espectrales para la mejor composición de potencias de bombeo EDFA-Raman de la figura 3.49 (b), se nota un comportamiento espectral similar en el rango Raman de 20-28 dBm, observando un ensanchamiento de las señales respecto al espectro de transmisión. Este fenómeno es más visible en el rango de variación Raman 30-36 dBm, debido a la pérdida de la forma respecto a la señal transmitida. Dicho ensanchamiento es la principal característica de la presencia del fenómeno no lineal de Automodulación de Fase en el *span* de amplificación HOA en paralelo. De esta forma, se tiene que la señal recibida por la sección de amplificación serial, además de amplificar la señal óptica, también podría amplificar los efectos producidos por SPM que hacen presencia en la señal óptica.

Como se observó en la disposición Serie-Paralelo, la segunda sección de amplificación tomó la señal con unos altos niveles de potencia y OPM que, observados en la ONT después de un enlace de 530 km, se vieron atenuados respecto a las observadas tanto en el bloque de transmisión como después de la sección de amplificación serial, anotando que pese a la presencia del fenómeno de Automodulación de Fase, este no fue amplificado y el sistema no se vio afectado, pues el ensanchamiento presentado a nivel espectral no generaba influencia alguna que degradara el sistema. Esta es una situación contraria al caso presentado para el Paralelo-Serial, donde la señal tomada de la primera sección de amplificación presentaba tanto OPM altos como bajos niveles de potencia, los que fueron atenuados al pasar por la sección de amplificación serial de 150 km,

produciendo dispersión de potencia por el ensanchamiento que ocasiona la disminución de la OSNR en el enlace óptico y, por consiguiente, la reducción del factor de calidad y aumento en las tasas de bits errados, generando a su vez la superposición de símbolos, lo cual degrada completamente el sistema, como se observa en el diagrama de ojo de la Figura 3.50 (a).

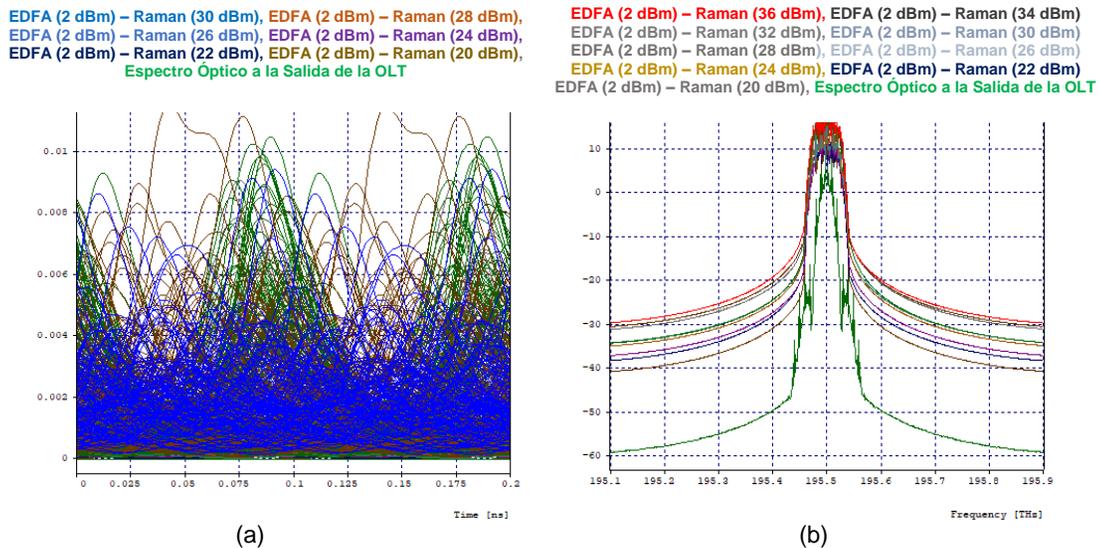


Figura 3.50. Presencia Fenómeno SPM amplificación Mixta Inversa (a) Diagrama de Ojo Mejor Rango, (b) Espectro Mejor Rango. Fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, para 1 canal a 10 Gbps.

Si bien se puede observar que los espectros del sistema óptico tienen un comportamiento similar, también se evidencia que pierden completamente la forma espectral, se superponen al espectro original y sufren un gran ensanchamiento, lo que para este caso puede implicar la presencia de fenómenos lineales y no lineales en la red XGS-PON.

A través de los resultados obtenidos en este escenario, se pudo determinar la influencia de la posición de las secciones de amplificación sobre la red de largo alcance, siendo la disposición Serie-Paralelo la que mejor rendimiento presentó respecto a los parámetros de monitoreo ópticos alcanzados, teniendo en cuenta que para enlaces de larga distancia, las modulaciones más empleadas actualmente son en fase como DPQPSK (*Dual-polarization Quadrature Phase Shift Keying*), la cual es utilizada por su eficiencia espectral respecto a la RZ-OOK implementada en la red [68], siendo esto un resultado de alto valor, dados los costos que la implementación de modulaciones más complejas presentan sobre las redes ópticas.

**Nota del Autor:**

*En este Capítulo se realizaron análisis de desempeño en un enlace de bajada XGS-PON con amplificación híbrida HOA EDFA-Raman para escenarios donde los amplificadores empleados se configuraron en modo serie, paralelo y una configuración mixta para una red de largo alcance dados los resultados obtenidos en las dos configuraciones anteriores.*

*Los escenarios serie y paralelo fueron estudiados para modos de amplificación Booster, Pre-Amplificación y Bidireccional, donde para cada uno se analizó la influencia de los bombeos Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, determinando los resultados mínimos requeridos OPM de acuerdo con las recomendaciones realizadas por la ITU-T para el análisis de las redes tipo XGS-PON. Además, se presentó un análisis de efectos no lineales sobre la red óptica, con base a gráficos y sustentos teóricos obtenidos por medio del software de simulación OptSim con el fin de determinar la influencia de estos en cada caso de amplificación. Con los resultados obtenidos, se pudo determinar que la red XGS-PON analizada con amplificación tipo serial o cascada puede ser extendida hasta 180 km con un bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado. De igual forma, se pudo establecer que al implementar una amplificación HOA en paralelo con las mismas características de bombeo presentadas en la amplificación serial, el enlace puede ser extendido hasta 350 km con OPMs objetivo superiores a los recomendados por los estándares internacionales. Basado en estos resultados se pudo establecer que la mejor implementación de una red mixta de ultra largo alcance está constituida por un arreglo de amplificadores HOA Serie-Paralelo para un enlace total de 530 km, donde nuevamente se alcanzaron OPMs superiores a los requeridos para el correcto funcionamiento de una red óptica, así como también se analizó la presencia de fenómenos no lineales que pudieran estar presentes en la amplificación.*

## **4. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En el presente trabajo de investigación, se realizó el análisis de desempeño para diferentes modos de amplificación híbrida HOA empleando dispositivos amplificadores EDFA y Raman sobre un entorno de red XGS-PON; se presenta una comparación entre las diferentes disposiciones con dispositivos que se encuentran en el mercado, siendo pautas aplicables al desarrollo de redes ópticas y dando cumplimiento a cada uno de los objetivos planteados inicialmente. En este capítulo, se presentan conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros relacionados, con respecto a los aspectos más importantes que aportaron en la realización de los objetivos propuestos.

### **4.1. CONCLUSIONES**

En la realización de la presente investigación se implementaron esquemas de amplificación de tipo híbrido basados en dispositivos amplificadores EDFA-Raman sobre una red de tipo XGS-PON, donde se pudo demostrar que este tipo de implementaciones permitirá la convergencia entre redes de nueva generación tanto de primera como de segunda fase y la evolución de estas a nivel de acceso, así como la migración a enlaces de ultra larga distancia, implementando modulaciones cuya eficiencia espectral es menor a las utilizadas en la actualidad para enlaces de longitudes superiores a 80 Km, pero que permitieron alcanzar una distancia máxima para el enlace de ultra largo alcance propuesto de 530 Km, con una incidencia mínima de efectos no lineales sobre el sistema y con valores OPM superiores a los estipulados por las recomendaciones de la ITU-T para sistemas de fibra óptica de alta velocidad.

Sin embargo, para las características específicas de esta investigación se generaron restricciones con respecto a la capacidad de simulación de la herramienta, debido a que la versión de la misma no tiene la capacidad de simular enlaces bidireccionales como si lo presenta las nuevas versiones del software, lo que limitó el alcance de la investigación a la evaluación de un enlace XGS-PON en el sentido descendente de la red. Posteriormente, se encontraron limitaciones en simulación respecto a los resultados obtenidos en arquitecturas de tipo En-Línea con amplificación híbrida y los diferentes tipos de bombeo, debido a que los resultados OPM arrojados no fueron coherentes con lo mencionado teóricamente, además de presentar caídas constantes a nivel de simulación como de sistema operativo. Adicionalmente, la implementación de una compensación sobre los efectos de dispersión cromática del 100% fue establecida para poder observar los efectos de la amplificación óptica híbrida HOA sobre el sistema óptico, por lo cual no se implementaron los estándares de compensación utilizado en las redes ópticas actualmente desplegadas. Por último, de manera particular se encuentran

las conclusiones de los resultados obtenidos en la investigación y presentados a continuación:

- Para toda configuración serie o paralelo, el modo de amplificación Booster es el más adecuado para un sistema óptico XGS-PON con amplificación híbrida.
- El aumento en los valores de potencia de los amplificadores HOA ocasiona cambios en los valores OPM, excitando efectos no lineales y degradando notablemente el enlace óptico.
- Las implementaciones del modo de amplificación Booster con tipos de bombeo Co-Propagado y Bidireccional, obtuvieron resultados OPM superiores a los requeridos en los sistemas ópticos.
- Amplificaciones HOA tipo serial y paralelo con configuración Booster Bidireccional EDFA y Raman Co-Propagado, permitieron alcanzar longitudes superiores.
- Las configuraciones HOA de tipo serie y paralelo para un enlace XGS-PON de 80 km, se comportan de manera similar con respecto al desempeño OPM.
- La red de ultra largo alcance serie-paralelo propuesta, implementando tipos de bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, alcanzó los mejores niveles OPM.
- La presencia de SPM en el enlace de ultra largo alcance, no afecta significativamente el funcionamiento de la red.
- El uso de la modulación RZ-OOK, pese a no ser espectralmente eficiente sobre redes de nueva generación, permitió alcanzar mayores distancias, con mínimas degradaciones.

Expuestos los resultados y conclusiones obtenidas en la presente investigación, que permitió realizar el ***análisis comparativo del desempeño del enlace de bajada de una red XGS-PON implementando amplificadores híbridos HOA***. La

tabla 4.1, define el comportamiento de las arquitecturas de red propuestas, basadas en amplificaciones híbridas de tipo serie y paralelo, donde se analizaron las principales características de amplificadores híbridos HOA basados en EDFA y Raman, permitiendo desarrollar un modelo de simulación para el enlace de bajada de una red XGS-PON, con el fin de evaluar el desempeño con dispositivos de amplificación híbridos HOA, concluyendo para los autores, que la implementación híbrida en paralelo, aún cuando presenta un nivel medio de complejidad, es la solución que ofrece un desempeño más alto y mayor robustez respecto a los otros casos planteados en la investigación.

Tipo de Disposición Amplificador HOA	Serial/Cascada		Paralela		Mixta	
Mejor Longitud de Onda de Bombeo	EDFA	1480 nm	EDFA	1480 nm	EDFA	1480 nm
Mejor Modo	Raman	1420 nm	Raman	1420 nm	Raman	1420 nm
Mejor bombeo	Booster		Booster		Serie-Paralelo	
Mejor bombeo	EDFA	Bidireccional	EDFA	Bidireccional	EDFA	Bidireccional
	Raman	Co-Propagado	Raman	Co-Propagado	Raman	Co-Propagado
Curva Característica						
Diagrama de Ojo Característico						
Espectro Óptico Característico						
Desempeño del Sistema	Alto		Muy Alto		Medio	
Tolerancia a Degradaciones Ópticas	Presencia de SPM con baja incidencia		Presencia de SPM con baja incidencia		Presencia de SPM con baja incidencia	
Distancia de Transmisión Garantizada	80 km		80 km		150 km	
Máxima Distancia Alcanzada	150 km		380 km		530 km	
Complejidad Configuración	Simple		Medio		Complejo	
Robustez	Muy sensible a cambios		Sensible a cambios		Altamente sensible a cambios	

Simple: Bajo Desempeño y Complejidad  
Baja Sensibilidad

Eficiente: Alto Desempeño, Media Complejidad  
Sensible

Complejo: Alto Desempeño y Complejidad  
Muy Sensible

Ineficiente: bajo Desempeño, Alta Complejidad  
Altamente Sensible

Tabla 4.1. Robustez de la Solución para una red XGS-PON con amplificación HOA.

## 4.2. RECOMENDACIONES

El análisis de desempeño de los amplificadores ópticos híbridos sobre una red XGS-PON, necesita considerar algunas recomendaciones que permitan la obtención y análisis de resultados, como las presentadas a continuación:

- Definir el alcance de la investigación, ya que el desempeño de los amplificadores ópticos en una red con amplificación óptica HOA, varía con respecto a características del sistema como el acceso, longitud de onda y potencia de bombeo, entre otros.
- Determinar qué tipos de amplificadores ópticos van a ser implementados, cuáles configuraciones y la posición de los mismos sobre la red, analizando las variables que deben ser modificadas, de tal forma que genere un cambio representativo en el desempeño de la red.
- Establecer la metodología y el entorno de simulación más adecuados, para garantizar una fácil obtención de resultados y que sean acordes al contexto de desarrollo del trabajo.
- Migrar el software de simulación de redes ópticas a versiones más actuales que permitan el desarrollo de entornos más robustos, teniendo en cuenta que herramientas como OptSim establecen sus propias técnicas y estrategias de simulación.
- Valorar otras alternativas de herramientas de simulación que ofrezcan características similares a OptSim e incluso agreguen algunas que no estén disponibles y no requieran necesariamente de licencia de uso.
- Tener como referencia guías, documentos y tutoriales, además de la explicación de los ejemplos contenidos por defecto, que contienen información sobre los componentes y funcionalidades de la herramienta de simulación OptSim.
- Revisar la bibliografía y documentación disponible acorde al tema de interés para la realización del trabajo de grado, con el fin de ampliar el estado del arte y establecer opciones para lograr el cumplimiento de los objetivos definidos.
- Considerar la variación entre los resultados obtenidos en el simulador OptSim, ya que pueden diferir dependiendo del tamaño de la red y la cantidad de componentes que intervengan en el diseño.

### 4.3. TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo de investigación deja resultados acerca de la implementación de redes XGS-PON con amplificación HOA, que pueden ser tomados como referencia para futuras implementaciones, tales como:

- Evaluar el desempeño a nivel de simulación de una amplificación óptica HOA, con mayor número de canales y diferentes espaciamentos entre canales ópticos (50, 25 y 12.5 GHz) para un entorno de red NG-PON2.
- Analizar el impacto de la amplificación híbrida sobre una red XGS-PON para formatos de modulación complejos.
- Evaluación de amplificaciones HOA en redes ópticas NG-PON2 de ultra largo alcance.
- Análisis de desempeño de amplificadores híbridos Raman-EDFA en banda L, sobre redes NG-PON2.
- Impacto de la amplificación HOA sobre redes XGS-PON haciendo uso de amplificadores ópticos alternativos a SOA, EDFA y Raman (dopados con tierras raras).
- Evaluación de desempeño de un sistema óptico amplificado HOA por efecto de carga máxima de usuarios sobre una red XGS-PON.
- Diseño de un amplificador óptico HOA desde entornos de co-simulación.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] FSAN - FULL-SERVICE ACCESS NETWORK. About FSAN [en línea]. FSAN ©: 2018 [citado 2, noviembre, 2018]. Disponible en internet en: <https://www.fsan.org/>
- [2] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G.983.1. Broadband Optical Access Systems Based on Passive Optical Networks. ITU: 2005.
- [3] FSAN - FULL-SERVICE ACCESS NETWORK. Next Generation PON Task Group [en línea]. FSAN ©: 2019 [citado 9, diciembre, 2020]. Disponible en internet en: <http://www.fsan.org/task-groups/ngpon/>
- [4] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. 987.1. 10-Gigabit-capable Passive Optical Network (XG-PON): General requirements. ITU: 2016.
- [5] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G.9807.1, 10-Gigabit-capable Symmetric Passive Optical Network (XGS-PON). ITU: 2016.
- [6] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G.987, Sistema de red óptica pasiva con capacidad de 10 Gigabit (XG-PON): Definiciones, abreviaturas y sigla”. ITU: 2012.
- [7] SÁNCHEZ ORTEGA, Jhon. Análisis evolutivo de las redes de acceso de fibra óptica GPON – XGPON. Tesis Maestría en Telecomunicaciones. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Ecuador: 2018.
- [8] NEERAJ, S.; SANJAY, K.; MANOJ, S.; ATULKUMAR, S. Introduction of Fiber to the Home Technology [en línea]. Course Hero, 2019 [citado 8, enero, 2021]. Disponible en internet en: <https://www.coursehero.com/file/103735110/fiber-to-the-home-technology-IJERTV1IS9413pdf/>
- [9] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G. 652, Características de las fibras y cables ópticos monomodo. ITU: 2016.
- [10] PROMAX. Estándares de Transmisión para Redes PON [en línea]. PROMAX ©: 2019 [citado 10, diciembre, 2020]. Disponible en internet en: <https://www.promax.es/esp/noticias/562/que-significa-pon-gpon-xg-pon-10g-epon-que-analizadores-son-compatibles-con-ellas/>
- [11] HARDY, S. ITU-T approves XGS-PON, amends NG-PON2 specifications [en línea]. Lightwave: 2016 [citado 10, enero, 2021]. Disponible en internet en: <https://www.lightwaveonline.com/fttx/pon-systems/article/16654061/itut-approves-xgspon-amends-ngpon2-specifications>

- [12] HURTADO RANTES, José Carlos. Amplificadores Ópticos. Mecánica de Medios Continuos. Trabajo final de asignatura. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Perú: 2019.
- [13] WINZER, P.J.; KALMAR, A. and LEEB, W.R. Role of Amplified Spontaneous Emission in Optical Free-space Communication Links with Optical Amplification - Impact on Isolation and Data Transmission; Utilization for Pointing, Acquisition, and Tracking. En: Free-space Laser Communication. Technology XI, 2004, vol. 3615, pág. 134-141.
- [14] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec-G. 661, Definition and Test Methods for the relevant generic Parameters of Optical Amplifier Devices and Subsystems. ITU: 2006.
- [15] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec-G. 662, Características Genéricas de los Dispositivos y Subsistemas de Amplificadores Ópticos. ITU: 2005.
- [16] HUAWEI. EDFA and Raman Amplifier [en línea]. Huawei ®: 2020 [citado 5, febrero, 2021]. Disponible en internet en: [https://info.support.huawei.com/onlinetoolweb/ptmngsys/Web/WDMkg/en/34\\_edfa\\_raman.html](https://info.support.huawei.com/onlinetoolweb/ptmngsys/Web/WDMkg/en/34_edfa_raman.html)
- [17] PÉREZ ALMEIDA, Sergio. Diseño de una Red de Acceso Óptica de larga Distancia y Alta Capacidad en Cundinamarca. Tesis Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá: 2017.
- [18] DiMARZIO, Charles. Optics for Engineers. 1 ed. Boca Ratón: CRC Press, 2011. 564p.
- [19] RAMOS PASCUAL, F. Caracterización de dispositivos fotónicos empleando fuentes de ruido ASE [en línea]. Conectronica: 2009 [citado 16, febero, 2021]. Disponible en internet en: <https://www.conectronica.com/fibra-optica/instrumentos-para-fibra-optica/caracterizacion-de-dispositivos-fotonicos-empleando-fuentes-de-ruido-ase>
- [20] ESPAÑA BOQUERA, M.C. Comunicaciones Ópticas: Conceptos esenciales y resolución de ejercicios. España: Ediciones Diaz de Santos, 2005
- [21] MONTAÑANA, Rogelio. Curso de Telemática y Redes de Ordenadores: Redes Ópticas. Universidad de Valencia. España: FreeLibros.org, 2016
- [22] HERNÁNDEZ CALVARIO, Adrián. Diseño, caracterización e implementación de un amplificador versátil de fibra dopada de erbio. Tesis Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada – CICESE. México: 2010.

- [23] MULTICOM. Products. MUL-EDFA-32-37 – 32 Port High Power 1550nm EDFA [en línea]. Multicom ®: s.f. [citado 23, febero, 2021]. Disponible en internet en: <https://www.multicominc.com/product/multicom-mul-edfa-32-37-32-port-high-power-1550nm-edfa/>
- [24] BOYD, R.W. Nonlinear optics. The institute of Optics. 3 ed. New York: University of Rochester, 2008.
- [25] GUANO, Henry; MOLINA, Pamela y JIMENEZ, María. Estudio y simulación de los efectos no lineales Scattering Estimulado de Brillouin (SBS) y Scattering Estimulado de Raman (SRS) en una fibra óptica monomodo. En: Revista Politécnica, 2014, vol. 33, no. 1.
- [26] MAGAÑA LOYO, Miguel. Amplificador universal raman para equipo OTDR en enlaces ópticos de larga distancia. Tesis Maestría en Tecnología Avanzada. Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación e Innovación Tecnológica, México: 2015.
- [27] MUÑOZ CASTRO, Geovanny. Redes DWDM al usar configuraciones Raman con fibras DCF. En: Sistemas & Telemática, 2017, vol. 15, no. 41, pág. 27-43.
- [28] GRUNER-NIELSEN, L.; QIAN, Y. and GAARDE, P.B. Dispersion compensating fibers for Raman applications. En: Journal Optical Fiber Commun. Reports, 2006, vol. 3, no. 2, pp. 61–89.
- [29] ISLAM, M.N. (Ed.). Raman Amplifiers for telecommunications 2 – sub-systems and systems. Springer Series in Optical Sciences. New York: Springer, 2004, pág. 413-443.
- [30] CISCO. Products and Services. High Power Counter-Propagating and Co-Propagating Raman units for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform (MSTP) [en línea]. Cisco: 2016 [citado 26, febero, 2021]. Disponible en internet en: [https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-series-multiservice-provisioning-platforms/data\\_sheet\\_c78-658538.html](https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-series-multiservice-provisioning-platforms/data_sheet_c78-658538.html)
- [31] SINGH, Simranjit and SINGH Rajinder. Review on recent developments in hybrid optical amplifier for dense wavelength division multiplexed system. En: Optical Enginnering, 2015, vol. 54, no. 10.
- [32] MALIK, Deepak; PAHWA, Kuldeep and WASON, Amit. Performance Optimization of SOA, EDFA, Raman and hybrid optical Amplifiers in WDM Network with reduced channel spacing of 50 GHz. En: Optik, 2016, vol. 127, no. 23, pág. 11131-11137.
- [33] OLIVEIRA, Juliano; MOURA, Uiara; OLIVEIRA, Julio and ROMERO, Murilo. Hybribid distributed Raman/EDFA amplifier with hybrid automatic gain control for reconfigurable WDM optical networks. En: Journal of Microwaves,

Optoelectronics and Electromagnetic Applications, 2013, vol. 12. No. 2. Doi: <https://doi.org/10.1590/S2179-10742013000200028>

- [34] FINISAR. hybrid Raman-EDFA Module [en línea]. Finisar ®: 2016 [citado 7, marzo, 2021]. Disponible en internet en: [https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/finisar\\_amplifier\\_hybrid\\_raman\\_edfa\\_product\\_brief.pdf](https://www.finisar.com/sites/default/files/downloads/finisar_amplifier_hybrid_raman_edfa_product_brief.pdf)
- [35] ESCALLÓN PORTILLA, Andrés y BARRIOS LIS, James. Criterios para el monitoreo del canal óptico y la incidencia de los parámetros que afectan la calidad de la señal óptica en el desempeño de una red metropolitana WDM. Tesis Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: 2008.
- [36] MARULANDA PUNGO, Ana María; PAREDES CERÓN, Paola. Análisis de desempeño a nivel de simulación, de amplificadores ópticos para un entorno de red DWDM XGS-PON. Tesis Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: 2019.
- [37] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec-G. 652, Características de las fibras y cables ópticos monomodo. ITU: 2016.
- [38] MARTÍNEZ, José Luis. La dispersión Cromática [Blog en línea]. Prored Comunicaciones. Parque Tecnológico de Valencia. España: 20, diciembre, 2018 [citado 7, abril, 2020]. Disponible en internet en: <https://www.prored.es/la-dispersion-cromatica/>.
- [39] Del RIO, Carmina y RODRÍGUEZ, Paloma. Fibras ópticas: Interacción dispersión-chirp en sistemas ópticos modulados directamente. En: Óptica pura y aplicada, 2013, vol. 46, no. 3, pág. 231-247.
- [40] HOYOS HORMIGA, Kelly J. y VÉLEZ GIRALDO, Joan Sebastián. Impacto de las propiedades de una fibra compensadora de dispersión (DCF) en el diseño de un sistema WDM. Tesis Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: 2013.
- [41] VERIZON. Banda Ancha [en línea]. Verizon ©: 2019 [citado 21, marzo, 2021]. Disponible en internet en: <https://espanol.verizon.com/info/definitions/broadband/#:~:text=La%20banda%20ancha%20es%20la,de%20carga%20de%203%20Mbps>
- [42] LÓPEZ PERAFÁN, J.G.; TOLEDO TOVAR, A.; ORDOÑEZ, H. y AGREDO, J.P. Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM. En: Revista Facultad de Ingeniería UPTC, 2011, vol. 20, no. 31, pág. 23-35.

- [43] ORDOÑEZ MENDIETA, Ángel José. Diseño y simulación de los efectos de FWM en una red UDWDM PON. Tesis Maestría en Redes de Comunicación. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Ecuador: 2015.
- [44] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G.655, Características de los cables y fibras ópticas monomodo con dispersión desplazada no nula. ITU: 2010.
- [45] GONZÁLES GARCIA, Andrés. Análisis de Atenuación, Dispersión y Automodulación de Fase en sistemas de comunicaciones de único canal por fibra óptica a 10 Gbps. Tesis Maestría en Ciencias ópticas. Centro de Investigaciones en Óptica, A.C. México: 2007.
- [46] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. Rec. G. 697, Supervision Óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa. ITU: 2016.
- [47] GRIJALBA, J.F. y GÓMEZ AGREDO, G.A. Análisis del desempeño de formatos de modulación en comunicaciones ópticas sobre redes WDM. Tesis Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: 2010.
- [48] ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. G. Sup 39, Consideraciones sobre diseño e ingeniería de sistemas ópticos. ITU: 2016.
- [49] DELGADO ENCINAS, Luis Miguel. Diseño e implementación de un módem con modulación QPSK. Universidad Politécnica de Valencia. España: 2011.
- [50] GÓMEZ AGREDO, Gustavo Adolfo. Mejora de la eficiencia espectral en redes DWDM a 40Gbps a través de los formatos de modulación avanzados DPSK y DQPSK. Tesis Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: Colombia, 2010.
- [51] TELLO MARCOS, Diego. Análisis de técnicas de monitorización en redes ópticas pasivas (PON) y desarrollos en la monitorización con radiofrecuencia en redes WDM-PON. Tesis Ingeniería de Sistemas de Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid. España: 2016.
- [52] POGGIOLO, P. Aplicación Práctica del Método P.E.R.T. España: Editores Técnicos Asociados S.A., 1976.
- [53] FIGUEROA MARTÍNEZ, José y PRIETO ÁLVAREZ, Carlos. Adaptación de las metodologías tradicionales cascada y espiral para la inclusión de evaluación inicial de Usabilidad en el desarrollo de productos de software en México. Tesis Maestría en Medios Interactivos. Universidad Tecnológica de la Mixteca, México. 2015.

- [54] RAMOS PASCUAL, Francisco. Herramienta de simulación interactiva y de bajo coste para el desarrollo de laboratorios virtuales de comunicaciones ópticas. Ponencia. Universidad Politécnica de Valencia. España. 2010.
- [55] RSOFT. OptSim User Guide. RSoft Design Group Inc., Physical Layer Division. 2009.
- [56] BOLAÑOS PÉREZ, Juan David y LÉON ESCOBAR, Juan Sebastián. Impacto sobre la densidad espectral de información (ISD) en el cambio de una red DWDM de 10 Gbps a 40 Gbps implementando los formatos CSNRZ-OOK y CSRZ-OOK. Tesis Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones. Universidad del Cauca. Popayán: 2017.
- [57] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. OPNET: Manual de usuario. Barcelona. 2004.
- [58] GARCÍA C., Gibrán. Metodología de Simulación: Etapas de un proyecto de simulación [en línea]. Naps Tecnología y Educación: 2017 [citado 19, abril, 2021]. Disponible en internet en: <https://naps.com.mx/blog/metodologia-de-simulacion-etapas-de-un-proyecto-de-simulacion>
- [59] FULLANA BELDA, Carmen y URQUÍA GRANDE, Elena. Los modelos de simulación: Una herramienta multidisciplinar de investigación. En: Encuentros Multidisciplinares, 2009, no. 32.
- [60] THE FRONTIER POST. Bussines. PTCL in Collaboration with Huawei deploys first XGS-PON and QuickODN [en línea]. The Frontier Post ©: 2020 [citado 5, mayo, 2021]. Disponible en internet en: <https://thefrontierpost.com/ptcl-in-collaboration-with-huawei-deploys-first-xgs-pon-and-quickodn/>
- [61] HUAWEI. Explicación y funcionamiento del combo de XG(S)-PON [en línea]. Huawei Inc. ©: 2019 [citado 7, mayo, 2021]. Disponible en internet en: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/explicación-y-funcionamiento-del-combo-de-xg-s-pon/thread/551333-100243>
- [62] MACHO ORTIZ, Andrés. Estudio y caracterización de un modulador Electroóptico Mach-Zender. Instrumentación fotónica – TFB. Universidad Politécnica de Madrid. España: 31, mayo, 2012.
- [63] FOA – THE FIBER OPTICS ASSOCIATION INC. Sistemas de Transmisión por fibra óptica y sus componentes [en línea]. FOA: 2014 [citado 2, mayo, 2021]. Disponible en internet en: <https://www.thefoa.org/ESP/Sistemas.htm>
- [64] QUINTANILLA, Cleofé. Materiales que han cambiado nuestra vida [Blog en línea]. Nmateriales. Bolgger: 2012 [citado 10, mayo, 2021]. Disponible en internet en: [nmateriales.blogspot.com/2012/02/la-fibra-optica-cleofe-quintanilla-1.html](http://nmateriales.blogspot.com/2012/02/la-fibra-optica-cleofe-quintanilla-1.html)

- [65] FOCC TECHNOLOGY. Cómo diseñar su relación y nivel de división de red FTTH [en línea]. Fibersplitter: 2, septiembre, 2019 [citado 12, mayo, 2021]. Disponible en internet en: [www.fibersplitter.com/info/how-to-design-your-ftth-network-splitting-leve-39135623.html](http://www.fibersplitter.com/info/how-to-design-your-ftth-network-splitting-leve-39135623.html)
- [66] PLAZAS IRREÑO, Danilo. Una aproximación a la compensación de la PMD de primer orden en redes ópticas de transporte. Tesis Especialización en Telecomunicaciones móviles. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá: 2019.
- [67] BAEZ VELASCO, E.V.; TIMARÁN GÓMEZ, J.S.; LÓPEZ PERAFÁN, J.G. Compensación de Dispersión Cromática mediante la técnica de pre-chirping negativo utilizando moduladores Mach-Zender de tipo single y dual drive. En: Vector, 2017, vol. 12, pág. 5-14.
- [68] ALZATE C., D.F.; CÁRDENAS, A. Retos en la transmisión de 40/100 Gb/s sobre fibra óptica. . En: Revista en Telecomunicaciones e Informática. Universidad Pontificia Bolivariana, 2011, vol. 1, No. 2, pág. 23-60.
-

# LICENCIA



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

### Bajo los siguientes términos:



**Atribución** — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



**NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.



**SinDerivadas** — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.



Universidad  
del Cauca

Esta obra está publicada bajo una Licencia  
[Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas  
4.0 Internacional](#)

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO A**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO A. MÉTRICAS DE DISPOSITIVOS ÓPTICOS COMERCIALES

### LÁSER DE ONDA CONTINUA – LÁSER CW

El primer dispositivo que se usa en el diseño del enlace es un láser CW del fabricante Furukawa. En la tabla A.1, se muestran los parámetros de configuración que posee este dispositivo, el cual opera en un rango de longitud de onda de 1470 nm hasta 1610 nm, además trabaja en las bandas C y L, el cual se puede utilizar en sistemas de 10 Gbps y superiores, con variación de potencia entre los 10 mW y 40 mW. Adicionalmente, posee parámetros que se muestran a continuación:

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Nombre	Furukawa FRL15DCWA-A8x-xxxxx
Banda	C y L
Canales	8
Longitud de Onda	1470 nm a 1610 nm
Temperatura de Operación	MIN: 20 °C MAX: 35°C
Potencia de Salida Óptica	10 mw(A) – 20 mw(B) - 40 mW (D)
Corriente Directa	80 mA (A) – 150 mA (B) – 300 mA (D)
Voltaje Directo	1.8 V (A,B) – 2.5 V (D)
Corriente Limite	Típica : 15 mA Max : 40 mA
Longitud De Onda	Min : $\lambda$ ITU - 0,1 Típico : $\lambda$ ITU Max : $\lambda$ ITU + 0,1
Ancho de Banda	Estándar: 10 MHz - 5 MHz (op. A) – 2 MHz (op. B) – 1 MHz (op. C)

Tabla A.1. Parámetros del Laser CW del fabricante Furukawa [1].

En el programa simulador OptSim se encuentra disponible el bloque del láser CW con características similares para la configuración de parámetros principales, de los cuales los más importantes son la potencia del láser y frecuencia de operación. Se encuentran varios parámetros de configuración modificables, sin embargo, no fueron modificados debido a la afectación que estos pueden presentar en el funcionamiento del enlace. La figura A.1, muestra la configuración del dispositivo en el software de simulación OptSim.

Parameter	Value	Units	Range
Center emission frequency	= 195.5	THz	[ 195, 196 ]
Center emission wavelength	1533.46526	nm	[ 1529.55336, 1537.39...
Source Status	1		[ 0, 1 ]
CW Power	0.0	dBm	[ -3000, 3000 ]
CW Power	1.0	mW	( 0, Inf )
FWHM Linewidth	10.0	MHz	[ 0, Inf )
-20 dBm Linewidth	99.49874	MHz	[ 0, Inf )
Initial Phase	"Deterministic"		
Deterministic Initial Phase	0.0	rad	[ 0, 6.28319 ]
Noise Type	"Realistic"		
Relaxation Oscillation peak Frequency	5.0	MHz	( 0, Inf )
Relaxation Oscillation Peak Overshoot	7.0	dB	( 0, Inf )

Figura A.1. Parámetros OptSim Laser CW [2]

## FIBRA OPTICA MONOMODO FURUKAWA

Para la implementación del enlace se hizo uso de la fibra óptica del fabricante Furukawa SM332. Las características presentadas en el datasheet del fabricante son muy similares a las encontradas en el módulo de fibra óptica del simulador OptSim. Los parámetros de la fibra óptica más relevantes son los presentados en la Tabla A.2.

PARAMETRO	DESCRIPCION
Modelo	Furukawa SM332
Longitud de Onda (Seleccionada una LO)	1550 nm
Máxima Atenuación Óptica (1550 nm)	0.25 dB/km
Temperatura de Operación	-60°C a 75°C
Dispersión Cromática	18 ps/nm*km

Tabla A.2. Parámetros Fibra Óptica del fabricante Furukawa [3].

## AMPLIFICADOR DE FIBRA DOPADO DE ERBIO – EDFA

El amplificador tipo EDFA implementado es diseñado por el fabricante Huatai para sistemas de transmisión óptica WDM en banda C o L. Presenta gran rendimiento óptico, avanzada tecnología de control electrónico y completas funcionalidades software. La Tabla A.3, muestra las variables del dispositivo, el cual posee ganancia óptima entre 22 dB a 36 dB cuando la potencia de entrada es de -30 dBm a 3 dBm.

PARAMETRO	DESCRIPCION
Modelo	FGA4400-FM05 Hangzhou Huatai Optic Tech [4]
Banda	C y L
Rango Longitud de Onda	1529.16 nm – 1563.86 nm
Número de Canales de Trabajo	44 CH
Potencia de Entrada	Min: -30 dBm Max:+3 dBm
Potencia de Salida Saturada	Min: 22 dBm Max: 24 dBm
Ganancia	Min: 22 dB Max: 36 dB
Figura de Ruido	4.7 dB
PGD	0.3 dB
PMD	0.3 ps
Temperatura de Operación	-5°C a +70°C

Tabla A.3. Parámetros Amplificador EDFA del fabricante Huatai

En OptSim se encuentra un módulo que simula un amplificador tipo EDFA, este es adecuado para poder fijar fácilmente los niveles de las ganancias a lo largo del enlace, también es de gran utilidad para realizar simulaciones de manera más eficiente y también llevar a cabo comprobaciones de los parámetros del sistema. En la Figura 1.2, se aprecian parámetros como la ganancia del amplificador y figura de ruido. Respecto a los parámetros que proporciona el fabricante, OptSim permite modificar dichas variables de configuración, lo que conlleva a que se generen diferentes grados de libertad, permitiendo de este modo obtener distintos análisis sobre el efecto del amplificador sobre el enlace óptico.

El amplificador EDFA proporciona la implementación de modelos ópticos de alto rendimiento y bajo costo para sistemas DWDM de gran cantidad de canales, además de proporcionar características adicionales que otros modelos en relación

al ruido, ganancia, configuración de bombeo y la señal, entregando diferentes niveles de complejidad para la implementación sobre una red óptica.

Parameter	Value	Units	Range
Doped Fiber Length	19.0	m	( 0, Inf )
Input Insertion Loss	1.2	dB	[ 0, Inf )
Output Insertion Loss	0.8	dB	[ 0, Inf )
Co-propagating pump	"Yes"		
Power	PotEDFA	dBm	[ -3000, 3000 ]
Power	1.0	mW	( 0, Inf )
Wavelength	1480	nm	( 0, Inf )
Frequency	202.56247	THz	( 0, Inf )
Counter-propagating pump	"No"		
Power	16.0	dBm	[ -3000, 3000 ]
Power	39.81072	mW	( 0, Inf )

Figura A.2. Parámetros Configuración OptSim Amplificador EDFA.

## AMPLIFICADOR DE FIBRA RAMAN – RFA

La implementación de amplificadores RFA investigados, destacó dos tipos de dispositivos según su diseño: Amplificador Raman Discreto o Agrupado (LRA) y Amplificador Raman Distribuido (DRA). En el caso del discreto o agrupado, el fabricante Huatai ofrece un amplificador Raman que proporciona ganancia óptica en redes DWDM de ultra larga distancia, además de utilizarse en redes CATV para aumentar la distancia de transmisión de canales digitales y analógicos, este tipo de amplificador puede contar hasta con cinco láseres de bombeo, lo que permite obtener al mismo tiempo, alta eficiencia y bajo consumo de energía. Los parámetros que se van a considerar para las simulaciones, basándose en este fabricante, se especifican en la Tabla A.4.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Modelo	RFA5000 Hangzhou Huatai Optic Tech [5]
Banda	C
Longitud de Onda	1528 nm – 1653 nm
Potencia de transmisión óptica de bombeo	400 mW
Ganancia Raman	Min: 11 dB Típica: 12 dB Max: 13 dB
Figura de Ruido	0 dB
PMD	0.2 ps
Temperatura de Operación	0°C a 60°C

Tabla A.4. Parámetros Amplificador RAMAN del fabricante Huatai.

Contrario a los módulos de dispositivos EDFA y SOA, el software de simulación OptSim no presenta módulos de amplificación Raman RFA. De esta forma, se implementa dicho dispositivo con modelos de fibra no lineales, como fibras DCF que permiten configurar parámetros como atenuación, dispersión, perfiles de ganancia y ruido Raman, así como aspectos de las fuentes de bombeo Raman tales como potencia, frecuencia, atenuación y dispersión Raman como las mostradas en la Tabla A.5. De esta manera es posible simular un amplificador RFA con esquemas de bombeo Co-Propagado o Contra-Propagado.

PARAMETRO	UNIDADES	DCF
Perdidas de la fibra ( $\alpha$ )	dB/km	0.55
Dispersión	ps/nm/km	-93.0
Coefficiente no lineal ( $\gamma$ )	1/w/km	12.0
Área principal efectiva ( $A_{eff}$ )	$\mu m^2$	20.0
Índice no lineal refractivo ( $n_2$ )	$m^2/w$	5.9e-20

Tabla A.5 Características ópticas de DCF para LRA [6].

La Figura A.3, presenta los parámetros de configuración implementados en el software de simulación OptSim.

Parameter	Value	Units	Range
Raman Amplifier	"On"		
Raman Gain and Noise Spectra Plots	"On"		
Signal and Pumps Power Evolution along f...	"Off"		
No Raman Noise	"Off"		
Operating temperature	300	K	[ 0, Inf )
Single Pumping	"Yes"		
Raman Pump Type	"Co-propagating"		
Pump Power	PotRAMAN	dBm	[ -3000, 3000 ]
Pump Power	1.0	mW	( 0, Inf )
Pump Frequency	211.12145	THz	( 0, Inf )
Pump Wavelength	1420	nm	( 0, Inf )
Pump Attenuation	1.2	dB/Km	[ 0, Inf )
Multi-Pumping	"No"		

Figura A.3 Parámetros Configuración OptSim Amplificador Raman.

Los amplificadores Raman discretos o LRA, pueden ser configurados en modo Booster, Pre-Amplificación o En-línea, en el enlace de transmisión [7, 8].

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] FURUKAWA FITEL, "Wavelength Selected CW DFB Laser Module", 2016 [Online]. Available: <https://www.datasheetarchive.com/FRL15DCWx-A8x-Wxxxx-x-datasheet.html>. [Accessed: 26-Jun-2020].
- [2] SYNOPSIS, "OptSim Product Overview", 2020 [Online]. Available: <https://www.synopsis.com/optical-solutions/rsoft/System-network-optsim.html>. [Accessed: 10-Jun-2020].
- [3] FURUKAWA FITEL, "Optical Fiber Loose Tube Cable", 2017 [Online]. Available: [https://www.furukawa.co.jp/en/product/catalogue/pdf/fiber-loose-f\\_e.pdf](https://www.furukawa.co.jp/en/product/catalogue/pdf/fiber-loose-f_e.pdf). [Accessed: 26-Jun-2020].
- [4] L.HANGZHOU HUATAI OPTIC TECH. CO., "FGA4400-FM05 C-Band DWDM FGA Full Function Module Fixed Gain EDFA Module", 2019. [Online]. Available: [http://www.catvworld.net/products/edfa\\_module/FGA4400FM05/datasheet.htm](http://www.catvworld.net/products/edfa_module/FGA4400FM05/datasheet.htm). [Accessed: 29-Jun-2020].

- [5]** L.HANGZHOU HUATAI OPTIC TECH. CO., “RFA5000 C-Band Separate Raman Fiber Amplifier”, 2019. [Online]. Available: <http://www.catvworld.net/products/raman/rfa5000/index.htm>. [Accessed: 29-Jun-2020].
- [6]** H. Zhang, “Lumped fiber Raman amplifiers with highly nonlinear fiber”, tesis de máster, Concordia University, 2005.
- [7]** RSoft Design Group, “OptSim Models Reference Volume II Block Mode”, 2010.
- [8]** Kjaer and Rasmus, “Raman amplification in optical communication systems”, tesis doctoral, Technical University of Denmark, 2008.

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO B**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO B. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA DOPADA CON ERBIO EN UN AMPLIFICADOR EDFA

Dentro de los parámetros del modelo EDFA físico se encuentra la longitud de fibra dopada con erbio (EDF), que teóricamente debe medir de 10 m a 60 m para EDFAs de banda C, y 50 m a 300 m para los de banda L [1]. Si esta longitud es demasiado grande, la fibra reabsorbe la señal y si es muy corta puede absorber muy poca energía de la bomba, el valor de longitud óptimo aumenta con la potencia de la bomba y disminuye con la potencia de la señal [2]. En este anexo, se varía la longitud de la fibra dopada con el fin de determinar su incidencia en el desempeño de la red, obteniendo los OPM de la Tabla B.1, para el canal 195.5 THz para el caso del sistema de amplificación EDFA  $1\lambda \times 10$  Gbps.

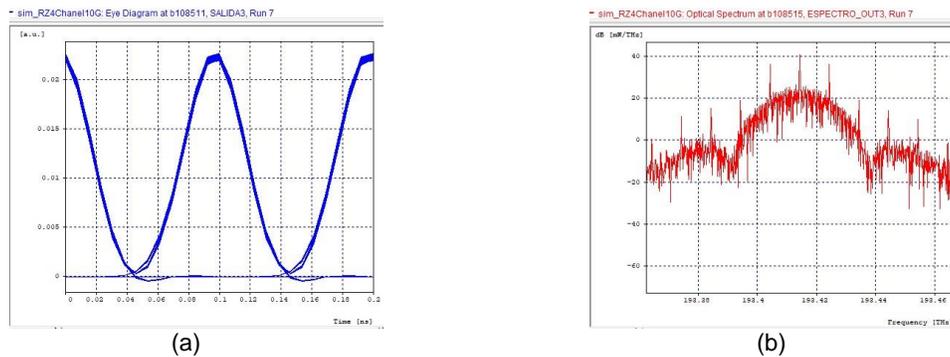


Figura B.1. (a) Diagrama del ojo (b) Espectro óptico, EDFA en línea  $1\lambda \times 10$  Gbps

Para este análisis, se tuvo en cuenta las diferentes configuraciones del amplificador y de la fuente de bombeo, estableciendo la potencia de bombeo en 10 dBm, con la cual el amplificador presenta buen desempeño. En la Figura 1.1 (a) y (b) se observa el diagrama y espectro óptico de la longitud establecida por el fabricante de referencia del EDFA de modelo físico (16 m) para  $1\lambda$ , donde no se presentan degradaciones en el diagrama del ojo ni no-linealidades en el espectro y cumplen los OPM objetivo.

Fuente	Frecuencia 980 nm						Frecuencia 1480 nm					
	L [dBm]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Prx [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	L [dBm]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Prx [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
<b>Modo Booster</b>												
Co-Propagación	9	1e-40	40.00	0	-14.94	50.39	9	1e-40	40.00	0	-14.56	49.60
	16	1e-40	40.00	0	-14.99	50.41	16	1e-40	40.00	0	-13.16	50.55
	17	1e-40	39.36	0	-15.05	51.64	17	1e-40	40.00	0	-13.15	50.16
Contra-Propagación	5	1e-40	40.00	0	-15.02	50.82	5	1e-40	35.55	0	-19.13	51.96
	9	1e-40	32.99	0	-27.07	47.58	9	1e-40	40.0	0	-12.50	50.16
	16	1e-40	29.47	0	-20.81	45.45	16	1e-40	31.45	0	-19.49	49.74
Bidireccional	13	1e-40	40.00	0	-11.39	50.28	13	1e-40	40.00	0	-9.92	48.73
	16	1e-40	40.00	0	-11.44	50.11	16	1e-40	40.00	0.0009	-9.58	48.67
	21	1e-40	40.00	0	-11.59	49.47	21	1e-40	40.00	0	-9.48	48.22
<b>Modo Pre-Amplificado</b>												
Co-Propagación	7	1e-40	29.78	0	-2.47	39.37	7	1e-40	28.74	0.0009	-10.87	38.40
	16	1e-40	30.03	0	0.03	41.47	16	1e-40	29.01	0	1.28	40.53
	21	1e-40	30.43	0	-0.43	40.63	21	1e-40	29.37	0	1.59	39.69
Contra-Propagación	5	1e-40	30.01	0	-7.53	40.30	5	1e-40	28.61	0	-16.79	39.35
	9	1e-40	29.65	0	2.43	40.73	9	1e-40	29.34	0	-5.44	40.42
	16	1e-40	24.35	0.0024	4.16	36.23	16	1e-40	27.81	0	4.43	39.43
Bidireccional	9	1e-40	30.37	0	2.51	41.36	9	1e-40	29.39	0	-4.62	40.47
	11	1e-40	30.35	0.0009	3.29	39.17	11	1e-40	29.40	0.0013	-0.24	38.29
	16	1e-40	29.92	0	3.57	41.38	16	1e-40	28.97	0	4.39	40.51
<b>Modo En-Línea</b>												
Co-Propagación	11	1e-40	40.00	0	1.27	52.63	11	1e-40	40.00	0	2.42	51.55
	16	1e-40	40.00	0	1.11	51.08	16	1e-40	40.00	0	3.00	48.13
	17	1e-40	40.00	0	1.05	49.99	17	1e-40	40.00	0	3.00	48.58
Contra-Propagación	5	1e-40	40.00	0	1.79	50.76	5	1e-40	38.73	0	-6.39	48.02
	7	1e-40	37.51	0	3.89	50.01	7	1e-40	40.00	0	0.28	53.31
	16	1e-40	30.98	0	7.75	39.42	16	1e-40	34.35	0	8.83	49.20
Bidireccional	13	1e-40	40.00	0	4.78	49.81	13	1e-40	40.00	0	6.41	48.90
	16	1e-40	40.00	0	4.72	49.69	16	1e-40	40.00	0.0009	6.69	51.15
	19	1e-40	40.00	0	4.64	53.80	19	1e-40	40.00	0	6.72	49.37

Tabla B.1. OPM dependientes de la longitud de fibra dopada, EDFA de 1λ x 10 Gbps.

En la Tabla B.2, se encuentra la comparación de los valores ideales de la longitud de fibra dopada en cada modo de amplificación y escenario de simulación estudiado. De acuerdo con los parámetros de monitoreo óptico en la mayoría de los casos la longitud que brinda el mejor desempeño del amplificador es 21 m, bajo la configuración de bombeo bidireccional, ya sea de 980 nm o 1480 nm. Se observa que la mejor longitud corresponde a valores mayores que 19 m o menores que 7 m. Sin embargo, distancias inferiores a 10 m no son válidas para amplificadores de banda C. Por otra parte, para valores mayores a 10 m no se obtuvieron OPM desfavorables, aunque los mejores son en las distancias mayores, con la distancia del fabricante seleccionado (16 m) se logra un buen desempeño en  $1\lambda \times 10$  Gbps y se obtiene unos parámetros ideales, BER de  $1e-40$ , factor Q de 40 dB y jitter de 0.

Modo de Amplificación	$1\lambda \times 10$ Gbps
Booster	21 m, bombeo Bidireccional de 1480 nm
Pre-Amplificado	21 m, bombeo Co-Propagado de 980 nm
En-Línea	19 m, bombeo Bidireccional de 1480 nm

Tabla B.2. Valor ideal de longitud de la fibra dopada en las diferentes configuraciones para  $1\lambda \times 10$  Gbps.

La variación de la longitud se realizó dejando fija la potencia de bombeo en 10 dBm y no en la que establece el fabricante de referencia que equivale a 20.60 dBm, debido a que si se emplea esta última el desempeño era muy malo sin importar cuanto se varía la longitud de la fibra, concluyendo que el desempeño es indiferente a la variación de este parámetro y es sensible a la potencia de bombeo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Martín Ramos, "Complejos de erbio (III) e iterbio (III) con ligandos fluorados para aplicaciones fotónicas en Telecomunicaciones: EDFAs y YEDFAs", tesis de pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad de Valladolid, 2010.
- [2] R. C. Giles and E. Desurvire, "Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers", *J. Light. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 271–283, 1991.

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO C**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO C. INFLUENCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA EN UN AMPLIFICADOR LRA

Es necesario seleccionar la longitud de la fibra DCF que se utiliza como medio de ganancia para el Amplificador Raman Discreto o Agrupado (LRA). Hay 2 factores importantes que se deben tener en cuenta para elegir dicha longitud: por un lado, cuanto más largo es el DCF, se requiere menos potencia de bombeo para garantizar cierto nivel de amplificación, pero cuanto más largo es el DCF, más significativas son las degradaciones de la señal amplificada causadas por el surgimiento de la no linealidad de la fibra. Por lo anterior, es esencial encontrar el equilibrio entre la eficiencia de amplificación y la cantidad de distorsiones de señal amplificada [1]. Se debe tener en cuenta que, un amplificador Raman discreto típico tiene menos de 15 km de longitud, mientras que un DRA tiene al menos 40 km de longitud [2]. Se obtuvieron resultados para un sistema RFA de  $1\lambda \times 10$  Gbps con un valor de bombeo fijo de 30 dBm (fabricante) [3].

La Tabla C.1, muestra los mejores resultados de cada configuración, en los cuales se observa que los mejores pertenecen a la longitud de 7 km. Sin embargo, estos apuntan a otros valores dentro del rango, como a 3 km, esto brinda cierta flexibilidad para escoger un valor de longitud, ya que los mejores resultados se obtienen en diferentes rangos y no se concentran solo en un valor en todos los casos.

Longitud de la Fibra DCF para LRA $1\lambda \times 10$ Gbps	
Modo de Amplificación	Escenario de Simulación
<b>Booster</b>	7 km, bombeo Contra-Propagado, $\lambda = 1420$ nm
<b>Pre</b>	7 km, bombeo Co-Propagado, $\lambda = 1420$
<b>En línea</b>	3 km, bombeo Contra-Propagado, $\lambda = 1420$

Tabla C.1. Valores óptimos de longitud de la fibra DCF para LRA.

En la Tabla C.2, se observa los cambios en los valores de OPM al variar la longitud en un rango de 1 a 19 km, con diferencia de 2 km entre cada medición. Se resalta que se obtienen buenos resultados de BER y factor Q y que los mejores resultados de OPM se obtienen, en todos los modos de amplificación, para una fuente de bombeo bidireccional con una frecuencia de 1455 nm.

Fuente	Frecuencia 1420 nm						Frecuencia 1455 nm					
	L [dBm]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Prx [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]	L [dBm]	BER	Factor Q [dB]	Jitter [ns]	Prx [dBm]	OSNR <sub>OUT</sub> [dB]
<b>Modo Booster</b>												
Co-Propagación	3	1.4e-32	21.70	0.0033	-25.67	43.78	3	1e-40	35.97	0.0009	-17.11	43.94
	5	6.2e-24	20.12	0.0037	-24.74	46.22	5	1e-40	31.10	0.002	-13.82	44.50
	15	0.0227	6.02	0.0228	-27.39	40.01	15	0.022	6.02	0.017	-12.57	38.84
Contra-Propagación	3	1.3e-32	21.70	0.0033	-25.67	43.79	3	1e-40	35.84	0.0016	-17.09	43.67
	5	2.6e-23	20.06	0.0040	-24.74	46.52	5	1e-40	31.01	0.0026	-13.87	43.75
	15	0.0227	6.02	0.0218	-27.40	40.46	15	0.0227	6.02	0.0185	-12.93	40.85
Bidireccional	3	2.0e-26	20.60	0.0029	-25.66	44.12	<b>3</b>	<b>1e-40</b>	<b>37.02</b>	<b>0.0018</b>	<b>-11.99</b>	<b>43.45</b>
	5	8.4e-24	20.01	0.0040	-24.73	46.17	5	1e-40	30.82	0.0025	-12.09	43.62
	15	0.0227	6.02	0.0214	-27.40	40.07	15	0.0227	6.02	0.0187	-11.92	40.57
<b>Modo Pre-Amplificado</b>												
Co-Propagación	3	5.7e-30	21.14	0.0035	-25.60	43.14	3	1e-40	28.10	0.0030	-16.91	38.57
	5	8.6e-19	18.87	0.0038	-24.63	40.48	5	1e-40	25.06	0.0035	-13.01	38.82
	15	0.0227	6.02	0.0144	-27.29	32.58	15	0.0227	6.020	0.0187	-12.10	34.06
Contra-Propagación	3	1.8e-33	21.70	0.0035	-25.62	42.90	3	1e-40	28.10	0.0030	-16.91	38.57
	5	4.2e-20	19.22	0.0040	-24.70	40.58	5	1e-40	25.06	0.0035	-13.01	38.82
	15	0.0227	6.02	0.0184	-27.37	36.51	15	0.0227	6.020	0.0187	-12.10	34.06
Bidireccional	3	5.3e-29	21.05	0.0038	-25.62	38.58	<b>3</b>	<b>1e-40</b>	<b>29.48</b>	<b>0.0032</b>	<b>-5.35</b>	<b>39.03</b>
	5	6.2e-19	18.91	0.0038	-24.67	41.04	5	1e-40	26.01	0.0030	-3.87	41.50
	15	0.0227	6.02	0.0221	-27.34	34.35	15	0.0227	6.02	0.0191	-3.88	37.10
<b>Modo En-Línea</b>												
Co-Propagación	3	3.0e-27	20.75	0.0036	-21.01	39.36	1	1e-40	31.83	0.0009	-18.51	40.52
	5	0.0219	6.08	0.0204	-19.04	37.22	3	1.2e-37	22.11	0.0036	-3.76	42.23
	15	0.0227	6.02	0.0213	-24.47	36.25	15	0.0227	6.020	0.0218	4.96	38.97
Contra-Propagación	3	2.0e-27	20.77	0.0036	-21.02	39.47	1	1e-40	31.84	0.0009	-18.52	40.52
	5	0.0206	6.25	0.0209	-19.06	39.09	3	2.5e-36	21.95	0.0036	-3.72	42.10
	15	0.0227	6.02	0.0201	-24.49	37.05	15	0.0227	6.02	0.0230	3.95	38.98
Bidireccional	3	3.1e-38	22.21	0.0036	-21.03	40.48	<b>1</b>	<b>1e-40</b>	<b>40.00</b>	<b>0.0009</b>	<b>-5.86</b>	<b>41.75</b>
	5	0.0227	6.02	0.0186	-19.06	38.07	3	7.1e-20	19.34	0.0207	5.81	42.47
	15	0.0227	6.02	0.0210	-24.54	38.33	15	0.0227	6.02	0.0207	5.45	39.13

Tabla C.2. Parámetros de monitoreo óptico dependientes de la longitud de fibra DCF, LRA con 1λ x 10 Gbps

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. Bobrovs, S. Olonkins, A. Alsevska, L. Gegere, and G. Ivanovs, "Comparative performance of Raman-SOA and Raman-EDFA hybrid optical amplifiers in DWDM transmission systems", *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 8, no. 39, pp. 1898–1906, 2013.
- [2] M. N. Islam, "Raman amplifiers for telecommunications", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 8, no. 3, pp. 548–559, 2002.
- [3] Optilab, "5 Channels Raman Laser Source, Rackmount", 2019. [Online]. Available:  
[http://legacy.optilab.com/products/category/Raman\\_Amplifier/5\\_Channels\\_Raman\\_Laser\\_Source\\_Rackmount/](http://legacy.optilab.com/products/category/Raman_Amplifier/5_Channels_Raman_Laser_Source_Rackmount/). [Accessed: 05-Jul-2019].

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO D**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO D. AMPLIFICACIÓN SERIE/CASCADA EDFA-RAMAN PARA 1 CANAL A 10 GBPS, BOMBEO CO-PROPAGADO, CONTRA-PROPAGADO Y BIDIRECCIONAL

En este anexo, se consignan los resultados de la amplificación EDFA-Raman en serie/cascada para los diferentes tipos de bombeo y modos de amplificación implementados en la herramienta de simulación OptSim, para resultados evaluados en las diferentes combinaciones de longitud de onda de operación de los dispositivos EDFA como Raman.

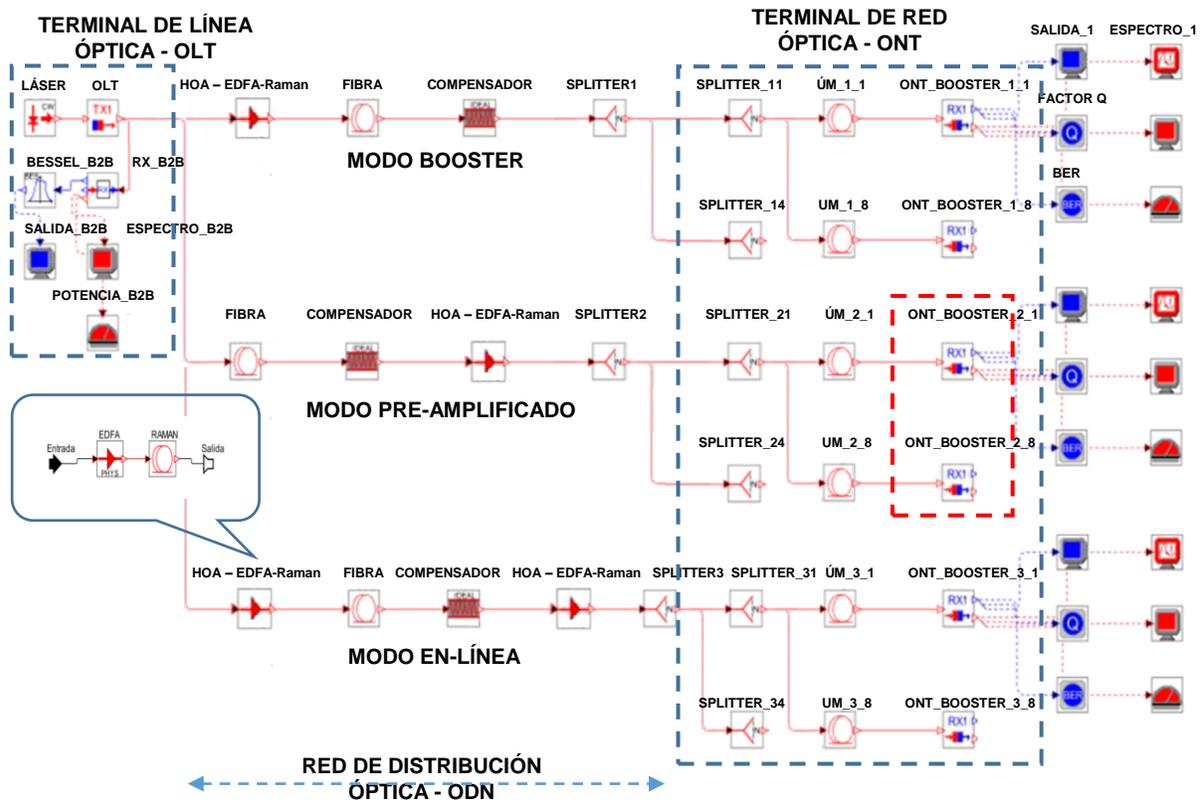


Figura D.1. Escenario de Simulación Amplificación EDFA-Raman a 10 Gbps.

Se configura el sistema con amplificación EDFA-Raman como se muestra en la Figura D.1, considerando los modos de amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, además de los tipos de bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, con el fin de determinar los parámetros de monitoreo óptico mínimos considerados para el funcionamiento de una red XGS-PON.

**Caso 1. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado.**

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-46,594	2	20	8,39026	4,31E-03	-31,07	4	20	27,42827	1,00E-40	-21,564
	22	6,0206	2,28E-02	-46,193		22	9,22291	2,17E-03	-30,682		22	28,50707	1,00E-40	-21,179
	24	6,0206	2,28E-02	-45,594		24	11,7713	6,96E-05	-30,075		24	28,69683	1,00E-40	-20,567
	26	6,0206	2,28E-02	-44,585		26	12,8156	6,89E-06	-29,105		26	30,47239	1,00E-40	-19,6
	28	6,0206	2,28E-02	-43,048		28	15,73648	1,02E-09	-27,568		28	32,08875	1,00E-40	-18,069
	30	6,0206	2,28E-02	-40,606		30	20,66832	7,39E-26	-25,125		30	34,44653	1,00E-40	-15,619
	32	6,0206	2,28E-02	-36,728		32	26,85195	1,00E-40	-21,257		32	36,69839	1,00E-40	-11,771
	34	9,13018	2,14E-03	-30,629		34	33,23314	1,00E-40	-15,141		34	33,37105	1,00E-40	-5,675
36	18,10471	4,77E-16	-20,893	36	31,7887	1,00E-40	-5,487	36	19,48417	2,31E-21	3,232			
6	20	34,22036	1,00E-40	-17,466	8	20	36,73318	1,00E-40	-14,477	10	20	38,10493	1,00E-40	-11,946
	22	34,7534	1,00E-40	-17,08		22	35,99394	1,00E-40	-14,095		22	38,1389	1,00E-40	-11,557
	24	34,64091	1,00E-40	-16,478		24	36,9273	1,00E-40	-3,487		24	37,99473	1,00E-40	-10,949
	26	35,38614	1,00E-40	-15,502		26	37,41625	1,00E-40	-12,52		26	37,80798	1,00E-40	-9,985
	28	36,61697	1,00E-40	-13,972		28	36,85165	1,00E-40	-10,989		28	36,66257	1,00E-40	-8,46
	30	36,91891	1,00E-40	-11,538		30	36,23059	1,00E-40	-8,566		30	34,13199	1,00E-40	-6,048
	32	35,17389	1,00E-40	-7,697		32	32,10439	1,00E-40	-4,747		32	29,12668	1,00E-40	-2,277
	34	28,10425	1,00E-40	-1,689		34	26,95348	1,00E-40	1,041		34	20,20839	1,10E-24	2,962
36	9,12164	2,67E-03	5,885	36	7,05252	1,37E-02	6,974	36	6,0206	2,28E-02	8,684			

Tabla 1.1. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-45,659	2	20	10,39541	4,73E-04	-30,365	4	20	28,01661	1,00E-40	-20,989
	22	6,0206	2,28E-02	-44,931		22	12,35687	2,31E-05	-29,614		22	28,77468	1,00E-40	-20,241
	24	6,0206	2,28E-02	-43,73		24	14,028003	2,73E-07	-2,4843		24	31,4318	1,00E-40	-19,049
	26	6,0206	2,28E-02	-41,85		26	17,97138	1,77E-15	-26,54		26	33,42446	1,00E-40	-17,17
	28	6,0206	2,28E-02	-38,822		28	23,75324	1,00E-40	-23,564		28	35,18535	1,00E-40	-14,195
	30	6,0206	2,28E-02	-34,145		30	29,84423	1,00E-40	-18,845		30	35,98995	1,00E-40	-9,494
	32	14,96238	1,09E-08	-26,635		32	33,2676	1,00E-40	-11,33		32	28,44471	1,00E-40	-2,166
	34	18,5935	8,37E-18	-14,782		34	26,3646	1,00E-40	-0,124		34	8,62552	5,62E-03	6,671
36	16,48347	8,61E-12	2,794	36	6,63497	1,47E-02	7,284	36	6,0206	2,28E-02	11,57			
6	20	34,63861	1,00E-40	-16,873	8	20	37,56744	1,00E-40	-13,831	10	20	37,85033	1,00E-40	-11,393
	22	34,68615	1,00E-40	-16,134		22	37,01944	1,00E-40	-13,084		22	38,03429	1,00E-40	-10,65
	24	36,00267	1,00E-40	-14,942		24	37,16655	1,00E-40	-11,909		24	37,62407	1,00E-40	-9,475
	26	36,48263	1,00E-40	-13,067		26	37,90907	1,00E-40	-10,038		26	36,50115	1,00E-40	-7,614
	28	37,02235	1,00E-40	-10,105		28	36,07455	1,00E-40	-7,087		28	32,29748	1,00E-40	-4,691
	30	33,20055	1,00E-40	-5,435		30	29,67672	1,00E-40	-2,573		30	27,74126	1,00E-40	-0,228
	32	27,044931	1,00E-40	1,565		32	17,51038	2,71E-14	3,619		32	29,12668	3,19E-05	5,065
	34	6,0206	2,28E-02	8,025		34	6,0206	2,28E-02	9,173		34	6,0206	2,28E-02	9,988
36	6,0206	2,28E-02	11,716	36	6,0206	2,28E-02	12,408	36	6,0206	2,28E-02	12,514			

Tabla D.2. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-35,48	2	20	25,83363	1,00E-40	-22,735	4	20	32,75716	1,00E-40	-18,27
	22	6,0206	2,28E-02	-35,093		22	25,69889	1,00E-40	-22,349		22	33,8083	1,00E-40	-17,876
	24	6,0206	2,28E-02	-34,482		24	27,15997	1,00E-40	-21,738		24	33,68061	1,00E-40	-17,267
	26	6,0206	2,28E-02	-33,515		26	27,86046	1,00E-40	-20,764		26	34,5341	1,00E-40	-16,301
	28	7,89919	6,86E-03	-31,973		28	30,21946	1,00E-40	-19,228		28	36,29242	1,00E-40	-14,765
	30	11,66445	8,27E-05	-29,535		30	33,2146	1,00E-40	-16,797		30	36,71784	1,00E-40	-12,334
	32	19,64919	9,53E-22	-25,661		32	35,0069	1,00E-40	-12,941		32	35,4141	1,00E-40	-8,49
	34	29,13459	1,00E-40	-19,536		34	34,44651	1,00E-40	-6,836		34	29,15142	1,00E-40	-2,448
36	32,42522	1,00E-40	-9,855	36	24,16431	1,00E-40	2,364	36	10,55368	2,62E-04	5,446			
6	20	35,95344	1,00E-40	-15,129	8	20	37,57958	1,00E-40	-12,578	10	20	38,07623	1,00E-40	-10,255
	22	36,57714	1,00E-40	-14,747		22	36,75744	1,00E-40	-12,199		22	37,6496	1,00E-40	-9,873
	24	36,23265	1,00E-40	-14,135		24	36,96122	1,00E-40	-11,585		24	37,79915	1,00E-40	-9,264
	26	36,55189	1,00E-40	-13,178		26	37,00727	1,00E-40	-10,622		26	37,33022	1,00E-40	-8,303
	28	37,18231	1,00E-40	-11,637		28	36,3963	1,00E-40	-9,093		28	35,97403	1,00E-40	-6,783
	30	37,67989	1,00E-40	-9,149		30	34,33133	1,00E-40	-6,678		30	32,60409	1,00E-40	-4,389
	32	33,35966	1,00E-40	-5,32		32	29,36157	1,00E-40	-2,888		32	28,46277	1,00E-40	-0,692
	34	27,45702	1,00E-40	0,488		34	22,43653	4,35E-38	2,55		34	15,6574	9,39E-10	4,021
36	6,14619	2,46E-02	6,823	36	6,0606	2,28E-02	8,361	36	6,0206	1,68E-02	9,396			

Tabla D.3. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-34,888	2	20	25,29892	1,00E-40	-22,128	4	20	32,76535	1,00E-40	-17,618
	22	6,0206	2,28E-02	-38,089		22	27,05556	1,00E-40	-21,37		22	33,42492	1,00E-40	-16,864
	24	6,06257	2,23E-02	-32,901		24	29,32913	1,00E-40	-20,183		24	35,09697	1,00E-40	-15,686
	26	8,82431	2,90E-03	-31,03		26	30,74612	1,00E-40	-18,298		26	35,57099	1,00E-40	-13,812
	28	15,45825	1,65E-09	-28,028		28	33,92444	1,00E-40	-15,322		28	35,62155	1,00E-40	-10,836
	30	24,01969	1,00E-40	-23,32		30	34,80605	1,00E-40	-10,62		30	33,73929	1,00E-40	-6,157
	32	29,76534	1,00E-40	-15,862		32	29,77873	1,00E-40	-3,254		32	27,35384	1,00E-40	0,941
	34	29,63117	1,00E-40	-4,339		34	9,259395	3,55E-03	6,106		34	6,43542	2,11E-02	7,424
36	8,80776	1,00E-40	6,327	36	6,0206	2,28E-02	11,163	36	6,0206	2,28E-02	11,415			
6	20	35,75606	1,00E-40	-14,549	8	20	37,19867	1,00E-40	-11,936	10	20	37,5903	1,00E-40	-9,64
	22	35,44846	1,00E-40	-13,801		22	37,09262	1,00E-40	-11,194		22	37,16639	1,00E-40	-8,899
	24	36,24917	1,00E-40	-12,618		24	36,62508	1,00E-40	-10,02		24	36,46791	1,00E-40	-7,726
	26	36,12173	1,00E-40	-10,749		26	35,797	1,00E-40	-8,157		26	34,18606	1,00E-40	-5,883
	28	35,35559	1,00E-40	-7,795		28	32,19316	1,00E-40	-5,226		28	30,26074	1,00E-40	-2,997
	30	29,79004	1,00E-40	-3,17		30	27,30732	1,00E-40	-0,719		30	27,19792	1,00E-40	1,247
	32	19,2337	3,89E-20	3,242		32	12,8171	5,64E-06	4,771		32	8,9226	1,71E-03	5,957
	34	6,43108	1,94E-02	8,968		34	6,0206	2,28E-02	9,465		34	6,0206	2,28E-02	10,454
36	6,0206	2,28E-02	12,097	36	6,0606	2,28E-02	12,378	36	6,0206	2,28E-02	12,365			

Tabla D.4. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-35,085	2	20	6,0206	2,28E-02	-31,078	4	20	25,75635	1,00E-40	-10,9
	22	6,0206	2,28E-02	-34,739		22	6,7044	1,59E-02	-30,686		22	25,7518	1,00E-40	-10,513
	24	6,0206	2,28E-02	-34,095		24	7,44963	9,92E-13	-30,066		24	25,79196	1,00E-40	-9,903
	26	6,0206	2,28E-02	-33,141		26	9,74994	1,09E-03	-29,077		26	25,79718	1,00E-40	-8,932
	28	6,0206	2,28E-02	-31,542		28	10,94249	2,46E-04	-27,553		28	25,65436	1,00E-40	-7,398
	30	6,53096	1,69E-02	-29,046		30	16,21061	1,13E-10	-25,14		30	25,70903	1,00E-40	-4,957
	32	10,02093	8,78E-04	-25,211		32	17,94372	6,56E-15	-21,239		32	25,66842	1,00E-40	-1,097
	34	10,43297	4,21E-04	-19,066		34	18,85495	2,16E-18	-15,087		34	25,5343	1,00E-40	5,027
36	10,86879	2,07E-04	-9,237	36	19,21576	5,99E-20	-5,341	36	25,43124	1,00E-40	14,044			
6	20	25,43506	1,00E-40	-5,031	8	20	25,24689	1,00E-40	-1,503	10	20	27,05072	1,00E-40	1,254
	22	25,43999	1,00E-40	-4,646		22	25,24009	1,00E-40	-1,118		22	27,03649	1,00E-40	1,639
	24	25,4288	1,00E-40	-4,034		24	25,21532	1,00E-40	-0,508		24	27,07544	1,00E-40	2,249
	26	25,52313	1,00E-40	-3,065		26	25,2476	1,00E-40	4,061		26	27,00988	1,00E-40	3,215
	28	25,41924	1,00E-40	-1,529		28	25,25329	1,00E-40	1,995		28	27,04554	1,00E-40	4,746
	30	25,49353	1,00E-40	0,904		30	25,35902	1,00E-40	4,424		30	27,00811	1,00E-40	7,169
	32	25,44226	1,00E-40	4,759		32	25,36291	1,00E-40	8,266		32	26,96163	1,00E-40	10,991
	34	25,52579	1,00E-40	10,846		34	25,63364	1,00E-40	14,298		34	27,02707	1,00E-40	16,933
36	25,71959	1,00E-40	20,16	36	24,75194	1,00E-40	23,019	36	19,49554	2,45E-20	24,494			

Tabla D.5. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-34,448	2	20	7,17729	1,09E-02	-30,471	4	20	25,84939	1,00E-40	-10,284
	22	6,0206	2,28E-02	-33,706		22	7,93873	6,30E-03	-29,712		22	25,84109	1,00E-40	-9,13
	24	6,0206	2,28E-02	-32,46		24	9,99909	8,30E-04	-28,487		24	25,70554	1,00E-40	-8,342
	26	6,0206	2,28E-02	-30,609		26	12,95528	5,13E-06	-26,603		26	25,56515	1,00E-40	-6,468
	28	7,84406	6,96E-03	-27,652		28	16,00365	1,30E-10	-23,625		28	25,56588	1,00E-40	-3,485
	30	10,35768	5,14E-04	-22,867		30	18,06924	5,15E-16	-18,869		30	25,80182	1,00E-40	1,234
	32	10,63188	3,71E-04	-15,363		32	18,23	4,16E-16	-11,404		32	25,50553	1,00E-40	8,666
	34	10,86551	2,37E-04	-3,56		34	18,56664	2,99E-17	0,465		34	25,37812	1,00E-40	19,797
36	11,19903	1,44E-04	15,065	36	19,17435	1,92E-19	18,809	36	6,42602	2,51E-02	25,277			
6	20	25,50389	1,00E-40	-4,412	8	20	25,19401	1,00E-40	-0,893	10	20	26,76661	1,00E-40	1,863
	22	25,61697	1,00E-40	-3,663		22	25,21613	1,00E-40	-0,143		22	26,78813	1,00E-40	2,608
	24	25,50883	1,00E-40	-2,477		24	25,1837	1,00E-40	1,038		24	26,77876	1,00E-40	3,788
	26	25,4869	1,00E-40	-0,6		26	25,20226	1,00E-40	2,911		26	26,80991	1,00E-40	5,655
	28	25,45767	1,00E-40	2,372		28	25,26359	1,00E-40	5,874		28	26,83234	1,00E-40	8,6
	30	25,55041	1,00E-40	7,068		30	25,31541	1,00E-40	10,531		30	26,81675	1,00E-40	13,201
	32	25,56369	1,00E-40	14,379		32	25,99382	1,00E-40	17,644		32	26,97523	1,00E-40	20
	34	23,94355	1,00E-40	23,994		34	13,16994	3,03E-06	24,51		34	8,97497	4,53E-03	23,99
36	6,73621	1,91E-02	25,895	36	6,14244	2,50E-02	25,654	36	6,0206	2,28E-02	25,941			

Tabla D.6. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-42	2	20	23,4128	1,00E-40	-12,465	4	20	24,50885	1,00E-40	-5,821
	22	6,0206	2,28E-02	-41,233		22	23,40223	1,00E-40	-12,079		22	24,45135	1,00E-40	-5,436
	24	6,0206	2,28E-02	-41,212		24	23,41973	1,00E-40	-11,466		24	24,45336	1,00E-40	-4,824
	26	6,0206	2,28E-02	-40,241		26	23,49322	1,00E-40	-10,495		26	24,49703	1,00E-40	-3,854
	28	6,0206	2,28E-02	-38,541		28	23,07194	1,00E-40	-8,96		28	24,4429	1,00E-40	-2,318
	30	6,0206	2,28E-02	-35,933		30	23,24262	1,00E-40	-6,521		30	24,44987	1,00E-40	0,115
	32	6,0206	2,28E-02	-32,102		32	23,38711	1,00E-40	-2,66		32	24,33042	1,00E-40	3,977
	34	8,51724	4,92E-03	-25,944		34	23,44488	1,00E-40	3,464		34	24,42936	1,00E-40	10,072
36	11,01481	2,21E-04	-16,062	36	23,61887	1,00E-40	13,121	36	24,22058	1,00E-40	19,467			
6	20	24,14702	1,00E-40	-2,172	8	20	23,98279	1,00E-40	0,683	10	20	25,7002	1,00E-40	3,121
	22	24,15741	1,00E-40	-1,786		22	23,98395	1,00E-40	1,068		22	25,67813	1,00E-40	3,504
	24	24,17226	1,00E-40	-1,175		24	23,97153	1,00E-40	1,679		24	25,66916	1,00E-40	4,114
	26	24,15644	1,00E-40	-0,207		26	23,9769	1,00E-40	2,646		26	25,68997	1,00E-40	5,079
	28	24,20639	1,00E-40	1,327		28	24,00037	1,00E-40	4,176		28	25,6624	1,00E-40	6,606
	30	24,16792	1,00E-40	3,757		30	24,02189	1,00E-40	6,603		30	25,65172	1,00E-40	9,022
	32	24,20261	1,00E-40	7,604		32	24,16502	1,00E-40	10,43		32	25,67698	1,00E-40	12,823
	34	24,28766	1,00E-40	13,654		34	24,61148	1,00E-40	16,398		34	25,78115	1,00E-40	18,662
36	24,11287	1,00E-40	22,527	36	20,38891	8,71E-25	24,274	36	10,79349	2,96E-04	24,055			

Tabla D.7. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-41,542	2	20	24,27831	1,00E-40	-11,851	4	20	25,35471	1,00E-40	-5,197
	22	6,0206	2,28E-02	-40,714		22	24,14151	1,00E-40	-11,1		22	25,32786	1,00E-40	-4,45
	24	6,0206	2,23E-02	-39,461		24	24,54525	1,00E-40	-9,915		24	25,35853	1,00E-40	-3,263
	26	6,0206	2,23E-02	-37,494		26	24,32817	1,00E-40	-8,032		26	25,34999	1,00E-40	-1,385
	28	6,0206	2,23E-02	-34,57		28	24,43485	1,00E-40	-5,05		28	25,44415	1,00E-40	1,589
	30	6,0206	2,23E-02	-29,732		30	24,35394	1,00E-40	-0,331		30	25,50023	1,00E-40	6,288
	32	10,14757	5,67E-04	-22,114		32	24,38507	1,00E-40	7,123		32	25,51486	1,00E-40	13,637
	34	10,52174	3,68E-04	-10,284		34	23,73544	1,00E-40	18,459		34	23,54595	1,00E-40	23,576
36	11,59254	8,59E-05	8,414	36	7,07664	1,20E-02	25,078	36	6,16287	3,18E-02	25,627			
6	20	24,39001	1,00E-40	-1,563	8	20	26,01225	1,00E-40	1,318	10	20	25,60126	1,00E-40	5,995
	22	24,40492	1,00E-40	-0,816		22	26,0274	1,00E-40	2,064		22	25,57053	1,00E-40	6,734
	24	24,39069	1,00E-40	0,37		24	26,03288	1,00E-40	3,245		24	25,64297	1,00E-40	7,903
	26	24,40935	1,00E-40	2,245		26	26,0336	1,00E-40	5,114		26	25,71376	1,00E-40	9,747
	28	24,44359	1,00E-40	5,209		28	25,94184	1,00E-40	8,064		28	25,86859	1,00E-40	12,634
	30	24,58728	1,00E-40	9,885		30	26,004	1,00E-40	12,686		30	26,34338	1,00E-40	17,039
	32	25,02419	1,00E-40	17,057		32	26,21105	1,00E-40	19,573		32	25,86954	1,00E-40	22,852
	34	14,15637	3,82E-07	24,266		34	8,01959	8,35E-03	23,657		34	6,0206	2,28E-02	23,942
36	6,0206	2,28E-02	25,747	36	6,0606	2,28E-02	25,981	36	6,0206	2,28E-02	26,159			

Tabla D.8. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,02060	2,28E-02	-42,2330	2	20	23,41280	1,00E-40	-12,4650	4	20	24,50885	1,00E-40	-5,8210
	22	6,02060	2,28E-02	-41,9320		22	23,40332	1,00E-40	-12,0790		22	24,45135	1,00E-40	-5,4360
	24	6,02060	2,28E-02	-41,2120		24	23,41973	1,00E-40	-11,4660		24	24,45336	1,00E-40	-4,8240
	26	6,02060	2,28E-02	-40,2410		26	23,49322	1,00E-40	-10,4950		26	24,49703	1,00E-40	-3,8540
	28	6,02060	2,28E-02	-38,5410		28	23,07194	1,00E-40	-8,9600		28	24,44290	1,00E-40	-2,3180
	30	6,02060	2,28E-02	-35,9330		30	23,24262	1,00E-40	-6,5210		30	24,44987	1,00E-40	0,1150
	32	6,02060	2,28E-02	-32,1020		32	23,38711	1,00E-40	-2,6600		32	24,33042	1,00E-40	3,9770
	34	8,51724	4,27E-03	-25,9440		34	23,44488	1,00E-40	3,4640		34	24,42936	1,00E-40	10,0720
36	11,01481	4,39E-03	-16,0620	36	23,61887	1,00E-40	13,1210	36	24,22058	1,00E-40	19,4670			
6	20	24,14702	1,00E-40	-2,1720	8	20	23,98279	1,00E-40	0,6830	10	20	25,70020	1,00E-40	3,1210
	22	24,15741	1,00E-40	-1,7860		22	23,98395	1,00E-40	1,0680		22	25,67813	1,00E-40	3,5040
	24	24,17266	1,00E-40	-1,1750		24	23,97153	1,00E-40	1,6790		24	25,66916	1,00E-40	4,1140
	26	24,15644	1,00E-40	-0,2070		26	23,97690	1,00E-40	2,6460		26	25,68997	1,00E-40	5,0790
	28	24,20639	1,00E-40	1,3270		28	24,00037	1,00E-40	4,1760		28	25,66240	1,00E-40	6,6060
	30	24,16792	1,00E-40	3,7570		30	24,02189	1,00E-40	6,6030		30	25,65172	1,00E-40	9,0220
	32	24,20261	1,00E-40	7,6040		32	24,16502	1,00E-40	10,4300		32	25,67698	1,00E-40	12,8230
	34	24,28766	1,00E-40	13,6540		34	24,61148	1,00E-40	16,3980		34	25,78115	1,00E-40	18,6620
36	24,11287	1,00E-40	22,5270	36	20,38891	3,82E-16	24,2740	36	10,79349	2,45E-20	24,0550			

Tabla D.9. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,02060	2,28E-02	-41,5420	2	20	24,27831	1,00E-40	-11,8510	4	20	25,35471	1,00E-40	-5,1970
	22	6,02060	2,28E-02	-40,7140		22	24,14151	1,00E-40	-11,1000		22	25,32786	1,00E-40	-4,4500
	24	6,02060	2,28E-02	-39,4610		24	24,54525	1,00E-40	-9,9150		24	25,35853	1,00E-40	-3,2630
	26	6,02060	2,28E-02	-37,4940		26	24,32817	1,00E-40	-8,0320		26	25,34999	1,00E-40	-1,3850
	28	6,02060	2,28E-02	-34,5700		28	24,43485	1,00E-40	-5,0500		28	25,44415	1,00E-40	1,5890
	30	6,05697	2,61E-02	-29,7320		30	24,35394	1,00E-40	-0,3310		30	25,50023	1,00E-40	6,2880
	32	10,14757	5,67E-04	-22,1140		32	24,39507	1,00E-40	7,1230		32	25,51486	1,00E-40	13,6370
	34	10,52174	3,68E-04	-10,2840		34	23,73544	1,00E-40	18,4590		34	23,54595	1,00E-40	23,5760
36	11,59254	8,59E-05	8,4140	36	7,07664	1,20E-02	25,0780	36	6,16287	3,18E-02	25,6270			
6	20	24,39001	1,00E-40	-1,5630	8	20	26,01225	1,00E-40	1,3180	10	20	25,18520	1,00E-40	3,7360
	22	24,40492	1,00E-40	-0,8160		22	26,02740	1,00E-40	2,0640		22	25,17608	1,00E-40	4,4790
	24	24,39069	1,00E-40	0,3700		24	26,03288	1,00E-40	3,2450		24	25,21717	1,00E-40	5,6560
	26	24,40935	1,00E-40	2,2450		26	26,03360	1,00E-40	5,1140		26	25,19731	1,00E-40	7,5150
	28	24,44359	1,00E-40	5,2090		28	25,94184	1,00E-40	8,0640		28	25,30000	1,00E-40	10,4410
	30	24,58728	1,00E-40	9,8850		30	26,00400	1,00E-40	12,6820		30	25,38149	1,00E-40	14,9800
	32	25,02419	1,00E-40	17,0570		32	26,21105	1,00E-40	19,5730		32	25,39422	1,00E-40	21,4400
	34	14,15637	3,82E-07	24,2660		34	8,01959	8,35E-03	23,6570		34	7,13504	1,78E-02	23,8100
36	6,02060	2,28E-02	25,7470	36	6,02060	2,28E-02	25,9810	36	6,02060	2,28E-02	26,0550			

Tabla D.10. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,27E-02	-52,111	2	0	18,60835	7,21E-18	-12,036	4	0	19,43947	6,22E-21	-5,152
	2	6,02060	2,27E-02	-51,962		2	18,42679	6,14E-17	-12,067		2	19,45459	3,09E-21	-5,144
	4	6,02060	2,27E-02	-52,301		4	18,75751	5,20E-18	-12,040		4	19,77706	2,60E-22	-5,129
	6	6,02060	2,27E-02	-52,067		6	18,97138	1,33E-18	-12,027		6	19,53376	1,11E-21	-5,131
	8	6,02060	2,27E-02	-51,954		8	20,25464	1,37E-22	-12,025		8	19,61985	5,53E-20	-5,109
	10	6,02060	2,27E-02	-52,073		10	19,12714	6,05E-18	-11,957		10	19,71721	1,78E-20	-5,078
	12	6,02060	2,27E-02	-51,956		12	18,87512	9,38E-18	-11,922		12	19,83333	3,15E-21	-5,036
	14	6,02060	2,27E-02	-51,575		14	19,05259	1,32E-19	-11,842		14	19,72130	1,06E-20	-4,959
	16	6,02060	2,27E-02	-51,263		16	19,10178	4,63E-19	-11,700		16	19,92546	2,75E-21	-4,848
	18	6,02060	2,27E-02	-50,922		18	19,87694	1,34E-21	-11,492		18	19,44352	1,27E-19	-4,688
20	6,02060	2,27E-02	-53,592	20	18,79754	1,40E-18	-11,179	20	19,64467	4,16E-21	-4,415			
6	0	19,23230	1,54E-18	-1,504	8	0	18,64182	1,48E-16	1,297	10	0	17,29773	1,34E-13	3,720
	2	19,42141	1,68E-19	-1,506		2	18,61414	1,84E-16	1,300		2	17,23467	1,74E-13	3,724
	4	19,06363	1,56E-18	-1,493		4	18,35302	1,26E-15	1,307		4	17,43102	9,84E-14	3,731
	6	19,26714	9,54E-19	-1,485		6	18,46645	9,51E-16	1,312		6	17,25250	2,14E-13	3,742
	8	19,68783	1,06E-20	-1,481		8	18,50484	8,13E-16	1,326		8	17,34266	1,80E-13	3,759
	10	19,33443	5,67E-19	-1,445		10	18,29444	3,22E-15	1,362		10	17,13567	2,99E-13	3,778
	12	19,20574	1,82E-18	-1,413		12	18,58705	3,92E-16	1,390		12	17,17457	2,49E-13	3,824
	14	19,46005	6,64E-20	-1,336		14	18,29395	1,95E-15	1,465		14	17,32632	3,59E-13	3,882
	16	19,25307	1,49E-18	-1,233		16	18,25599	2,63E-15	1,556		16	17,24401	4,37E-13	3,986
	18	19,12597	2,15E-18	-1,074		18	18,11524	1,28E-14	1,721		18	16,90104	1,71E-12	4,140
20	19,22715	5,31E-19	-0,813	20	18,22183	2,14E-15	1,971	20	16,98149	8,53E-12	4,391			

Tabla D.11. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Co-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,27E-02	-52,228	2	0	18,96836	3,26E-19	-12,042	4	0	19,70555	1,78E-21	-5,126
	2	6,02060	2,27E-02	-52,005		2	18,90934	1,30E-18	-12,034		2	19,89394	1,43E-21	-5,126
	4	6,02060	2,27E-02	-52,163		4	19,03221	2,62E-19	-12,017		4	19,36062	9,03E-21	-5,116
	6	6,02060	2,27E-02	-52,050		6	19,03468	8,29E-18	-11,995		6	19,61082	4,72E-20	-5,093
	8	6,02060	2,27E-02	-51,731		8	19,67331	2,43E-21	-11,975		8	19,81766	1,05E-20	-5,075
	10	6,02060	2,27E-02	-51,720		10	19,08714	1,10E-19	-11,908		10	20,10248	4,67E-22	-5,011
	12	6,02060	2,27E-02	-51,946		12	18,52294	3,17E-17	-11,796		12	20,09946	2,03E-22	-4,921
	14	6,02060	2,27E-02	-51,384		14	18,65478	2,04E-17	-11,620		14	19,83328	9,72E-22	-4,794
	16	6,02060	2,27E-02	-53,855		16	19,38738	4,06E-19	-11,366		16	20,31339	1,77E-23	-4,575
	18	6,02060	2,27E-02	-53,092		18	20,01207	9,34E-22	-10,950		18	20,01967	4,99E-22	-4,239
20	6,02060	2,27E-02	-51,965	20	19,30726	1,44E-20	-10,345	20	19,79000	3,52E-22	-3,740			
6	0	19,41521	1,52E-19	-1,493	8	0	18,67319	5,58E-17	1,293	10	0	17,28752	1,17E-13	3,731
	2	19,15376	2,77E-19	-1,495		2	18,49269	5,51E-16	1,301		2	17,29930	1,24E-13	3,735
	4	19,12871	4,29E-18	-1,478		4	18,41039	1,23E-15	1,320		4	17,16895	2,53E-13	3,746
	6	19,12564	2,76E-18	-1,451		6	18,15895	9,30E-15	1,340		6	17,30213	1,19E-13	3,761
	8	19,28737	3,84E-19	-1,429		8	18,50711	4,00E-16	1,370		8	17,29414	1,71E-13	3,796
	10	19,35598	2,06E-19	-1,380		10	18,42104	6,11E-16	1,420		10	17,06969	4,51E-13	3,845
	12	19,40972	1,79E-19	-1,296		12	18,39603	1,39E-15	1,503		12	17,25903	2,27E-13	3,921
	14	19,40922	2,79E-19	-1,175		14	18,47305	4,29E-16	1,618		14	17,25285	8,66E-13	4,042
	16	19,16793	9,61E-19	-0,980		16	18,35598	4,00E-16	1,811		16	17,12315	2,45E-12	4,238
	18	19,42772	4,45E-19	-0,654		18	18,35078	4,31E-16	2,126		18	16,79714	7,43E-12	4,545
20	19,04099	2,94E-18	-0,155	20	18,14867	1,33E-15	2,611	20	16,82647	1,36E-11	5,025			

Tabla D.12. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Los resultados de la configuración de los diferentes modos de amplificación con el tipo de bombeo Co-Propagado y las diferentes combinaciones de longitud de onda para dispositivos EDFA y Raman fueron consignadas en las tablas D.1 a D.12, donde se encontraron los mejores resultados para una amplificación serie/cascada en modo Booster para longitudes de onda EDFA de 1480 nm y Raman de 1420 nm, alcanzando resultados de Factor Q y BER superiores a los mínimos requeridos para el correcto funcionamiento de una red óptica como se observa en la recomendación G.697 de la ITU-T y presentados en tabla D.4. La figura D.2(a), muestra los diagramas espectrales para uno de los mejores rangos de potencia de bombeo EDFA-Raman, donde se observa un ensanchamiento de los espectros en recepción con respecto al transmitido, el cual es un indicativo de la presencia de Automodulación de Fase – SPM en el sistema óptico amplificado. Además, se observa que en el rango de potencia Raman 32-36 dBm se pierde la forma espectral alcanzada en variaciones inferiores de la misma.

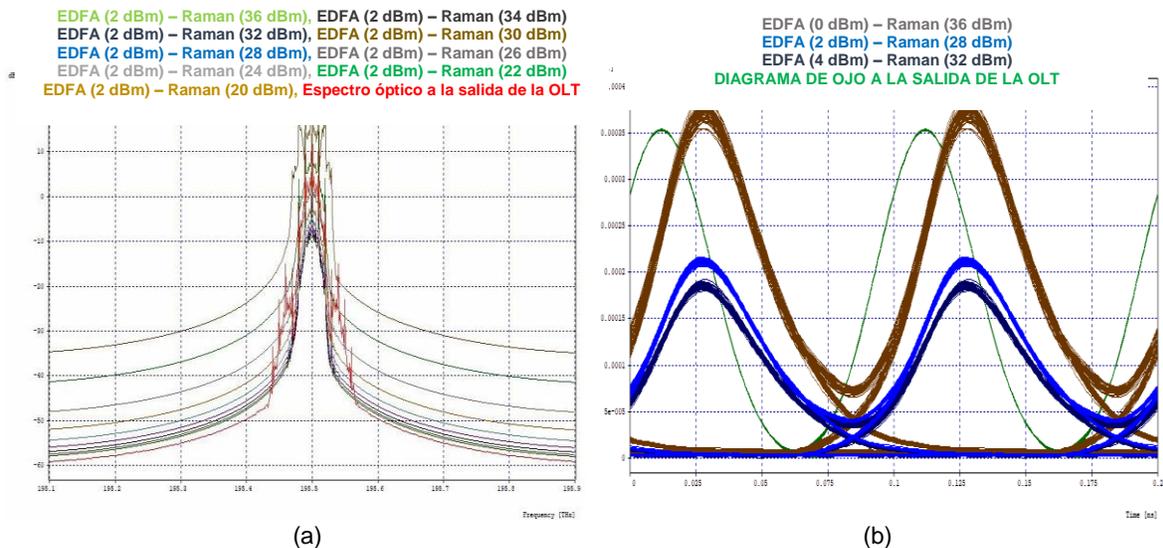


Figura D.2. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Serie/Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Se observa en la Figura D.2 (b), un desfase entre las señales recibidas para rangos donde se obtuvieron resultados OPM superiores a los mínimos requeridos para el funcionamiento de un sistema óptico, el cual determina la presencia de SPM en el sistema y es calculado por medio del proceso presentado en el Anexo F. Este fenómeno puede determinar la pérdida de datos en la comunicación óptica, sin embargo, el sistema óptico implementa una modulación en amplitud, no en fase.

### Caso 2. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Contra-Propagado.

Modo Booster, Bombeo Contra-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-48,918	2	20	8,93305	2,54E-03	-28,958	4	20	10,30956	4,77E-04	-24,975
	22	6,0206	2,28E-02	-48,556		22	8,31575	4,49E-03	-28,572		22	10,32991	4,51E-03	-24,588
	24	6,0206	2,28E-02	-47,905		24	8,61477	4,62E-03	-27,959		24	10,92327	2,31E-04	-23,976
	26	6,0206	2,28E-02	-46,949		26	10,09475	7,99E-04	-26,992		26	10,84797	2,17E-04	-23,007
	28	6,0206	2,28E-02	-45,391		28	10,01763	6,96E-04	-25,454		28	11,11764	1,38E-04	-21,47
	30	6,0206	2,28E-02	-42,94		30	10,57666	3,09E-04	-23,017		30	11,24782	1,30E-04	-19,041
	32	6,0206	2,28E-02	-39,015		32	11,14962	2,32E-04	-19,152		32	11,21833	1,67E-04	-15,183
	34	6,0206	2,14E-03	-32,922		34	11,0109	2,23E-04	-13,035		34	11,23916	2,05E-04	-9,118
36	6,0206	4,77E-16	-23,221	36	10,25091	6,66E-04	-3,562	36	9,95844	9,26E-04	-0,012			
6	20	15,85675	5,83E-10	-21,884	8	20	17,82682	9,67E-15	-18,922	10	20	20,05884	5,17E-24	-16,317
	22	16,22536	9,91E-11	-21,497		22	17,5441	5,74E-14	-18,543		22	20,21713	1,43E-24	-15,942
	24	16,15915	5,89E-11	-20,885		24	17,73671	2,52E-14	-17,927		24	19,95456	1,98E-23	-15,323
	26	16,45787	3,29E-11	-19,919		26	17,91243	3,99E-15	-16,967		26	20,09833	2,56E-24	-14,355
	28	16,39089	2,10E-11	-18,387		28	17,89147	1,92E-15	-15,425		28	20,19652	7,59E-24	-12,826
	30	16,50606	1,35E-11	-15,949		30	17,87812	5,32E-15	-12,999		30	20,23091	2,53E-24	-10,403
	32	16,49745	2,42E-11	-12,099		32	17,79614	9,16E-15	-9,162		32	20,10983	1,54E-23	-6,583
	34	6,0206	2,28E-02	-48,918		34	8,93305	2,54E-03	-28,958		34	10,30956	4,77E-04	-24,975
36	6,0206	2,28E-02	-48,556	36	8,31575	4,49E-03	-28,572	36	10,32991	4,51E-03	-24,588			

Tabla D.13. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo Contra -Propagado, Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-48,472	2	20	8,27731	4,47E-03	-28,271	4	20	10,72427	0,479-E3	-24,377
	22	6,0206	2,28E-02	-47,729		22	8,85884	2,65E-03	-27,522		22	10,92866	1,91E-04	-23,629
	24	6,0206	2,28E-02	-46,558		24	9,11221	2,47E-03	-26,335		24	10,90265	1,90E-04	-22,445
	26	6,0206	2,28E-02	-44,652		26	10,05178	6,71E-04	-24,455		26	11,2085	1,56E-04	-20,565
	28	6,0206	2,28E-02	-41,606		28	10,34328	3,98E-04	-21,478		28	11,36764	8,99E-05	-17,584
	30	6,0206	2,28E-02	-36,864		30	10,45444	3,82E-04	-16,7662		30	11,27755	1,23E-04	-12,905
	32	6,0206	2,28E-02	-29,378		32	10,41803	3,70E-04	-9,394		32	11,12607	1,63E-04	-5,741
	34	6,0206	2,28E-02	-17,98		34	9,89324	6,77E-04	1,165		34	10,03306	5,64E-04	3,337
36	6,0206	2,28E-02	-5,686	36	6,02006	2,28E-02	8,855	36	6,0206	2,28E-02	8,713			
6	20	16,49606	1,36E-11	-21,248	8	20	18,1018	1,14E-15	-18,192	10	20	19,87967	3,82E-23	-15,654
	22	16,5088	2,16E-11	-20,498		22	18,12872	8,19E-16	-17,436		22	21,04615	3,24E-28	-14,85
	24	16,44841	1,26E-11	-19,306		24	18,34986	9,59E-17	-16,255		24	21,13243	2,65E-30	-13,665
	26	16,78159	2,16E-12	-17,433		26	18,44019	4,94E-17	-14,378		26	20,94626	1,50E-27	-11,796
	28	16,90534	3,73E-12	-14,463		28	18,40195	9,96E-17	-11,422		28	21,01635	1,02E-29	-8,849
	30	16,76875	2,80E-12	-9,795		30	18,22277	5,94E-16	-6,795		30	20,34205	1,27E-24	-4,299
	32	15,76843	8,21E-10	-2,774		32	16,63318	1,15E-11	-0,068		32	18,5921	8,05E-18	2,118
	34	10,77559	1,74E-04	5,272		34	7,05674	1,44E-02	6,908		34	6,0206	2,28E-02	7,952
36	6,0206	2,28E-02	9,606	36	6,0206	2,28E-02	10,225	36	6,0206	2,28E-02	10,745			

Tabla D.14. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo Booster, Bombeo Contra -Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-36,853	2	20	21,00322	4,35E-29	-24,043	4	20	23,13874	1,00E-40	-21,775
	22	6,0206	2,28E-02	-36,464		22	20,3222	1,55E-25	-23,657		22	22,88961	1,00E-40	-21,389
	24	6,0206	2,28E-02	-35,857		24	21,43337	6,72E-31	-23,048		24	24,24076	1,00E-40	-20,777
	26	6,0206	2,28E-02	-34,885		26	22,25033	1,55E-37	-22,077		26	25,01713	1,00E-40	-19,81
	28	6,0206	2,28E-02	-33,34		28	23,41517	1,00E-40	-20,542		28	24,82189	1,00E-40	-18,276
	30	6,89788	1,35E-02	-30,897		30	24,37082	1,00E-40	-18,105		30	25,69273	1,00E-40	-15,836
	32	9,81963	9,65E-04	-27,042		32	24,67555	1,00E-40	-14,249		32	25,7931	1,00E-40	-11,836
	34	11,15325	1,25E-04	-20,912		34	24,92222	1,00E-40	-8,179		34	29,15142	1,00E-40	-5,973
	36	11,22463	1,14E-04	-11,409	36	22,27543	1,00E-40	0,85	36	20,85044	4,20E-28	2,638		
6	20	27,66599	1,00E-40	-18,909	8	20	30,46961	1,00E-40	-16,527	10	20	32,69007	1,00E-40	-14,34
	22	27,99694	1,00E-40	-18532		22	30,66854	1,00E-40	-16,152		22	33,07372	1,00E-40	-13,959
	24	28,52413	1,00E-40	-17,915		24	30,18684	1,00E-40	-15,533		24	33,19147	1,00E-40	-13,351
	26	28,41966	1,00E-40	-16,955		26	31,14045	1,00E-40	-14,564		26	33,25209	1,00E-40	-12,384
	28	28,98708	1,00E-40	-15,412		28	30,99563	1,00E-40	-13,035		28	33,1507	1,00E-40	-10,854
	30	29,75736	1,00E-40	-12,983		30	31,47042	1,00E-40	-10,611		30	32,92344	1,00E-40	-8,436
	32	29,5875	1,00E-40	-9,145		32	30,93174	1,00E-40	-6,786		32	30,57921	1,00E-40	-4,639
	34	26,41807	1,00E-40	-3,186		34	26,92345	4,35E-38	-0,95		34	26,52818	1,00E-40	0,929
	36	13,88567	2,51E-07	4,679	36	9,74475	5,41E-03	6,215	36	7,37541	1,21E-02	7,334		

Tabla D.15. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo Contra -Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-36,203	2	20	20,68974	1,62E-27	-23,419	4	20	22,55067	3,12E-39	-20,426
	22	6,0206	2,28E-02	-35,449		22	21,21604	1,38E-29	-22,674		22	23,13263	1,00E-40	-19,234
	24	6,0206	2,23E-02	-34,258		24	22,10577	2,00E-37	-21,485		24	23,68055	1,00E-40	-17,36
	26	6,0206	2,23E-02	-32,373		26	23,10898	1,00E-40	-19,6		26	24,97849	1,00E-40	-14,389
	28	7,34309	9,33E-03	-29,395		28	24,55575	1,00E-40	-16,636		28	25,24374	1,00E-40	-9,72
	30	11,09698	1,74E-04	-24,66		30	24,40502	1,00E-40	-11,933		30	25,38983	1,00E-40	-2,676
	32	11,8274	4,45E-05	-17,291		32	23,59598	1,00E-40	-4,733		32	22,86108	1,00E-40	5,308
	34	11,69317	5,67E-05	-6,473		34	15,41993	2,30E-09	4,25		34	11,2967	7,32E-05	9,399
	36	10,38822	4,47E-04	3,099	36	6,0206	2,28E-02	-21,175	36	6,0206	2,28E-02	-18,166		
6	20	27,99911	1,00E-40	-17,41	8	20	30,31766	1,00E-40	-15,893	10	20	32,52172	1,00E-40	-13,799
	22	27,80386	1,00E-40	-16,237		22	30,50165	1,00E-40	-15,071		22	32,82076	1,00E-40	-13,049
	24	28,27577	1,00E-40	-14,353		24	30,25207	1,00E-40	-13,886		24	32,57679	1,00E-40	-11,866
	26	28,83407	1,00E-40	-11,395		26	30,579	1,00E-40	-12,016		26	32,70482	1,00E-40	-10,005
	28	29,11953	1,00E-40	-6,757		28	30,67772	1,00E-40	-9,064		28	32,21835	1,00E-40	-7,07
	30	28,54449	1,00E-40	-0,027		30	29,08707	1,00E-40	-4,49		30	28,33685	1,00E-40	-2,524
	32	25,87403	1,00E-40	-0,027		32	24,70543	1,00E-40	2,007		32	19,11526	7,18E-20	3,449
	34	7,87634	3,81E-03	7,085		34	6,72198	1,87E-02	7,927		34	6,0206	2,28E-02	8,191
	36	6,0206	2,28E-02	10,255	36	6,0606	2,28E-02	10,986	36	6,0206	2,28E-02	11,234		

Tabla D.16. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-34,978	2	20	6,0206	2,28E-02	-21,861	4	20	13,55726	9,36E-07	-5,143
	22	6,0206	2,28E-02	-34,607		22	6,0206	2,28E-02	-21,475		22	13,5746	1,00E-06	-4,756
	24	6,0206	2,28E-02	-33,997		24	6,0206	2,28E-02	-20,861		24	13,59251	7,92E-07	-4,144
	26	6,0206	2,28E-02	-33,011		26	6,0206	2,28E-02	-19,882		26	13,56979	9,48E-07	-3,176
	28	6,0206	2,28E-02	-31		28	6,0206	2,28E-02	-18,349		28	13,56436	9,58E-07	0,789
	30	6,0206	2,28E-02	-29,015		30	6,0206	2,28E-02	-15,904		30	13,56179	9,69E-07	4,635
	32	6,0206	2,28E-02	-25,081		32	6,0206	2,28E-02	-12,033		32	13,5849	9,75E-07	6,1024
	34	6,0206	2,28E-02	-18,984		34	6,0206	2,28E-02	-5,904		34	13,60197	1,19E-06	9,118
36	6,0206	2,28E-02	-9,173	36	6,0206	2,28E-02	3,743	36	13,42686	1,79E-06	19,234			
6	20	16,62137	5,21E-12	-1,292	8	20	16,76564	7,97E-12	1,36	10	20	18,63223	5,64E-17	3,612
	22	16,63169	5,19E-12	-0,906		22	16,75054	8,80E-12	1,745		22	18,65302	4,32E-17	3,997
	24	16,59431	5,84E-12	-0,296		24	19,75587	8,55E-12	2,354		24	18,65812	4,13E-17	4,604
	26	16,61241	5,83E-12	0,67		26	16,76492	8,31E-12	3,318		26	18,6661	3,62E-17	5,569
	28	16,60965	5,35E-12	2,206		28	16,81185	6,00E-12	4,849		28	18,71612	2,13E-17	7,09
	30	16,59918	5,74E-12	4,629		30	16,8479	4,51E-12	7,263		30	18,6956	2,05E-17	9,489
	32	16,60709	5,62E-12	8,448		32	16,87265	3,85E-12	11,046		32	18,7745	8,32E-17	13,216
	34	16,48692	1,17E-11	14,295		34	17,0751	1,07E-12	16,722		34	18,45635	3,17E-17	18,641
36	14,98322	1,24E-08	21,851	36	11,58957	5,57E-05	22,88	36	8,47996	8,29E-03	22,995			

Tabla D.17. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-34,381	2	20	6,0206	2,28E-02	-21,238	4	20	13,7714	5,07E-07	-4,519
	22	6,0206	2,28E-02	-33,562		22	6,0206	2,28E-02	-20,488		22	13,7789	5,27E-07	-3,77
	24	6,0206	2,28E-02	-32,39		24	6,0206	2,28E-02	-19,305		24	13,78398	4,96E-07	-2,583
	26	6,0206	2,28E-02	-30,477		26	6,0206	2,28E-02	-17,818		26	13,79892	4,79E-07	-0,709
	28	6,0206	2,28E-02	-27,505		28	6,0206	2,28E-02	-14,438		28	13,78582	4,89E-07	2,261
	30	6,0206	2,28E-02	-22,761		30	6,0206	2,28E-02	-9,704		30	13,88185	3,96E-07	6,915
	32	6,0206	2,28E-02	-15,25		32	6,0206	2,28E-02	-2,361		32	13,8759	7,30E-07	13,883
	34	6,0206	2,28E-02	-3,327		34	6,0206	2,28E-02	8,159		34	12,58194	1,22E-05	21,663
36	6,0206	2,28E-02	15,382	36	6,0206	2,28E-02	16,951	36	6,0206	2,28E-02	24,614			
6	20	16,51244	8,67E-12	-0,678	8	20	16,72422	9,49E-12	1,974	10	20	18,90955	5,45E-18	4,224
	22	16,51985	8,37E-12	0,068		22	16,7443	8,51E-12	2,718		22	18,96615	3,03E-18	4,966
	24	16,51612	8,44E-12	1,249		24	16,72538	9,90E-12	3,894		24	18,9556	2,87E-18	6,137
	26	16,53289	7,85E-12	3,119		26	16,74495	8,59E-12	5,756		26	18,98693	2,25E-18	7,979
	28	16,5264	8,27E-12	6,065		28	16,77274	6,33E-12	8,671		28	18,9936	1,08E-18	10,854
	30	16,4709	1,08E-11	10,614		30	16,84293	4,23E-12	13,101		30	19,01295	8,02E-19	15,123
	32	16,22666	4,58E-11	17,15		32	17,25928	2,55E-13	19,146		32	17,89897	2,81E-15	20,592
	34	10,5199	3,84E-04	22,868		34	7,96914	1,07E-02	23,012		34	7,3127	1,69E-02	23,083
36	6,0206	2,28E-02	25,087	36	6,10071	2,70E-02	25,534	36	6,0206	2,28E-02	25,771			

Tabla D.18. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-29,812	2	20	18,70216	1,14E-17	-7,081	4	20	19,39605	3,49E-20	-2,062
	22	6,0206	2,28E-02	-29,435		22	18,72199	7,77E-15	-6,695		22	18,40082	3,18E-20	-1,677
	24	6,0206	2,28E-02	-28,8		24	18,67159	1,92E-17	-6,082		24	19,40686	2,91E-20	-1,066
	26	6,0206	2,28E-02	-27,835		26	18,64745	1,83E-17	-5,112		26	19,38693	3,70E-20	-0,097
	28	6,0206	2,28E-02	-26,265		28	18,67857	1,41E-17	-3,577		28	19,38688	3,41E-20	1,434
	30	6,0206	2,28E-02	-23,863		30	18,64266	1,83E-17	-1,144		30	19,39338	3,70E-20	3,862
	32	6,0206	2,28E-02	-19,959		32	18,73971	7,07E-18	2,707		32	19,41702	2,57E-20	7,689
	34	6,0206	2,28E-02	-13,831		34	18,726	6,28E-18	8,745		34	19,32139	7,41E-20	13,578
36	6,0206	2,28E-02	-4,038	36	18,25678	6,21E-16	17,675	36	18,96611	1,10E-18	21,571			
6	20	19,80539	6,54E-23	0,742	8	20	19,44197	1,34E-20	3,047	10	20	21,69382	1,77E-33	5,281
	22	19,79206	9,85E-23	1,126		22	19,44563	1,22E-20	3,431		22	21,67965	2,43E-33	5,664
	24	19,79212	1,07E-22	1,737		24	19,44304	1,24E-20	4,04		24	21,67537	2,70E-33	6,272
	26	19,80487	7,97E-23	2,702		26	19,46862	8,99E-21	5,003		26	21,7136	1,29E-33	7,232
	28	19,35903	1,07E-22	4,234		28	19,49758	4,62E-21	6,529		28	21,75199	5,17E-34	8,749
	30	19,38703	7,87E-23	6,65		30	19,51678	3,59E-21	8,932		30	21,7598	2,80E-34	11,129
	32	19,77211	8,86E-23	10,445		32	19,68304	4,33E-22	12,683		32	21,89798	1,36E-35	14,804
	34	19,61317	6,61E-22	16,176		34	19,8857	2,15E-23	18,191		34	21,90489	2,33E-34	20,011
36	17,28809	1,81E-13	23,094	36	11,68598	5,71E-05	23,596	36	9,70444	8,97E-04	23,482			

Tabla D.19. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,0206	2,28E-02	-29,124	2	20	17,71058	7,85E-15	-6,402	4	20	19,00621	2,55E-18	-1,433
	22	6,0206	2,28E-02	-28,386		22	17,71923	7,94E-15	-5,653		22	19	2,87E-18	-0,687
	24	6,0206	2,23E-02	-27,188		24	17,76129	4,84E-15	-4,468		24	19,05184	1,66E-18	0,496
	26	6,0206	2,23E-02	-25,311		26	17,79113	5,04E-15	-2,586		26	19,02113	1,74E-18	2,369
	28	6,0206	2,23E-02	-22,318		28	17,69182	9,27E-15	0,383		28	19,02925	1,94E-18	5,32
	30	6,0206	2,23E-02	-17,59		30	17,82272	3,45E-15	5,069		30	19,0649	1,04E-18	9,899
	32	6,0206	2,23E-02	-10,099		32	17,79255	4,93E-15	12,1847		32	19,11166	6,85E-19	16,566
	34	6,0206	2,23E-02	1,183		34	17,93826	1,60E-14	20,976		34	15,76116	4,35E-10	23,188
36	6,0206	2,23E-02	20,79	36	6,24063	1,81E-02	24,149	36	7,61104	9,50E-03	25,302			
6	20	19,86075	8,76E-23	1,311	8	20	19,83095	3,96E-22	3,699	10	20	22,08212	1,64E-36	5,854
	22	19,88821	6,38E-23	2,055		22	19,82962	3,81E-22	4,44		22	22,12609	6,48E-37	6,592
	24	19,85917	8,11E-23	3,235		24	19,90586	1,52E-22	5,614		24	22,17838	1,79E-37	7,755
	26	19,8954	5,29E-22	5,098		26	19,85308	2,95E-22	7,463		26	22,14455	3,56E-37	9,583
	28	19,89871	4,76E-23	8,023		28	19,92021	1,15E-22	10,353		28	22,21632	4,20E-38	12,411
	30	19,81793	1,35E-22	12,49		30	20,00584	3,83E-23	14,67		30	22,13497	7,85E-38	16,538
	32	19,64342	1,22E-21	18,693		32	20,42707	4,71E-26	20,343		32	20,6254	2,49E-26	21,591
	34	11,19802	1,55E-04	23,582		34	8,28707	3,90E-03	23,384		34	7,70776	9,35E-03	23,218
36	6,64211	2,25E-02	25,661	36	6,0606	2,28E-02	25,651	36	6,0206	2,28E-02	25,829			

Tabla D.20. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,27E-02	-35,7820	2	0	6,02060	2,27E-02	-23,0270	4	0	6,84203	1,27E-02	-7,6160
	2	6,02060	2,27E-02	-35,9380		2	6,02060	2,27E-02	-22,8920		2	6,02060	2,27E-02	-7,5480
	4	6,02060	2,27E-02	-35,9710		4	6,02060	2,27E-02	-23,0630		4	6,02060	2,27E-02	-7,6960
	6	6,02060	2,27E-02	-35,9990		6	6,02060	2,27E-02	-22,8710		6	6,82916	1,46E-02	-7,6100
	8	6,02060	2,27E-02	-35,7310		8	6,02060	2,27E-02	-23,0900		8	6,14642	2,01E-02	-7,7070
	10	6,02060	2,27E-02	-35,7950		10	6,02060	2,27E-02	-23,1680		10	7,25235	9,95E-03	-7,5600
	12	6,02060	2,27E-02	-35,8080		12	6,02060	2,27E-02	-23,2190		12	6,80310	1,40E-02	-7,4660
	14	6,02060	2,27E-02	-35,7390		14	6,02060	2,27E-02	-22,7030		14	7,39630	1,33E-02	-7,4680
	16	6,02060	2,27E-02	-35,6770		16	6,02060	2,27E-02	-22,8170		16	7,21356	9,69E-03	-7,2990
	18	6,02060	2,27E-02	-35,3980		18	6,02060	2,27E-02	-22,6770		18	6,31153	2,74E-02	-7,1250
	20	6,02060	2,27E-02	-35,3880		20	6,02060	2,27E-02	-22,1190		20	6,79253	1,63E-02	-6,6550
6	0	10,2224	6,96E-04	-1,9620	8	0	12,57838	1,21E-05	1,8600	10	0	14,50558	8,92E-08	5,344
	2	10,5943	2,86E-04	-1,8000		2	12,29225	2,69E-05	1,8980		2	14,75960	3,27E-08	5,340
	4	10,4219	5,22E-04	-1,9060		4	12,13776	2,47E-05	1,9700		4	14,37279	1,57E-07	5,350
	6	10,4040	1,25E-03	-1,8970		6	12,00368	3,39E-05	1,9080		6	14,71812	3,71E-08	5,376
	8	10,4472	3,93E-04	-1,9510		8	12,23108	2,07E-05	1,9440		8	14,57913	8,53E-08	5,360
	10	10,2755	5,03E-04	-1,8670		10	12,20270	3,31E-05	1,9610		10	14,48614	1,24E-07	5,425
	12	11,5260	7,48E-05	-1,7970		12	12,26180	2,98E-05	2,0550		12	14,39461	1,16E-07	5,469
	14	10,7382	3,83E-04	-1,7220		14	12,56607	1,33E-05	2,1040		14	15,01955	1,11E-08	5,562
	16	11,1159	1,71E-04	-1,5670		16	11,72165	6,14E-05	2,2230		16	14,86444	4,06E-08	5,691
	18	11,2281	1,23E-04	-1,3620		18	12,03505	2,52E-05	2,4390		18	14,65555	7,47E-08	5,882
	20	10,1464	1,22E-03	-1,0210		20	12,36374	1,80E-05	2,7670		20	15,06227	1,15E-08	6,210

Tabla D.21. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1420 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 980 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,2750E-02	-35,662	2	0	6,02060	2,2750E-02	-22,838	4	0	7,41633	1,2563E-02	-7,605
	2	6,02060	2,2750E-02	-35,942		2	6,02060	2,2750E-02	-23,046		2	7,12312	1,1356E-02	-7,668
	4	6,02060	2,2750E-02	-35,823		4	6,02060	2,2750E-02	-22,986		4	6,86833	1,7242E-02	-7,540
	6	6,02060	2,2750E-02	-35,906		6	6,02060	2,2750E-02	-23,078		6	6,95633	1,2930E-02	-7,664
	8	6,02060	2,2750E-02	-35,620		8	6,02060	2,2750E-02	-22,835		8	7,35560	1,3178E-02	-7,493
	10	6,02060	2,2750E-02	-35,684		10	6,02060	2,2750E-02	-23,085		10	7,06636	1,9472E-02	-7,477
	12	6,02060	2,2750E-02	-35,710		12	6,02060	2,2750E-02	-22,928		12	7,67701	6,6243E-03	-7,374
	14	6,02060	2,2750E-02	-35,503		14	6,02060	2,2750E-02	-22,590		14	7,55267	1,5541E-02	-7,110
	16	6,02060	2,2750E-02	-35,449		16	6,02060	2,2750E-02	-22,509		16	7,54864	1,2737E-02	-6,999
	18	6,02060	2,2750E-02	-35,015		18	6,02060	2,2750E-02	-22,138		18	8,40825	4,6374E-03	-6,576
20	6,02060	2,2750E-02	-34,613	20	6,02060	2,2750E-02	-21,378	20	8,07249	1,3015E-02	-5,965			
6	0	11,32882	1,2504E-04	-1,995	8	0	12,74883	1,9526E-05	1,922	10	0	13,14537	5,0532E-06	5,376
	2	11,08571	3,4622E-04	-1,913		2	12,59201	8,6945E-06	1,926		2	13,68148	5,7969E-07	5,344
	4	10,83366	2,2826E-04	-2,014		4	12,30783	4,3789E-05	1,933		4	13,27436	1,6418E-06	5,377
	6	11,04346	1,6608E-04	-1,903		6	12,31350	1,8733E-05	2,026		6	12,99916	3,1310E-06	5,439
	8	10,77287	5,4129E-04	-1,839		8	12,24799	1,8556E-05	2,057		8	13,22970	1,7765E-06	5,422
	10	11,24980	1,5724E-04	-1,809		10	12,81301	2,4282E-05	2,103		10	13,45025	1,7257E-06	5,488
	12	11,11400	1,8639E-04	-1,766		12	12,75593	1,2252E-05	2,181		12	13,45620	1,9589E-06	5,562
	14	10,04566	8,1318E-04	-1,576		14	12,51469	1,0370E-05	2,364		14	13,52066	1,7683E-06	5,726
	16	11,49577	1,4119E-04	-1,269		16	12,67728	7,1553E-06	2,558		16	13,10605	2,4244E-06	5,970
	18	11,80863	6,3448E-05	-0,948		18	13,01088	3,7821E-06	2,945		18	13,41056	1,3996E-06	6,342
20	11,33295	9,1399E-05	-0,353	20	12,69154	7,0384E-06	3,575	20	13,24734	4,4459E-06	6,923			

Tabla D.22. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 980 nm / Raman 1455 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,2750E-02	-29,760	2	0	14,18274	1,4729E-07	-7,504	4	0	16,84304	2,9975E-12	-1,521
	2	6,02060	2,2750E-02	-29,892		2	12,70009	1,2479E-05	-7,545		2	16,48384	1,3389E-11	-1,451
	4	6,02060	2,2750E-02	-29,987		4	12,86228	5,4777E-06	-7,464		4	16,58215	6,2192E-11	-1,517
	6	6,02060	2,2750E-02	-30,000		6	13,02611	2,8534E-06	-7,448		6	16,38748	1,2815E-10	-1,441
	8	6,02060	2,2750E-02	-29,728		8	13,72938	5,7973E-07	-7,360		8	15,84892	4,8384E-10	-1,465
	10	6,02060	2,2750E-02	-29,762		10	14,70968	2,2513E-08	-7,395		10	15,64715	2,5922E-09	-1,370
	12	6,02060	2,2750E-02	-29,824		12	14,46098	5,5742E-08	-7,336		12	16,86133	2,8555E-12	-1,353
	14	6,02060	2,2750E-02	-29,746		14	13,72271	1,0166E-06	-7,190		14	16,75778	2,5272E-11	-1,272
	16	6,02060	2,2750E-02	-29,681		16	13,60446	1,0152E-06	-7,058		16	16,01113	1,9215E-10	-1,114
	18	6,02060	2,2750E-02	-29,105		18	14,18522	3,1064E-07	-6,844		18	16,60495	1,1050E-11	-0,942
20	6,02060	2,2750E-02	-29,551	20	13,52616	8,0851E-07	-6,509	20	16,83980	1,4701E-11	-0,569			
6	0	17,66607	1,2333E-14	2,361	8	0	18,93612	6,5014E-19	5,457	10	0	19,0096	9,6191E-18	8,243
	2	17,70642	7,2179E-14	2,376		2	17,95390	3,4540E-15	5,464		2	18,3630	4,0572E-16	8,265
	4	17,06465	1,1064E-12	2,409		4	18,47760	1,4579E-16	5,485		4	18,0358	8,0994E-16	8,270
	6	18,03546	2,2606E-15	2,403		6	19,04842	9,2324E-18	5,485		6	17,8846	5,5196E-15	8,287
	8	17,92315	6,8825E-15	2,441		8	18,10376	9,1171E-16	5,494		8	18,5383	4,4917E-16	8,294
	10	17,05091	1,8186E-12	2,468		10	18,07911	4,9051E-16	5,527		10	18,0716	8,0304E-16	8,339
	12	18,04301	2,7389E-15	2,480		12	18,21469	4,6892E-16	5,568		12	18,3349	2,3098E-15	8,376
	14	18,43691	9,0025E-16	2,570		14	18,57434	3,6785E-17	5,660		14	18,5967	5,0054E-17	8,445
	16	17,57844	3,8393E-14	2,719		16	18,02781	3,6533E-15	5,795		16	18,7837	1,5809E-18	8,581
	18	17,64552	1,1538E-14	2,914		18	18,40132	4,6097E-17	6,003		18	17,8929	3,0672E-15	8,787
20	17,73206	2,3183E-14	3,237	20	18,39931	9,2695E-17	6,304	20	18,1225	1,1426E-15	9,082			

Tabla D.23. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Contra-Propagado Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	6,02060	2,2750E-02	-29,886	2	0	13,77232	5,0011E-07	-7,495	4	0	16,73519	9,4661E-12	-1,497
	2	6,02060	2,2750E-02	-29,675		2	13,66419	6,9233E-07	-7,413		2	16,62000	1,1350E-11	-1,426
	4	6,02060	2,2750E-02	-29,908		4	13,41694	3,5655E-06	-7,474		4	18,26028	1,1975E-16	-1,405
	6	6,02060	2,2750E-02	-29,828		6	13,30172	3,2140E-06	-7,415		6	17,32776	2,4725E-13	-1,401
	8	6,02060	2,2750E-02	-29,861		8	14,65706	5,8012E-08	-7,387		8	16,71855	1,3247E-11	-1,383
	10	6,02060	2,2750E-02	-29,635		10	14,39893	6,3538E-08	-7,323		10	16,80359	1,3869E-11	-1,317
	12	6,02060	2,2750E-02	-29,597		12	13,20647	4,5802E-06	-7,163		12	16,77514	2,5572E-11	-1,224
	14	6,02060	2,2750E-02	-29,558		14	13,44107	1,2547E-06	-7,039		14	17,00107	9,8971E-12	-1,084
	16	6,02060	2,2750E-02	-29,451		16	12,69089	1,1197E-05	-6,729		16	16,19780	2,3497E-10	-0,783
	18	6,02060	2,2750E-02	-29,286		18	13,50425	2,1451E-06	-6,283		18	17,92572	1,2543E-14	-0,391
20	6,02060	2,2750E-02	-28,717	20	13,57983	2,1439E-06	-5,581	20	16,99834	7,5067E-12	0,275			
6	0	17,33304	9,0910E-13	2,341	8	0	18,56826	4,7232E-16	5,475	10	0	17,91235	2,7451E-15	8,255
	2	17,60049	1,4737E-14	2,377		2	17,86660	2,5162E-15	5,485		2	17,29912	1,0986E-13	8,266
	4	17,51867	6,0666E-14	2,371		4	18,51262	1,6615E-16	5,516		4	17,64090	1,4595E-14	8,269
	6	18,85137	2,0955E-18	2,409		6	18,60185	1,9552E-16	5,531		6	17,79848	3,5898E-15	8,308
	8	18,57761	1,1768E-16	2,485		8	18,45621	6,8611E-16	5,544		8	17,92719	2,0132E-15	8,357
	10	17,24930	1,9772E-13	2,524		10	18,38134	6,0797E-16	5,629		10	18,05183	9,1966E-16	8,416
	12	19,04607	2,1176E-19	2,626		12	18,23288	1,9519E-16	5,710		12	17,71911	7,9299E-15	8,524
	14	17,95492	1,1715E-15	2,777		14	18,87200	1,2760E-18	5,870		14	17,83373	4,5212E-15	8,662
	16	18,95531	7,6864E-19	3,012		16	18,36297	1,0889E-15	6,109		16	17,99370	9,6014E-16	8,899
	18	18,85001	1,3021E-17	3,418		18	18,18114	2,6605E-16	6,485		18	17,38699	5,9217E-14	9,271
20	18,76624	1,0778E-16	4,039	20	18,07058	1,0105E-14	7,103	20	17,56919	3,7170E-14	9,858			

Tabla D.24. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1455 nm.

Las tablas D.13 a D.24, presentan los resultados OPM obtenidos para una amplificación serial con bombeo Contra-Propagado para los modos de amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, longitudes de onda EDFA de 980 nm y 1480 nm, y Raman en 1420 nm y 1455 nm.

Los mejores resultados para la amplificación óptica HOA serial con bombeo Contra-Propagado fueron obtenidos nuevamente en el modo de amplificación Booster con longitud de onda EDFA 1480 nm y Raman 1420 nm, consignados en la tabla 1.15. Se observa en todos los modos de amplificación una estabilidad en el factor de calidad y BER, sin embargo, solo se alcanzan los mínimos OPM requeridos en el modo Booster en la longitud de onda ya mencionada, así como en EDFA 1480 nm y Raman 1455 nm, pero siendo inferiores a los obtenidos a los inicialmente mencionados.

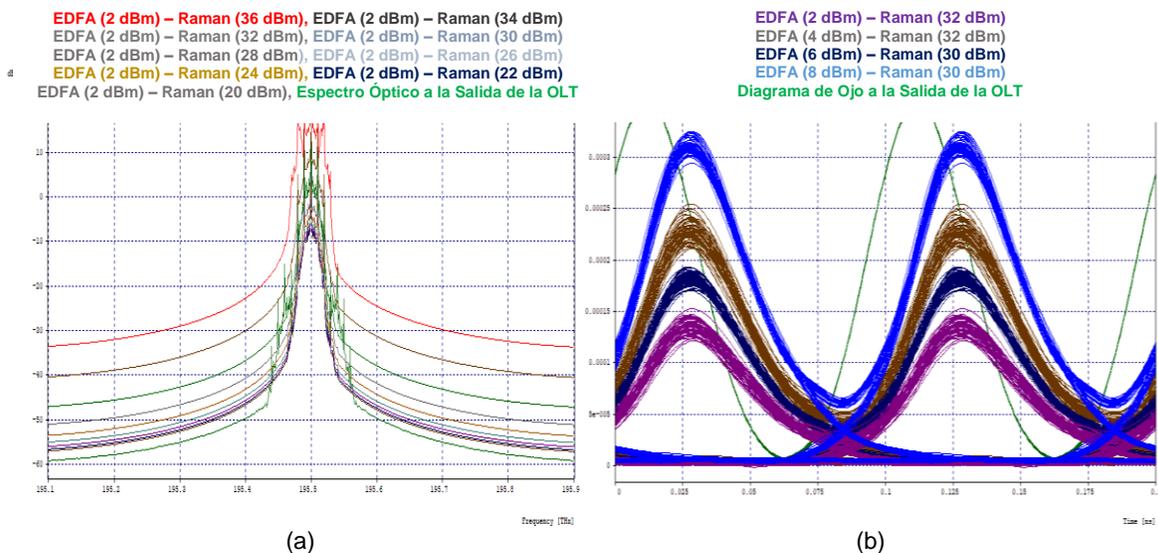


Figura D.3. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Serie/Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

Las gráficas espectrales y de ojo para rangos de potencia donde se encontró el mejor funcionamiento del sistema óptico son presentadas en la figura 1.3, donde se observó espectralmente ensanchamiento en recepción, fenómeno que indica la presencia de SPM sobre el sistema óptico y que puede ser corroborado teóricamente como se muestra en el ANEXO F y gráficamente mediante el desplazamiento en fase presentado en la Figura D.3 (b). Aunque se alcanzaron resultados por encima de los mínimos requeridos para el funcionamiento de la red óptica, se observa en el diagrama de ojo un sistema con menor calidad que el presentado en el caso 1.

### Caso 3. Amplificación en Serie/Cascada EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional.

Las tablas D.25 a D.27, presentaron resultados OPM obtenidos para una amplificación serie/cascada con bombeo Bidireccional para los modos de

amplificación Booster, Pre-Amplificado y En-Línea, y longitudes de onda EDFA en 1480 nm y Raman en 1420 nm, las cuales fueron encontradas como la mejor composición de longitudes de onda en los casos anteriores y son tomadas como base para obtención de resultados para el modo de bombeo del presente caso. Se debe tener en cuenta que el bombeo Bidireccional está limitado para dispositivos amplificadores EDFA dado a que los dispositivos Raman no presentan esta característica en el software de simulación OptSim.

Modo Booster, Bombeo Bidireccional, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	29,392	1,00E-40	-20,200	2	20	33,638	1,00E-40	-16,551	4	20	36,281	1,00E-40	-13,787
	22	29,329	1,00E-40	-19,809		22	33,613	1,00E-40	-16,175		22	36,190	1,00E-40	-13,403
	24	31,193	1,00E-40	-19,205		24	34,901	1,00E-40	-15,558		24	36,206	1,00E-40	-12,796
	26	32,073	1,00E-40	-18,229		26	35,555	1,00E-40	-14,587		26	36,633	1,00E-40	-11,829
	28	32,920	1,00E-40	-16,690		28	36,361	1,00E-40	-13,056		28	36,212	1,00E-40	-10,295
	30	34,752	1,00E-40	-14,262		30	35,480	1,00E-40	-10,629		30	35,308	1,00E-40	-7,876
	32	34,820	1,00E-40	-10,410		32	33,616	1,00E-40	-6,791		32	31,029	1,00E-40	-4,065
	34	30,925	1,00E-40	-4,335		34	27,047	1,00E-40	-0,824		34	26,273	1,00E-40	1,629
	36	15,199	3,96E-09	4,172	36	7,893	4,35E-03	6,412	36	6,351	2,63E-02	7,594		
6	20	37,045	1,00E-40	-11,340	8	20	37,942	1,00E-40	-9,131	10	20	35,356	1,00E-40	-6,969
	22	36,690	1,00E-40	-10,957		22	38,021	1,00E-40	-8,747		22	35,034	1,00E-40	-6,584
	24	36,708	1,00E-40	-10,349		24	37,080	1,00E-40	-8,142		24	34,349	1,00E-40	-5,982
	26	36,518	1,00E-40	-9,383		26	36,080	1,00E-40	-7,185		26	33,147	1,00E-40	-5,031
	28	35,478	1,00E-40	-7,861		28	33,999	1,00E-40	-5,670		28	31,003	1,00E-40	-3,540
	30	32,909	1,00E-40	-5,453		30	30,657	1,00E-40	-3,295		30	28,573	1,00E-40	-1,232
	32	28,398	1,00E-40	-1,702		32	27,921	1,00E-40	0,311		32	24,446	1,00E-40	2,038
	34	18,580	1,23E-17	3,353		34	13,005	3,04E-06	4,721		34	8,469	2,88E-03	6,087
	36	6,021	2,28E-02	8,944	36	6,021	2,28E-02	9,603	36	6,021	2,28E-02	10,707		

Tabla D.25. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Bidireccional. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Bidireccional, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	23,09689	1,00E-40	-7,8030	2	20	23,30227	1,00E-40	-2,4910	4	20	24,26274	1,00E-40	17,7460
	22	23,07205	1,00E-40	-7,4150		22	23,32925	1,00E-40	-1,5220		22	24,25577	1,00E-40	24,1570
	24	22,96622	1,00E-40	-6,8060		24	23,27563	1,00E-40	12,3700		24	24,27563	1,00E-40	10,3330
	26	23,09729	1,00E-40	-5,8340		26	23,29130	1,00E-40	21,4940		26	24,22486	1,00E-40	14,1120
	28	23,08869	1,00E-40	-4,2960		28	23,31061	1,00E-40	-0,4550		28	24,24300	1,00E-40	19,8420
	30	22,99989	1,00E-40	-1,8640		30	23,28747	1,00E-40	-0,0700		30	24,24908	1,00E-40	23,8680
	32	22,99841	1,00E-40	-1,6410		32	23,30109	1,00E-40	15,3190		32	24,22992	1,00E-40	10,0530
	34	23,26749	1,00E-40	-3,4880		34	23,50678	1,00E-40	23,6650		34	24,10493	1,00E-40	12,4420
	36	23,28259	1,00E-40	-3,1020	36	24,48367	1,00E-40	11,8400	36	22,75273	1,00E-40	16,1600		
6	20	23,93825	1,00E-40	21,5870	8	20	23,76224	1,00E-40	8,1120	10	20	25,49124	1,00E-40	2,1140
	22	23,96555	1,00E-40	24,1540		22	23,76153	1,00E-40	0,0120		22	25,48021	1,00E-40	2,4980
	24	23,95592	1,00E-40	10,6150		24	23,78713	1,00E-40	2,4450		24	25,48819	1,00E-40	3,1080
	26	23,98486	1,00E-40	12,1170		26	23,77189	1,00E-40	6,2960		26	25,48666	1,00E-40	4,0740
	28	23,94654	1,00E-40	14,4740		28	23,80085	1,00E-40	0,5420		28	25,46968	1,00E-40	5,6040
	30	23,96134	1,00E-40	18,0950		30	23,85746	1,00E-40	1,5090		30	25,36208	1,00E-40	8,0250
	32	24,09946	1,00E-40	22,8860		32	24,09640	1,00E-40	3,0410		32	25,00400	1,00E-40	4,4440
	34	24,36561	1,00E-40	25,0580		34	24,82764	1,00E-40	5,4690		34	25,12193	1,00E-40	4,8280
	36	13,81798	1,00E-40	1,9980	36	7,83575	1,00E-40	9,3070	36	7,47994	1,00E-40	5,4370		

Tabla D.26. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Bidireccional. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo En-Línea, Bombeo Bidireccional Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Co-Propagado Raman 1455 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	0	19,42145	4,41E-19	-10,122	2	0	19,77814	1,54E-20	-4,389	4	0	19,54872	4,25E-21	-1,293
	2	18,89269	3,31E-18	-10,093		2	19,51902	1,56E-21	-4,377		2	20,00870	7,08E-22	-1,278
	4	19,44489	2,81E-21	-10,102		4	19,97333	5,88E-22	-4,366		4	19,60995	4,65E-21	-1,283
	6	18,29134	1,72E-16	-10,100		6	19,84456	2,35E-21	-4,351		6	19,53403	8,49E-21	-1,258
	8	18,41326	3,87E-17	-10,073		8	19,85663	2,47E-21	-4,354		8	19,64544	4,48E-20	-1,248
	10	18,12856	2,16E-15	-10,032		10	20,05784	2,76E-22	-4,321		10	19,36444	1,35E-19	-1,223
	12	19,90012	1,89E-21	-9,968		12	19,22997	2,56E-20	-4,276		12	19,25392	9,37E-20	-1,182
	14	19,61760	8,53E-22	-9,905		14	19,58449	1,67E-20	-4,201		14	19,30483	1,24E-18	-1,129
	16	18,80975	1,23E-18	-9,804		16	19,91447	2,57E-21	-4,105		16	19,47647	3,31E-21	-1,026
	18	19,61409	6,57E-20	-9,624		18	19,93328	2,15E-21	-3,933		18	19,62096	1,90E-20	-0,860
20	18,80765	4,57E-18	-9,306	20	19,87545	2,71E-23	-3,667	20	19,17802	2,45E-18	-0,607			
6	0	18,97476	3,75E-18	1,223	8	0	17,73569	1,24E-14	3,429	10	0	15,49692	2,87E-09	5,504
	2	18,79068	2,17E-17	1,233		2	17,48318	3,42E-14	3,428		2	15,57339	1,85E-09	5,504
	4	18,97629	1,49E-18	1,236		4	17,57668	3,12E-14	3,443		4	15,50250	1,85E-09	5,509
	6	18,82067	7,24E-18	1,251		6	17,68164	1,03E-14	3,458		6	15,51878	2,42E-09	5,525
	8	18,77505	4,41E-17	1,263		8	17,54759	2,19E-14	3,468		8	15,60650	2,50E-09	5,538
	10	18,77319	2,46E-17	1,288		10	17,37595	1,35E-13	3,495		10	15,52358	2,77E-09	5,566
	12	18,83702	7,82E-18	1,329		12	17,47797	6,61E-14	3,536		12	15,53150	3,10E-09	5,608
	14	18,67243	7,15E-17	1,391		14	17,47703	6,53E-14	3,601		14	15,52053	4,66E-09	5,668
	16	18,83760	6,92E-18	1,501		16	17,18256	4,20E-13	3,695		16	15,41925	5,56E-09	5,772
	18	18,75750	8,47E-18	1,657		18	17,26968	1,89E-13	3,867		18	15,26766	1,11E-08	5,943
20	18,91140	2,55E-18	1,910	20	17,11697	1,66E-12	4,126	20	15,08815	3,03E-08	6,201			

Tabla D.27. Parámetros de monitoreo óptico Modo En-Línea, bombeo Bidireccional. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Los resultados presentados anteriormente muestran que las longitudes de onda Bidireccional EDFA en 1480 nm y Raman Co-Propagado en 1420 nm, para los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado en una red óptica HOA serial/cascada presentan la mejor respuesta a nivel OPM, sin embargo, el Booster es el modo que alcanzó un Factor Q en todo el rango de potencia EDFA y Raman de 20-32 dBm superior a 30 dB y BER de  $1 \times 10^{-40}$ .

EDFA (4 dBm) – Raman (36 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (34 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (32 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (30 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (28 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (26 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (24 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (22 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (20 dBm), Espectro Óptico a la Salida de la OLT

EDFA (4 dBm) – Raman (32 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (30 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (28 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (26 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (24 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (22 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (20 dBm), Diagrama de Ojo la Salida de la OLT

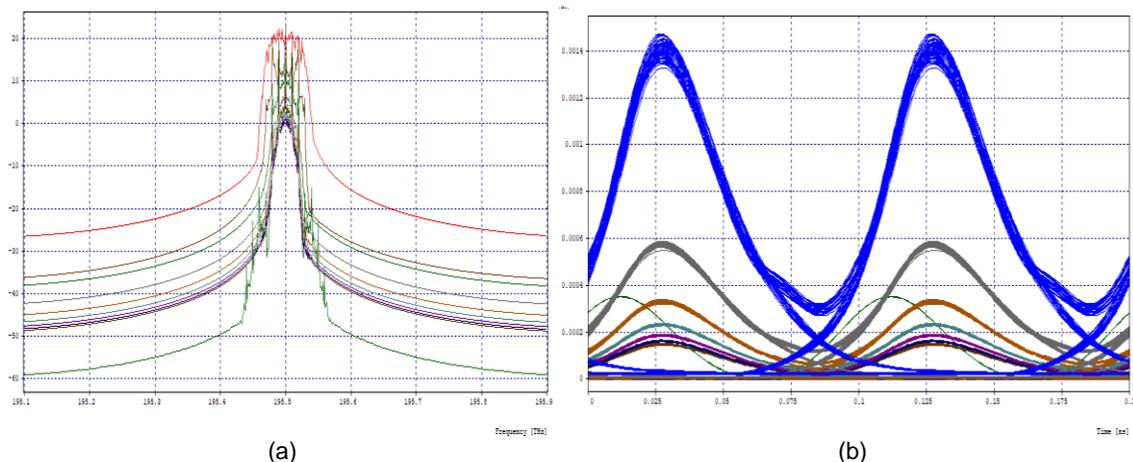


Figura D.4. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo Bidireccional, EDFA-Raman en Serie/Cascada para 1 canal a 10 Gbps.

La Figura D.4(a), muestra las gráficas espectrales de uno de los mejores rangos de amplificación del modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado. Se observa que en el rango Raman 20-30 dBm se mantiene un espectro similar entre variaciones de potencia de bombeo, donde además se presenta un ensanchamiento de estos respecto al presentado en transmisión, fenómeno que indica la presencia de SPM en el sistema óptico. De esta forma, se puede observar que las señales en transmisión y recepción presentan un desfase que teóricamente afirma la presencia de SPM en el sistema óptico (ver ANEXO F), sin embargo, este fenómeno no es influyente dadas los resultados OPM obtenidos para este modo de amplificación y tipo de bombeo.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ITU-T Rec. G. 697, “Supervisión Óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa”, 2016.

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO E**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO E. AMPLIFICACIÓN PARALELA EDFA-RAMAN PARA 1 CANAL A 10 GBPS, BOMBEO CO-PROPAGADO, CONTRA-PROPAGADO Y BIDIRECCIONAL

En este anexo, se consignan los resultados de la amplificación EDFA-Raman en paralelo para los diferentes tipos de bombeo y modos de amplificación implementados en la herramienta de simulación OptSim, para resultados evaluados en longitudes de onda EDFA de 1480 nm y Raman en 1420 nm, las cuales fueron obtenidas como se mostró en el ANEXO D, siendo las que mejor resultado a nivel OPM obtuvieron en el sistema óptico, por lo cual se utilizan para la implementación paralela.

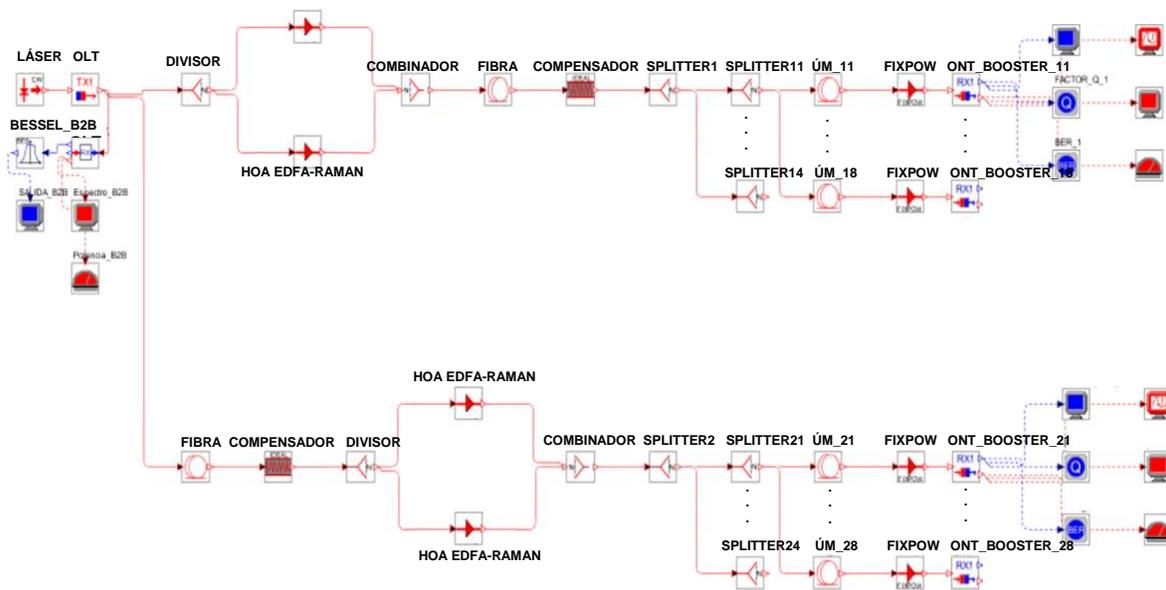


Figura E.1. Escenario de Simulación, amplificación en Paralelo EDFA-Raman a 10 Gbps.

El sistema es configurado como se observa en la Figura 1.1, considerando los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, además de los tipos de bombeo Co-Propagado, Contra-Propagado y Bidireccional, con el fin de determinar los parámetros de monitoreo óptico mínimos considerados para el funcionamiento de una red XGS-PON.

### Caso 1. Amplificación Paralela EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Co-Propagado.

Las tablas a continuación consignan los resultados OPM obtenidos para una amplificación paralela con bombeo Co-Propagado para los modos de amplificación Booster y Pre-Amplificado, para longitudes de onda EDFA de 1480 nm y Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	11,70005	6,03E-05	-29,412	2	20	34,13810	1,00E-40	-16,701	4	20	38,04470	1,00E-40	-12,238
	22	12,27166	2,59E-05	-29,027		22	34,86110	1,00E-40	-16,316		22	38,03597	1,00E-40	-11,857
	24	15,00910	1,86E-08	-28,419		24	35,00806	1,00E-40	-15,711		24	38,09959	1,00E-40	-11,245
	26	15,23109	3,84E-09	-27,448		26	36,45910	1,00E-40	-14,739		26	38,02766	1,00E-40	-10,277
	28	19,40063	2,53E-20	-25,911		28	36,49629	1,00E-40	-13,212		28	37,23490	1,00E-40	-8,746
	30	22,99079	1,00E-40	-23,463		30	37,41840	1,00E-40	-10,770		30	34,91705	1,00E-40	-6,315
	32	28,54322	1,00E-40	-19,613		32	35,80943	1,00E-40	-6,915		32	29,50430	1,00E-40	-2,488
	34	32,72482	1,00E-40	-13,480		34	28,16924	1,00E-40	-0,855		34	21,34476	3,25E-30	3,253
	36	29,76858	1,00E-40	-3,824	36	7,44918	8,30E-03	7,600	36	6,02060	2,28E-02	9,405		
6	20	37,11877	1,00E-40	-9,142	8	20	35,55495	1,00E-40	-6,562	10	20	31,98748	1,00E-40	-4,244
	22	37,10235	1,00E-40	-8,757		22	35,28046	1,00E-40	-6,176		22	31,45868	1,00E-40	-3,863
	24	36,54058	1,00E-40	-8,148		24	34,31647	1,00E-40	-5,569		24	30,66064	1,00E-40	-3,259
	26	35,71057	1,00E-40	-7,184		26	32,65250	1,00E-40	-4,610		26	29,34022	1,00E-40	-2,306
	28	33,97458	1,00E-40	-5,651		28	30,42435	1,00E-40	-3,090		28	27,63571	1,00E-40	-0,812
	30	30,48116	1,00E-40	-3,240		30	27,50728	1,00E-40	-0,710		30	26,46480	1,00E-40	1,471
	32	26,54438	1,00E-40	0,516		32	23,20371	1,00E-40	2,832		32	14,55230	3,83E-08	4,602
	34	10,69105	1,87E-04	5,684		34	7,39027	8,44E-03	7,567		34	6,02060	2,28E-02	8,439
	36	6,02060	2,28E-02	11,607	36	6,02060	2,28E-02	13,030	36	6,02060	2,28E-02	13,627		

Tabla E.1. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,02060	2,28E-02	-36,347	2	20	27,36353	1,00E-40	-6,460	4	20	27,39666	1,00E-40	0,180
	22	6,02060	2,28E-02	-35,931		22	27,31006	1,00E-40	-6,076		22	27,37113	1,00E-40	0,566
	24	6,02060	2,28E-02	-35,289		24	27,34617	1,00E-40	-5,464		24	27,34095	1,00E-40	1,177
	26	6,02060	2,28E-02	-34,308		26	27,29253	1,00E-40	-4,493		26	27,39875	1,00E-40	2,146
	28	6,02060	2,28E-02	-32,754		28	27,36305	1,00E-40	-2,954		28	27,31281	1,00E-40	3,681
	30	6,58821	1,64E-02	-30,243		30	27,62970	1,00E-40	-0,517		30	27,42384	1,00E-40	6,115
	32	9,94902	8,55E-04	-26,407		32	27,44331	1,00E-40	3,346		32	27,34879	1,00E-40	9,973
	34	13,48217	1,50E-06	-20,244		34	27,48679	1,00E-40	9,469		34	6,02060	2,28E-02	-9,335
	36	14,82453	1,33E-08	-10,435	36	6,02060	2,28E-02	-5,842	36	18,94168	2,16E-18	24,725		
6	20	27,63742	1,00E-40	3,840	8	20	6,02060	2,28E-02	-18,942	10	20	27,42728	1,00E-40	9,142
	22	27,65663	1,00E-40	4,227		22	6,02060	2,28E-02	-18,557		22	27,44000	1,00E-40	9,526
	24	27,66148	1,00E-40	4,837		24	6,02060	2,28E-02	-17,946		24	27,39418	1,00E-40	10,135
	26	27,63368	1,00E-40	5,805		26	26,36429	1,00E-40	8,649		26	6,02060	2,28E-02	-14,549
	28	27,65337	1,00E-40	7,340		28	6,02060	2,28E-02	-15,440		28	27,36524	1,00E-40	12,627
	30	27,62633	1,00E-40	9,770		30	6,02060	2,28E-02	-12,993		30	6,02060	2,28E-02	-10,544
	32	27,78776	1,00E-40	13,614		32	6,02060	2,28E-02	-9,107		32	27,53112	1,00E-40	18,825
	34	28,11738	1,00E-40	19,636		34	26,58154	1,00E-40	22,302		34	25,66044	1,00E-40	24,309
	36	6,02060	2,28E-02	6,618	36	7,26672	1,24E-02	25,895	36	6,02060	2,28E-02	14,771		

Tabla E.2. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Las tablas E.1 y E.2, presentan los resultados de la amplificación HOA en paralelo, para los modos Booster y Pre-Amplificado con bombeo Co-Propagado, implementando las longitudes de onda para EDFA en 1480 nm y Raman en 1420 nm. Aunque se observa que ambos modos de amplificación tienen unos valores respecto a Factor Q y BER superiores a los mínimos requeridos, el modo Booster presenta mejores resultados arrojando factores de calidad superiores a 30 dB y tasas de transmisión de datos de  $1 \times 10^{-40}$ .

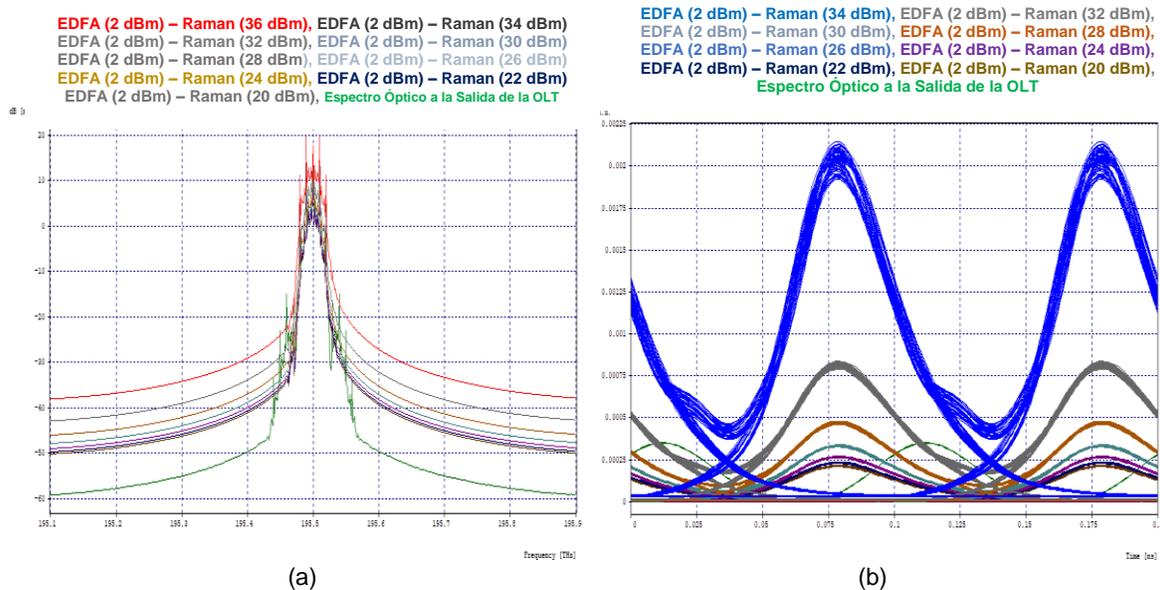


Figura E.2. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Los diagramas espectrales del modo Booster de la Figura 1.2(a), corresponden a una de las mejores composiciones de potencia EDFA-Raman, donde se observa la presencia de SPM en todo el rango seleccionado, siendo más evidente cuando se alcanza el intervalo de potencia Raman entre 32-36 dBm dado el ensanchamiento que presentan los espectros en recepción con respecto al transmitido. Además, por medio de la Figura 1.2 (b), se observa la presencia de un desfase entre los diagramas resultantes de entrada y salida, el cual es fácilmente observado en estos resultados gráficos. De este modo, el desfase entre señales calculado por medio de la base teórica presentado en el ANEXO F para el sistema amplificado, determinó un desfase máximo de  $\varphi_{MAX} = 0.025$ , correspondiente a  $\frac{1}{4}$  de ciclo del pulso de la señal, lo cual determina que además del análisis del efecto SPM observado a través de los diagramas espectrales, también es posible observar y calcular dicho efecto por medio del análisis del diagrama de ojo. No obstante, dados los resultados obtenidos y observados a través de los parámetros de monitoreo óptico para este modo de amplificación, este fenómeno no lineal no genera una degradación en el sistema óptico.

## Caso 2. Amplificación Paralela EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Contra-Propagado.

Modo Booster, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,04892	2,45E-02	-31,239	2	20	25,42980	1,00E-40	-18,060	4	20	27,51041	1,00E-40	-15,739
	22	6,72212	1,66E-02	-30,857		22	25,13908	1,00E-40	-17,674		22	27,75882	1,00E-40	-15,352
	24	8,95200	2,86E-03	-30,246		24	25,49898	1,00E-40	-17,055		24	27,67362	1,00E-40	-14,745
	26	9,03885	2,46E-03	-29,273		26	25,75669	1,00E-40	-16,084		26	27,81790	1,00E-40	-13,785
	28	11,30258	1,14E-04	-27,737		28	25,85045	1,00E-40	-14,551		28	28,29225	1,00E-40	-12,239
	30	12,56845	1,14E-05	-25,284		30	26,18031	1,00E-40	-12,118		30	28,12078	1,00E-40	-9,813
	32	14,22106	1,67E-07	-21,417		32	26,16682	1,00E-40	-8,271		32	27,45999	1,00E-40	-5,968
	34	14,51227	4,07E-08	-15,294		34	25,01067	1,00E-40	-2,225		34	24,16229	1,00E-40	-0,015
	36	14,18923	1,13E-07	-5,849	36	10,41548	6,16E-04	6,098	36	6,38276	2,09E-02	7,790		
6	20	30,51056	1,00E-40	-12,856	8	20	33,80443	1,00E-40	-10,462	10	20	34,38677	1,00E-40	-8,375
	22	30,77335	1,00E-40	-12,465		22	33,63869	1,00E-40	-10,082		22	34,28849	1,00E-40	-7,990
	24	30,61860	1,00E-40	-11,858		24	33,82862	1,00E-40	-9,467		24	33,73345	1,00E-40	-7,382
	26	30,86881	1,00E-40	-10,892		26	33,40058	1,00E-40	-8,501		26	33,23112	1,00E-40	-6,413
	28	30,69746	1,00E-40	-9,358		28	33,03432	1,00E-40	-6,970		28	31,66689	1,00E-40	-4,891
	30	29,98330	1,00E-40	-6,929		30	30,98959	1,00E-40	-4,554		30	28,98969	1,00E-40	-2,484
	32	27,75637	1,00E-40	-3,108		32	27,08055	1,00E-40	-0,767		32	26,31088	1,00E-40	1,213
	34	23,12465	1,00E-40	2,640		34	15,03477	1,37E-08	4,563		34	9,85568	1,01E-03	6,217
	36	6,02060	2,28E-02	9,017	36	6,02060	2,28E-02	9,789	36	6,02060	2,28E-02	10,955		

Tabla E.3. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Pre-Amplificado, Bombeo Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	6,04892	2,45E-02	-31,239	2	20	15,88661	4,36E-10	-6,840	4	20	17,96243	4,38E-15	-1,613
	22	6,72212	1,66E-02	-30,857		22	18,46835	2,45E-17	-6,533		22	18,24488	1,59E-16	-1,465
	24	8,95200	2,86E-03	-30,246		24	17,69114	7,06E-14	-6,233		24	19,86317	2,71E-22	-1,195
	26	9,03885	2,46E-03	-29,273		26	17,61910	1,14E-14	-5,656		26	20,83670	1,72E-27	-0,769
	28	11,30258	1,14E-04	-27,737		28	19,58365	1,07E-20	-4,875		28	21,30037	2,69E-31	-0,176
	30	12,56845	1,14E-05	-25,284		30	20,94018	3,95E-29	-3,758		30	23,53919	1,00E-40	0,833
	32	14,22106	1,67E-07	-21,417		32	13,45424	9,65E-07	-14,067		32	17,47845	1,15E-13	-9,756
	34	14,51227	4,07E-08	-15,294		34	22,35075	1,14E-39	-7,652		34	24,54139	1,00E-40	-5,983
	36	14,18923	1,13E-07	-5,849	36	26,30877	1,00E-40	-1,877	36	26,59938	1,00E-40	-0,129		
6	20	18,75474	8,93E-18	1,139	8	20	18,88616	8,57E-18	3,580	10	20	19,73403	2,21E-22	5,747
	22	19,67989	6,58E-21	1,362		22	18,61214	5,19E-17	3,684		22	19,16882	1,02E-19	5,875
	24	19,99857	7,83E-23	1,643		24	19,98172	4,08E-23	3,937		24	21,59090	4,60E-33	6,103
	26	21,31936	3,20E-31	2,012		26	20,79559	7,34E-27	4,312		26	22,43863	3,01E-40	6,530
	28	21,83651	5,56E-34	2,709		28	22,73655	1,00E-40	4,997		28	23,34673	1,00E-40	7,151
	30	23,17999	1,00E-40	3,506		30	23,81835	1,00E-40	5,817		30	23,13990	1,00E-40	7,990
	32	26,16304	1,00E-40	4,753		32	24,96771	1,00E-40	7,036		32	25,92073	1,00E-40	9,165
	34	25,17551	1,00E-40	-3,262		34	26,25174	1,00E-40	-0,967		34	27,13830	1,00E-40	1,077
	36	26,47377	1,00E-40	1,720	36	26,72863	1,00E-40	3,441	36	26,62996	1,00E-40	4,043		

Tabla E.4. Parámetros de monitoreo óptico Modo Pre-Amplificado, bombeo Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Las tablas anteriormente presentadas consignan los resultados de la amplificación HOA en paralelo con bombeo Contra-Propagado, para los modos Booster y Pre-Amplificado, implementando las longitudes de onda para EDFA en 1480 nm y Raman en 1420 nm, siendo el modo de amplificación Booster el que mejor resultados OPM obtuvo, superando los mínimos requeridos por la recomendación G.697 de la ITU-T, donde se observa un sistema estable cuando el rango de potencia de amplificación EDFA se encuentra entre 2-10 dBm y Raman entre 20-30 dBm.

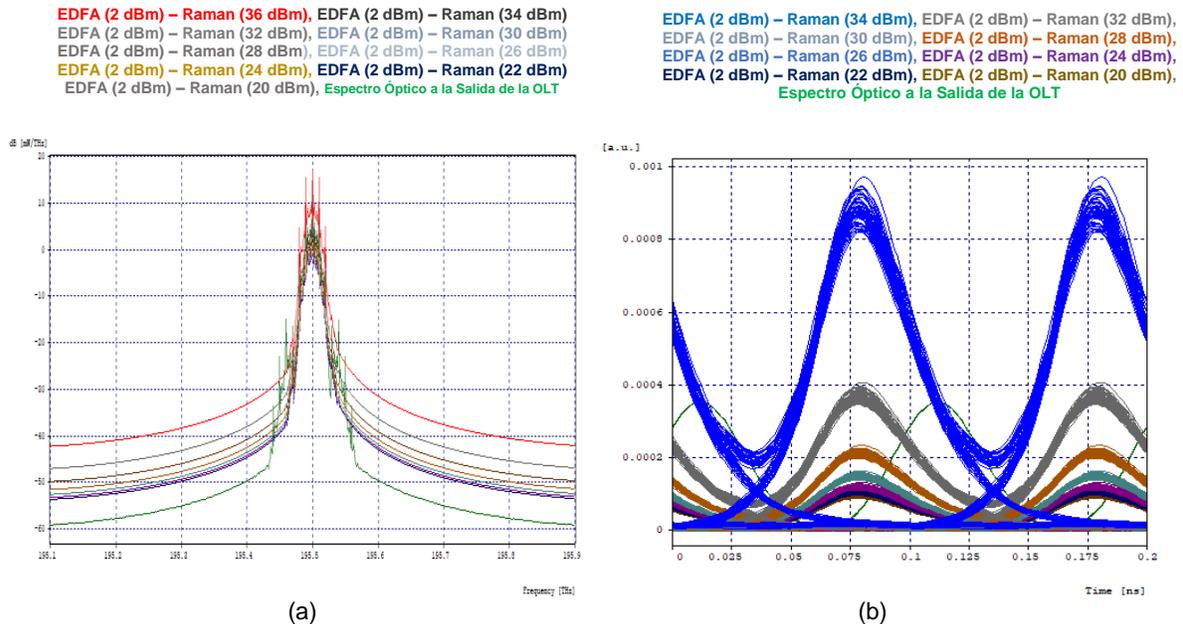


Figura E.3. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo Contra-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

La Figura E.3(a), presenta los diagramas espectrales para uno de los mejores rangos de amplificación donde se encontró el mejor rendimiento de la red óptica, observando una forma espectral similar para variaciones de potencia Raman entre 20-34 dBm. Adicionalmente, se observa ensanchamiento de los espectros en recepción con respecto al de referencia, indicativo de la presencia de SPM en el sistema y que puede ser corroborado por el corrimiento de fase entre los diagramas de ojo de transmisión y recepción observados en la Figura 1.3 (b). Sin embargo, este fenómeno no lineal no genera una degradación en el sistema óptico dados los resultados OPM obtenidos.

### Caso 3. Amplificación Paralela EDFA-Raman para 1 canal a 10 Gbps, bombeo Bidireccional.

El análisis de la amplificación en paralelo para los modos Booster y Pre-Amplificado con bombeo Bidireccional se realizó teniendo en cuenta los mejores resultados obtenidos en los casos anteriormente evaluados, por lo cual para dicho análisis se seleccionó el modo Booster. Se debe tener en cuenta que el tipo de

bombeo Bidireccional solo es aplicable a la configuración del amplificador EDFA, ya que el amplificador Raman no posee esta característica en el software de simulación OptSim.

Modo Booster, Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	30,57200	1,00E-40	-19,377	2	20	33,82457	1,00E-40	-15,705	4	20	36,10910	1,00E-40	-12,866
	22	30,58579	1,00E-40	-19,262		22	33,13169	1,00E-40	-15,682		22	35,03811	1,00E-40	-12,848
	24	31,33013	1,00E-40	-19,216		24	35,60163	1,00E-40	-15,614		24	36,79380	1,00E-40	-12,817
	26	30,38825	1,00E-40	-19,019		26	34,51427	1,00E-40	-15,518		26	36,16642	1,00E-40	-12,770
	28	31,01816	1,00E-40	-18,701		28	34,45526	1,00E-40	-15,344		28	35,51527	1,00E-40	-12,682
	30	33,13773	1,00E-40	-18,008		30	37,04413	1,00E-40	-15,019		30	36,95424	1,00E-40	-12,450
	32	34,11682	1,00E-40	-16,410		32	36,68844	1,00E-40	-14,144		32	37,52191	1,00E-40	-11,965
	34	38,12658	1,00E-40	-12,328		34	38,12188	1,00E-40	-11,290		34	38,39468	1,00E-40	-10,027
36	31,17442	1,00E-40	-3,611	36	30,95655	1,00E-40	-3,461	36	30,55336	1,00E-40	-3,229			
6	20	37,35855	1,00E-40	-10,396	8	20	35,95962	1,00E-40	-8,177	10	20	34,54175	1,00E-40	-6,026
	22	36,93960	1,00E-40	-10,390		22	37,25573	1,00E-40	-8,164		22	34,51373	1,00E-40	-6,019
	24	36,79626	1,00E-40	-10,369		24	36,08276	1,00E-40	-8,140		24	34,78825	1,00E-40	-6,000
	26	36,68115	1,00E-40	-10,328		26	36,03455	1,00E-40	-8,110		26	34,39254	1,00E-40	-5,969
	28	37,43092	1,00E-40	-10,273		28	36,44906	1,00E-40	-8,074		28	34,15735	1,00E-40	-5,927
	30	37,75549	1,00E-40	-10,171		30	37,25716	1,00E-40	-7,962		30	34,97934	1,00E-40	-5,877
	32	37,56160	1,00E-40	-9,841		32	36,64410	1,00E-40	-7,786		32	34,21238	1,00E-40	-5,739
	34	37,03732	1,00E-40	-8,558		34	35,89941	1,00E-40	-6,945		34	33,59624	1,00E-40	-5,203
36	30,28598	1,00E-40	-2,889	36	29,66448	1,00E-40	-2,402	36	29,03666	1,00E-40	-1,730			

Tabla E.5. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Modo Booster, Bombeo EDFA Bidireccional, Raman Contra-Propagado, Longitud de Onda: EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm														
EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]	EDFA [dBm]	RAMAN [dBm]	FACTOR Q [dB]	BER	Prx [dBm]
0	20	22,62945	1,00E-40	-7,229	2	20	22,59200	1,00E-40	-2,869	4	20	22,95400	1,00E-40	0,216
	22	23,62104	1,00E-40	-7,068		22	24,24950	1,00E-40	-2,771		22	23,22687	1,00E-40	0,261
	24	22,56185	1,00E-40	-6,975		24	23,88541	1,00E-40	-2,684		24	24,76520	1,00E-40	0,365
	26	23,47291	1,00E-40	-6,805		26	24,45296	1,00E-40	-2,515		26	25,48351	1,00E-40	0,504
	28	24,64023	1,00E-40	-6,546		28	25,49206	1,00E-40	-2,320		28	25,06045	1,00E-40	0,672
	30	24,57634	1,00E-40	-6,076		30	25,03198	1,00E-40	-1,933		30	25,93192	1,00E-40	1,024
	32	26,94767	1,00E-40	-5,615		32	26,47645	1,00E-40	-1,662		32	26,20363	1,00E-40	1,266
	34	27,48989	1,00E-40	-4,746		34	27,37194	1,00E-40	-1,245		34	28,40132	1,00E-40	1,517
36	26,90844	1,00E-40	-1,028	36	27,22694	1,00E-40	0,786	36	26,96495	1,00E-40	2,667			
6	20	23,43815	1,00E-40	2,772	8	20	23,08764	1,00E-40	5,119	10	20	23,54558	1,00E-40	7,274
	22	24,01810	1,00E-40	2,844		22	23,38785	1,00E-40	5,166		22	23,43159	1,00E-40	7,342
	24	24,39023	1,00E-40	2,945		24	24,29344	1,00E-40	5,243		24	25,94030	1,00E-40	7,396
	26	24,90054	1,00E-40	3,058		26	24,90424	1,00E-40	5,342		26	26,33611	1,00E-40	7,567
	28	25,39054	1,00E-40	3,361		28	24,85418	1,00E-40	5,665		28	26,12979	1,00E-40	7,832
	30	26,82370	1,00E-40	3,550		30	26,18212	1,00E-40	5,821		30	27,24502	1,00E-40	8,008
	32	26,06898	1,00E-40	3,752		32	26,69312	1,00E-40	6,036		32	27,14370	1,00E-40	8,192
	34	28,00928	1,00E-40	3,970		34	28,19933	1,00E-40	6,188		34	28,26978	1,00E-40	8,333
36	27,11380	1,00E-40	4,596	36	27,15183	1,00E-40	6,566	36	26,93876	1,00E-40	8,519			

Tabla E.6. Parámetros de monitoreo óptico Modo Booster, bombeo EDFA Bidireccional Raman Contra-Propagado. Longitud de onda EDFA 1480 nm / Raman 1420 nm.

Los resultados presentados en las tablas E.5 y E.6, mostraron que la mejor amplificación para un sistema HOA paralelo fue en el modo Booster con bombeo EDFA Bidireccional y Raman Co-Propagado, teniendo factores de calidad mínimos de 29 dBm y máximos de 38 dBm, así como tasas de transmisión de errores en el sistema óptico de  $1 \times 10^{-40}$  en todo el rango de amplificación EDFA-Raman.

EDFA (4 dBm) – Raman (36 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (34 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (32 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (30 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (28 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (26 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (24 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (22 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (20 dBm), Espectro Óptico a la Salida de la OLT

EDFA (4 dBm) – Raman (32 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (30 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (28 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (26 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (24 dBm), EDFA (4 dBm) – Raman (22 dBm)  
 EDFA (4 dBm) – Raman (20 dBm), Diagrama de Ojo la Salida de la OLT

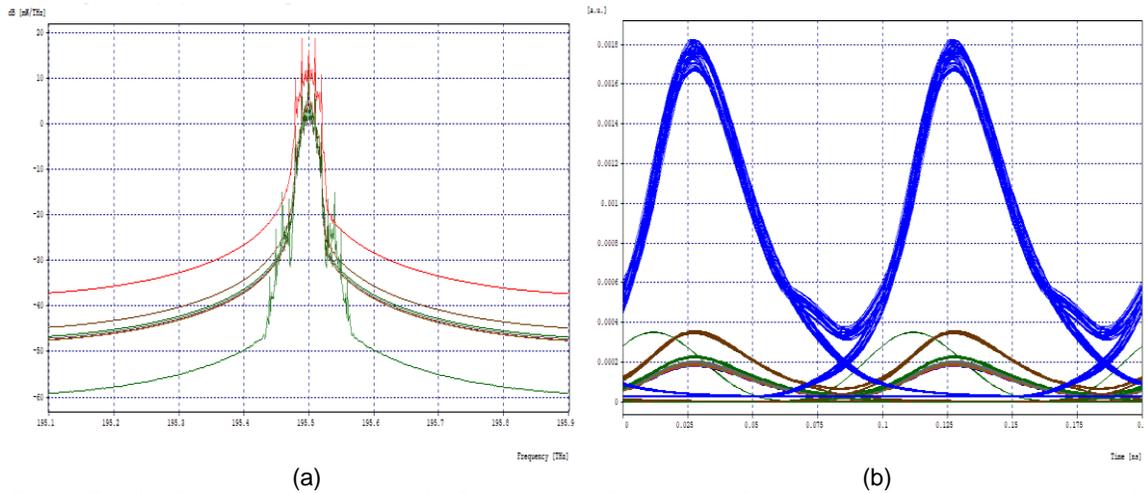


Figura E.4. (a) Espectro Mejor Rango, (b) Diagrama de Ojo mejores Casos. Modo Booster, fuente de bombeo EDFA Bidireccional, Raman Co-Propagado, EDFA-Raman en Paralelo para 1 canal a 10 Gbps.

Se puede observar en la figura E.4(a), un comportamiento espectral en el rango Raman de 20-32 dBm el cual mantiene una forma similar para cada variación de potencia, sin embargo, el sistema óptico tiene un comportamiento estable en todo el rango evaluado dados los resultados OPM obtenidos. Aunque se observa un leve ensanchamiento respecto al espectro transmitido, lo cual implica la presencia del fenómeno no lineal SPM, este no genera una degradación en el sistema óptico dados los resultados OPM obtenidos. Adicionalmente, la Figura E.4 (b), muestra un desplazamiento de la fase de la señal en recepción que como es calculado en el Anexo F, corrobora la presencia de dicho fenómeno sobre el sistema óptico.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] ITU-T Rec. G. 697, “Supervisión Óptica para sistemas de multiplexación por división en longitud de onda densa”, 2016.

**Análisis de Desempeño en un Enlace de Bajada XGS-PON con Amplificación  
Híbrida HOA**

**ANEXO F**



**ADRIÁN ALEXANDER BURBANO CORAL  
MIGUEL ALEJANDRO FIGUEROA VALENZUELA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE TELECOMUNICACIONES  
POPAYÁN  
2021**

## ANEXO F. CALCULO DESFASE SPM PARA AMPLIFICACION SERIE-CASCADA Y PARALELO

Para observar de mejor manera como la Automodulación de Fase afecta el enlace y que se hizo visible en el diagrama de ojo se realizó el análisis numérico para obtener el valor del desfase que existe entre la señal resultante y la señal que proviene de la entrada (señal ideal), para poder realizar todos estos cálculos se realizó una búsqueda muy minuciosa acerca de otros trabajos que basan todo su desarrollo en este efecto no lineal y que fueron de gran utilidad pues se tomó muy en cuenta todos los pasos que se mostraron para poder obtener de manera satisfactoria el valor del desfase y con el cual se verifico la presencia de SPM en nuestro enlace y de igual manera se pudo realizar un análisis más completo [1][2].

Como primer paso se obtienen los datos necesarios de la fibra que se usara en el enlace en este caso es la fibra monomodo Furukawa SM332, de esta manera se muestran los siguientes valores:

- Área Efectiva:  $80 \text{ } \mu\text{m}^2$
- Coeficiente De Atenuación:  $0.2 \text{ dB/Km}$
- Ventana de Funcionamiento:  $1550 \text{ nm}$

Cuando ya se tienen estos valores se pasa a obtener los valores del índice de refracción no lineal, frecuencia central y coeficiente no lineal, los cuales sirven más adelante para poder completar los cálculos.

1. Índice Refracción No Lineal  $n_2 = 2,35 * \frac{10^{-20} \text{m}^2}{\text{W}}$

2. Frecuencia Central:  $W_0 = \frac{2 * \pi * c}{\lambda} = \frac{2 * \pi * 3 * \frac{10^8 \text{m}}{\text{s}}}{1550 * 10^{-9} \text{m}}$   
 $W_0 = 387\pi \text{ THz}$

3. Coeficiente No Lineal:

$$\gamma = \frac{n_2 * W_0}{A_{eff} * C} = \frac{(2.35 * 10^{-20}) * ((387 * \pi) * 10^{12})}{(8.0 * 10^{-11}) * (3 * 10^8)}$$

$$\gamma = 1,20 \frac{1}{\text{KmW}}$$

- Coeficiente de Atenuación:

Se expresa el coeficiente en unidades lineales en lugar de logarítmicas por tanto se hace la conversión:

$$\alpha' = (0.23) * \left(0.2 \frac{\text{dB}}{\text{Km}}\right)$$

$$\alpha' = 0.046 \text{ Km}^{-1}$$

- Longitud Efectiva:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0.046)(80)}}{0.046}$$

$$L_{eff} = 21.20 \text{ Km}$$

Se debe calcular la longitud no lineal pero para esto se debe definir la potencia con la cual se envían los pulsos ópticos en este caso el láser tiene una potencia de 1 mW.

- Longitud No Lineal:

$$LNL = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.20 \text{ Km}^{-1})(1 * 10^{-3} \text{ W})}$$

$$LNL = 833.33 \text{ Km}$$

Finalmente se obtiene el desfase que tienen los pulsos

$$\varphi_{MAX} = \frac{L_{eff}}{LNL} = \frac{21.20 \text{ Km}}{833.33 \text{ Km}}$$

$$\varphi_{MAX} = 0.025$$

De igual manera que se realizaron los cálculos para obtener el desfase para el enlace con configuración serie-cascada y paralelo, se realizaron los mismos cálculos, pero para obtener el valor del desfase de los pulsos para el modo mixto el cual ya maneja una distancia mucho mayor para ser más preciso 530 Km, de esta manera se muestran los valores de cada una de las operaciones mostradas anteriormente.

- Longitud Efectiva:

$$L_{eff} = \frac{1 - e^{-\alpha' L}}{\alpha'} = \frac{1 - e^{-(0.046)(530)}}{0.046}$$

$$L_{eff} = 21.74 \text{ Km}$$

Se debe calcular la longitud no lineal pero para esto se debe definir la potencia con la cual se envían los pulsos ópticos en este caso el láser tiene una potencia de 1 mW.

- Longitud No Lineal:

$$LNL = \frac{1}{\gamma P_0} = \frac{1}{(1.20 \text{ Km}^{-1})(1 * 10^{-3} W)}$$

$$LNL = 833.33 \text{ Km}$$

Finalmente se obtiene el desfase que tienen los pulsos.

$$\varphi_{MAX} = \frac{L_{eff}}{LNL} = \frac{21.74 \text{ Km}}{833.33 \text{ Km}}$$

$$\varphi_{MAX} = 0.026$$

Como ya se mencionó, el desfase se puede apreciar de mejor manera en los diagramas de ojo mostrados en el trabajo de grado, pero aun así al obtener el valor del desfase se puede confirmar que tanto se afecta el enlace por el SPM, en este caso en particular no es muy significativo el impacto que causa la Automodulación de Fase pero aun así es siempre de gran importancia tenerlo en cuenta puesto que si se varían algunas variables dentro del sistema este podría cambiar su comportamiento y afectar o interferir en la transmisión de los datos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Carrera A, Jiménez M.S., “Estudio y simulación del Efecto No Lineal Automodulación de Fase en Fibras Ópticas Monomodo”. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Revista Politécnica-Febrero, Vol. 35, No. 1, 2015.
- [2] J.G. López Perafán, A. Toledo Tovar, H. Ordoñez, J.P. Agredo, “Efectos no lineales y su relación con los parámetros de transmisión de una red WDM”. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Vol 20, No. 31, pp 23-35, 2011.